



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Avaliação de Técnicas de Controle Robusto em Microredes
de Corrente Contínua Considerando Incertezas Politópicas**

Alfredo Silie León

MANAUS-AM

2026

Alfredo Silie León

Avaliação de Técnicas de Controle Robusto em Microredes de Corrente
Contínua Considerando Incertezas Politópicas

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renan Landau Paiva de Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Sales e Silva

MANAUS-AM

2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- S584a Sillie León, Alfredo
Avaliação de técnicas de controle robusto em microredes de corrente contínua considerando incertezas politópicas / Alfredo Sillie León. - 2026.
92 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Renan Landau Paiva de Medeiros.
Coorientador(a): Luiz Eduardo Sales e Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Manaus (AM), 2026.
1. Microrredes CC. 2. Conversores de potência. 3. Controle Robusto. 4. Estabilidade. 5. Incertezas paramétricas. I. Medeiros, Renan Landau Paiva de. II. Silva, Luiz Eduardo Sales e. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título
-



Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

FOLHA DE APROVAÇÃO

Poder Executivo Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Av. General Rodrigo Octávio Jordão Ramos, nº 3.000 - Campus Universitário, Setor Norte - Coroado, Pavilhão do CETELI. Fone/Fax (92) 99271-8954 Ramal:2607. E-mail: ppgee@ufam.edu.br

ALFREDO SILIE LEÓN

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE ROBUSTO EM MICROREDES DE CORRENTE CONTÍNUA CONSIDERANDO INCERTEZAS POLITÓPICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração Controle e Automação de Sistemas.

Aprovado em 12 de fevereiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Landau Paiva de Medeiros - Presidente
Prof. Dr. Alvaro Christian Montañó Saavedra- Membro Titular 1 - Externo
Prof. Dr. Michel Wanderson de Souza Campos - Membro Titular 2 - Externo

Manaus, 04 de fevereiro de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Renan Landau Paiva de Medeiros, Professor do Magistério Superior**, em 12/02/2026, às 15:50, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Michel Wanderson de Souza Campos, Usuário Externo**, em 13/02/2026, às 13:38, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALVARO CHRISTIAN MONTANO SAAVEDRA, Usuário Externo**, em 20/02/2026, às 15:02, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3001072** e o código CRC **E5D4A3BF**.

Av. General Rodrigo Octávio Jordão Ramos, nº 3.000 - Bairro Coroado Campus Universitário, Setor Norte
- Telefone: 99271-8954
CEP 69080-900 Manaus/AM - Pavilhão do CETELI. E-mail: ppgee@ufam.edu.br

Referência: Processo nº 23105.003669/2026-28

SEI nº 3001072

*Gostaria de expressar minha
gratidão, primeiramente a Deus,
por me conceder força, sabedoria
e perseverança ao longo desta
caminhada. Em seguida,
agradeço profundamente à minha
mãe e ao meu pai, pelo amor
incondicional, pelo apoio
constante e pelos valores
transmitidos, que foram
fundamentais para a realização
deste trabalho.*

Agradecimentos

Expresso minha profunda gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), por me permitir integrar um processo de formação voltado à qualificação de profissionais e ao fortalecimento das atividades de pesquisa, fundamentais para o desenvolvimento das tecnologias atuais. Agradeço, de maneira especial, aos meus amigos cubanos, o professor Israel, Edri e Yuri, que foram essenciais ao me indicarem e incentivarem a iniciar o curso de Mestrado.

Sou imensamente grato ao meu orientador, professor Renan, por sua orientação constante, dedicação e apoio, contribuindo de forma decisiva para meu crescimento acadêmico e pessoal. Estendo também meus agradecimentos ao meu coorientador, professor Luiz Eduardo, pelos valiosos conselhos e ensinamentos ao longo deste trabalho.

Aos meus companheiros e amigos Alex, Caleb, Iago e Wallace, registro meu sincero agradecimento pelo apoio prestado e pela colaboração fundamental durante todo o processo de experimentação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFAM, manifesto meu reconhecimento pela contribuição indispensável à minha formação. Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, e a todas as pessoas que sempre me apoiaram e acreditaram em mim.

Por fim, agradeço a Deus, que me fortalece diariamente, permitindo-me seguir em frente com esforço, dedicação e a certeza de que cada passo representa um avanço rumo ao futuro.

Resumo da Dissertação apresentada à UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE ROBUSTO EM MICROREDES DE CORRENTE CONTÍNUA CONSIDERANDO INCERTEZAS POLITÓPICAS

Alfredo Silie León

Orientadores: Renan Landau Paiva de Medeiros

Luiz Eduardo Sales e Silva

Programa: Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

As microrredes em corrente contínua (CC) têm se consolidado como uma alternativa promissora para o fornecimento de energia elétrica em regiões isoladas ou de difícil acesso, devido à sua capacidade de operar de forma autônoma e à facilidade de integração com fontes renováveis, como sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia como as baterias. Nesse contexto, os conversores de potência assumem papel fundamental, uma vez que são responsáveis pela regulação da tensão do barramento CC, pela estabilidade do sistema e pela eficiência no compartilhamento de energia, mesmo diante da variabilidade das cargas e da intermitência das fontes renováveis de geração de energia elétrica. Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa de técnicas de controle robusto aplicadas a uma arquitetura de microrrede CC isolada, com foco em garantir a estabilidade, a eficiência e a confiabilidade da operação do sistema. Investiga-se diferentes estratégias de controle, incluindo alocação de polos, controle ótimo LQR e controle baseado em modelos LPV, considerando a operação do sistema sob incertezas paramétricas. A análise de desempenho é conduzida a partir de resultados experimentais obtidos por meio da implementação prática dos controladores em uma microrrede CC real, permitindo avaliar de forma objetiva o comportamento dinâmico do sistema e evidenciar as vantagens e limitações de cada estratégia de controle investigada.

Palavras-chave: Microrredes CC, Conversores de potência, Controle Robusto, Estabilidade, Incertezas paramétricas.

Abstract of Dissertation presented to UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

EVALUATION OF ROBUST CONTROL TECHNIQUES APPLIED IN DC MICROGRIDS SUBJECT TO POLYTOPIC UNCERTAINTIES

Alfredo Silie León

Advisors: Renan Landau Paiva de Medeiros

Luiz Eduardo Sales e Silva

Department: Postgraduate in Electrical Engineering

Direct current (DC) microgrids have emerged as a promising alternative for electricity supply in isolated or hard-to-reach regions, due to their ability to operate autonomously and their ease of integration with renewable energy sources, such as photovoltaic systems and storage systems like battery. In this context, power converters play a fundamental role, as they are responsible for regulating the DC bus voltage, ensuring system stability, and enabling efficient energy sharing, even in the presence of load variability and the intermittency of renewable sources. This work presents a comparative evaluation of robust control techniques applied to an isolated DC microgrid architecture, with the objective of ensuring system stability, efficiency, and operational reliability. Different control strategies are investigated, including pole placement, Linear Quadratic Regulator (LQR) control, and Linear Parameter-Varying (LPV) model-based control, considering system operation under parametric uncertainties. Performance analysis is carried out based on experimental results obtained from the practical implementation of the controllers in a real DC microgrid, allowing an objective assessment of the system's dynamic behavior and highlighting the advantages and limitations of each investigated control strategy.

Keywords: DC microgrids, Power converters, Robust control, Stability, Parametric uncertainties.

Lista de Figuras

2.1	Topologia radial	10
2.2	Topologia de barramento múltiplo	11
2.3	Topologia multiterminal.	12
2.4	Topologia de microrrede CC de barramento em anel.	13
2.5	Topologia de escada	14
2.6	Topologia zonal	15
2.7	Diagrama de um painel solar fotovoltaico	16
2.8	Esquemático elétrico de uma célula fotovoltaica	17
2.9	Esquemático elétrico do conversor Buck.	17
2.10	Esquemático elétrico do conversor <i>boost</i>	20
2.11	Linearização em torno de um ponto de operação.	23
3.1	Região delimitada por faixas verticais.	35
3.2	Região circular.	36
3.3	Região cônica	37
3.4	Regiões combinadas.	38
4.1	Arquitetura proposta para a aplicação no problema da comunidade isolada selecionada.	45
4.2	Fonte programável IT6722A da ITECH.	46
4.3	Elementos constituintes do conversor Boost utilizado no sistema.	47
4.4	Elementos constituintes do conversor Buck utilizado no sistema.	48
4.5	Visão global da microrrede em corrente contínua considerada neste trabalho.	49
4.6	Diagrama em blocos do sistema de controle.	51
4.7	Conversor Boost em malha aberta - Implementação Experimental.	53

4.8	Interface gráfica desenvolvida para a realização dos testes experimentais.	57
4.9	Interface gráfica - Bloco de comandos.	58
4.10	Rastreamento de Referência - Implementação Experimental.	64
4.11	Resposta do Duty Cycle no Rastreamento da Referência para Diferentes Controladores - Implementação Experimental.	65
4.12	Variação da Tensão de Entrada — Controle por Alocação de Polos - Implementação Experimental.	67
4.13	Variação da Tensão de Entrada — Controle por LMI - Implementação Experimental.	68
4.14	Variação da Tensão de Entrada — Controle por LQR - Implementação Experimental.	69
4.15	Tensão do barramento CC sob variação combinada da tensão de entrada e da carga — Controle baseado em A.Polos - Implementação Experimental.	71
4.16	Tensão do barramento CC sob variação combinada da tensão de entrada e da carga — Controle baseado em LMI - Implementação Experimental.	72
4.17	Tensão do barramento CC sob variação combinada da tensão de entrada e da carga — Controle LQR - Implementação Experimental. . .	73
4.18	Tensão do barramento CC sob variação combinada da tensão de entrada e da carga — Controle LMI - Simulado.	74
4.19	Índices de desempenho ISE, IAE, ITAE e ISCS referentes ao Teste 2, no qual é avaliada a resposta do sistema sob variação da tensão de entrada.	77
4.20	Índices de desempenho ISE, IAE, ITAE e ISCS referentes ao Teste 3, no qual é avaliada a resposta do sistema sob variações combinadas da tensão de entrada e da carga conectada.	78
4.21	Região D especificada no projeto via LMI e posicionamento dos polos do sistema em malha fechada obtidos pelo controlador projetado por LMI.	82

4.22	Região D especificada no projeto via LMI e posicionamento dos polos do sistema em malha fechada obtidos pelo controlador projetado por Alocação de polos.	83
4.23	Região D especificada no projeto via LMI e posicionamento dos polos do sistema em malha fechada obtidos pelo controlador projetado por LQR.	84

Lista de Tabelas

4.1	Ganhos dos controladores em tempo contínuo aplicados ao conversor Boost.	55
4.2	Ganhos dos controladores em tempo contínuo aplicados ao conversor Buck.	56
4.3	Índices de desempenho ISE referentes ao Teste 2, sob variação da tensão de entrada.	76
4.4	Índices de desempenho obtidos no Teste 3, sob variações combinadas da tensão de entrada e da carga.	76

Lista de Abreviaturas e Siglas

AC Corrente Alternada. 8

AP Alocação de Polos. 50

IAE Integral of Absolute Error. 76

ISCS Integral of the Squared Control Signal. 76

ISE Integral of Squared Error. 76

ITAE Integral of Time-weighted Absolute Error. 76

LMI Inequação Matricial Linear. 2, 3

LPV Linear Parameter-Varying (Sistema Linear com Parâmetros Variável). 2, 3

LQR Regulador Quadrático Linear. 2

SAE Sistema de Armazenamento de Energia. 8

SGD Sistema de Geração Distribuída. 8

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos da Dissertação	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivos Específicos	4
1.2	Justificativa	4
1.3	Organização do Trabalho	5
2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Introdução	7
2.2	Definição de Microrrede	8
2.3	Microrredes de Corrente Contínua	8
2.4	Topologias de Microrredes CC	9
2.4.1	Estrutura Radial Aplicada em Microrredes CC	9
2.4.2	Topologia com Barramentos Múltiplos	10
2.4.3	Topologia Multiterminal	11
2.4.4	Topologia de Microrrede CC de Barramento em Anel	12
2.4.5	Topologia de Escada	13
2.4.6	Topologia Zonal	14
2.5	Componentes de uma Microrrede CC	15
2.5.1	Sistema Solar Fotovoltaico	16
2.5.2	Modelo Matemático dos Conversores de Potência	17
2.5.3	Modelo Linearizado dos Conversores de Potência	23
2.5.4	Cargas Ativas e Passivas	24
2.5.5	Dispositivos de Armazenamento de Energia	24
2.6	Tipos de Controle Aplicados a Microrredes de Corrente Contínua	25

2.7	Alocação de Polos	27
2.7.1	Alocação de Polos via Equação de Lyapunov	28
2.8	Controle LQR	30
2.8.1	Associação entre as Condições de Projeto e os Parâmetros do LQR	31
3	Metodologia de Projeto de Controle Robusto Considerando Incer- tezas Politópicas Via LMI	32
3.1	Introdução	32
3.2	Estabilização de Sistemas Lineares Contínuos por Realimentação de Estados via LMI	33
3.3	Regiões LMI	34
3.3.1	Região Delimitada por Faixas	35
3.3.2	Região Circular	36
3.3.3	Região Cônica	37
3.4	Estabilização Quadrática e Sistemas Politópicos	39
3.4.1	Caso de Sistemas Politópicos	39
3.5	Metodologia de Projeto por D-Estabilização Quadrática com Incer- tezas Politópicas e Regiões LMI	40
4	Análise dos Resultados Experimentais	43
4.1	Introdução	43
4.2	Arquitetura da Microrrede CC	44
4.2.1	Ambiente Experimental	46
4.3	Arquitetura e Implementação do Sistema de Controle	50
4.3.1	Diagrama em Blocos do Sistema de Controle	50
4.3.2	Implementação dos Controladores AP, LQR e LMI	52
4.4	Projeto dos Controladores por Realimentação de Estados	53
4.4.1	Ganhos dos Controladores por Conversor	54
4.5	Interface Gráfica para Realização dos Testes Experimentais	56
4.6	Breve Descritivo dos Testes Realizados	59
4.7	Resultados Experimentais e Discussão	63
4.7.1	Teste 1: Rastreamento de Referência	63

4.7.2	Teste 2: Variação da Tensão de Entrada	66
4.7.3	Teste 3: Variação Combinada da Tensão de Entrada e da Carga	70
4.7.4	Breve Apresentação do Sistema Simulado	74
4.7.5	Teste 4: Índices de Desempenho	75
4.7.6	Análise Comparativa Global	79
4.8	Análise de Estabilidade e Regiões D	80
4.8.1	Conceito de Região D Aplicada ao Projeto Via LMI	80
4.8.2	Análise da Região D e Posicionamento dos Polos em Malha Fechada	81
5	Conclusão do Estudo	85
5.1	Conclusões	85
5.1.1	Trabalhos Futuros	86
5.2	Artigos Publicados e/ou Submetidos	87
	Referências Bibliográficas	88

Capítulo 1

Introdução

As microrredes em corrente contínua (CC) vêm ganhando destaque como uma alternativa eficiente e sustentável para o fornecimento de energia elétrica, especialmente em comunidades isoladas ou de difícil acesso [1]. A possibilidade de operação autônoma (*off-grid*), aliada à facilidade de integração de fontes renováveis, como sistemas fotovoltaicos e células a combustível, bem como à redução de perdas associadas aos processos de conversão de energia, torna essas redes uma solução promissora para ampliar o acesso à eletricidade com menor impacto ambiental [1]. Nesse cenário, os conversores eletrônicos de potência desempenham papel central, em especial os conversores CC-CC do tipo Boost, amplamente utilizados para a elevação e regulação da tensão do barramento CC da microrrede.

A estabilidade e o desempenho dinâmico das microrredes CC dependem diretamente do projeto adequado dos sistemas de controle aplicados a esses conversores. O controle descentralizado tem sido amplamente adotado por permitir que cada conversor opere de forma autônoma, regulando sua tensão de saída sem a necessidade de comunicação centralizada, aumentando a confiabilidade e a escalabilidade do sistema. Essa abordagem é particularmente eficaz quando a regulação da tensão do barramento CC é atribuída a um único conversor. Entretanto, em cenários nos quais múltiplos conversores atuam simultaneamente na regulação da tensão, torna-se necessário o emprego de estratégias de controle coordenado ou centralizado, a fim de gerenciar adequadamente a contribuição de cada unidade e evitar interações indesejadas que possam comprometer a estabilidade do sistema [2]. Estratégias baseadas em critérios de estabilidade de Lyapunov têm sido empregadas para garantir

que o sistema permaneça estável mesmo na presença de incertezas paramétricas e variações de carga [2].

Entre as técnicas clássicas aplicadas em microrredes CC, o controle por *droop* destaca-se por possibilitar o compartilhamento proporcional de potência entre conversores conectados em paralelo [3]. Com a incorporação de mecanismos adaptativos e limitação de corrente, essa estratégia apresenta bom desempenho frente a cargas de potência constante [4]. No entanto, limitações relacionadas à precisão na regulação da tensão e ao desempenho dinâmico motivam a investigação de técnicas de controle mais robustas.

Nesse contexto, estudos recentes têm explorado a aplicação de técnicas baseadas em modelos linearizados e estratégias de controle avançadas para conversores Boost. Análises de pequeno sinal e estudos comparativos demonstram que métodos como alocação de polos, controle ótimo Linear Quadratic Regulator (LQR) e abordagens robustas podem oferecer melhorias significativas na estabilidade e no desempenho dinâmico desses conversores em microrredes CC [5]. Em particular, o controle LQR tem sido amplamente investigado devido à sua capacidade de otimizar o compromisso entre esforço de controle e desempenho dinâmico, sendo aplicado com sucesso em conversores Boost integrados a sistemas de energia [6].

Além disso, técnicas baseadas em sistemas *Linear Parameter-Varying* (LPV) têm se mostrado especialmente adequadas para lidar com a natureza não linear dos conversores CC-CC e com as variações paramétricas associadas a diferentes condições operacionais. A modelagem LPV permite representar o sistema como uma família de modelos lineares dependentes de parâmetros variantes no tempo, possibilitando o projeto de controladores robustos capazes de garantir estabilidade em toda uma região de operação [7]. Abordagens LPV também têm sido aplicadas com sucesso em sistemas de energia conectados a microrredes CC, evidenciando sua eficácia frente a incertezas e variações de carga [8, 9].

No âmbito do controle robusto, o uso de Linear Matrix Inequalities (LMI) no projeto de controladores LPV permite tratar explicitamente incertezas politópicas no modelo do sistema, fornecendo garantias formais de estabilidade e desempenho [10]. Essa característica torna essas técnicas particularmente atrativas para microrredes CC isoladas, onde variações de carga, flutuações na geração renovável e mudanças

frequentes no ponto de operação são comuns. Nesse contexto, diferentes estratégias de controle robusto têm sido investigadas, incluindo abordagens baseadas em controle preditivo robusto Robust Model Predictive Control (RMPC), capazes de lidar simultaneamente com incertezas na demanda, intermitência de fontes renováveis e perturbações externas, garantindo desempenho dinâmico adequado e operação econômica segura [11]. Ademais, em microrredes isoladas com alta penetração de geração renovável, a redução da inércia do sistema impõe desafios adicionais à estabilidade, o que tem motivado o desenvolvimento de estratégias resilientes baseadas em controle de inércia virtual, visando mitigar desvios de frequência e potência mesmo sob condições severas de perturbação [12].

Diante da revisão de literatura apresentada, este trabalho tem como principal objetivo investigar experimentalmente três metodologias de projeto de controle aplicadas a uma topologia de microrrede CC isolada, tendo foco nas metodologias de alocação de polos [13], o controle ótimo LQR [14] e uma abordagem baseada em sistemas LPV considerando incertezas politópicas via LMI [10]. As técnicas de projeto de controle são projetadas com base em um modelo linearizado da topologia de microrrede adotada.

Por fim, a presente pesquisa avalia experimentalmente o desempenho e a robustez das estratégias de controle propostas, com foco na garantia de estabilidade da tensão do barramento CC da microrrede, considerando variações de carga e incertezas paramétricas do sistema. A comparação entre métodos clássicos e a abordagem LPV robusta fornece uma análise abrangente dos compromissos entre simplicidade de implementação, desempenho dinâmico e robustez, contribuindo para o avanço do projeto de sistemas de controle aplicados a microrredes de corrente contínua.

1.1 Objetivos da Dissertação

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar experimentalmente o desempenho de metodologias de controle aplicadas a uma topologia de microrrede CC isolada, visando garantir a estabilidade de tensão, eficiência e operação confiável, diante de variações de carga e de parâmetros do sistema (como resistência e tensão de entrada).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Selecionar uma arquitetura de microrrede CC isolada e modelar matematicamente os dispositivos que a compõem, considerando a dinâmica dos conversores de potência e das cargas conectadas ao barramento CC;
- Projetar diferentes estratégias de controle por realimentação de estados — alocação de polos, controle LQR e controle baseado em LMI — aplicadas à topologia de microrrede CC isolada selecionada;
- Avaliar o desempenho dinâmico das estratégias de controle investigadas, visando manter os níveis de tensão e corrente dentro de limites seguros e desejados diante de perturbações operacionais;
- Analisar, de maneira qualitativa e quantitativa, o desempenho e a robustez das metodologias de controle investigadas na microrrede considerada, cujo modelo é descrito como uma família de sistemas dependentes de parâmetros associada às variações da tensão de alimentação e da carga.

1.2 Justificativa

Na Amazônia Legal brasileira, dados consolidados ao longo da última década indicam a existência de aproximadamente 211 localidades isoladas que não se encontram conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), dependendo exclusivamente de sistemas locais de geração de energia [15]. De acordo com levantamentos atualizados até 2022–2023, cerca de 175 dessas localidades permanecem completamente isoladas, uma vez que parte delas foi interligada ao SIN ou reclassificada em anos recentes. Essas comunidades abrangem aproximadamente 3 milhões de pessoas, que historicamente dependem de sistemas de geração local, majoritariamente baseados em grupos geradores a diesel. Com o avanço de políticas públicas voltadas à universalização do acesso à energia, programas como o Luz para Todos e suas atualizações mais recentes, especialmente no período entre 2018 e 2023, possibilitaram que mais de 150 mil consumidores em regiões remotas da Amazônia Legal passassem a ser atendidos por sistemas de geração solar fotovoltaica [16], incluindo soluções baseadas em microrredes.

Diante desse cenário, o emprego de microrredes em corrente contínua surge como uma alternativa estratégica para o suprimento energético em localidades remotas, exigindo soluções que assegurem operação estável e desempenho confiável. Nesse contexto, o projeto e a sintonia adequada dos conversores de potência tornam-se aspectos centrais para garantir o funcionamento seguro do sistema frente a variações de carga e condições operacionais. Diferentes abordagens de controle, como a alocação de polos, o controle ótimo LQR e métodos baseados em LMI, destacam-se por sua eficiência, simplicidade de implementação e robustez. Assim, este trabalho propõe a avaliação experimental dessas estratégias de controle aplicadas a uma microrrede CC isolada, visando contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e confiáveis para sistemas energéticos em regiões isoladas.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado conforme descrito a seguir:

- **Capítulo 1 – Introdução**

Apresenta a contextualização do tema, a justificativa da pesquisa, os objetivos gerais e específicos do trabalho, bem como a delimitação do escopo do estudo.

- **Capítulo 2 – Fundamentação Teórica e Modelagem**

Apresenta os conceitos fundamentais relacionados às microrredes de corrente contínua, incluindo a caracterização dos principais componentes, como sistemas fotovoltaicos, dispositivos de armazenamento de energia e conversores de potência. São discutidos os modelos matemáticos e lineares aproximados dos conversores, bem como estratégias de controle clássicas, com ênfase nos métodos de alocação de polos e no controle ótimo LQR.

- **Capítulo 3 – Metodologia de Projeto de Controle Robusto**

Descreve a metodologia adotada para o projeto dos controladores, abordando a formulação do modelo no espaço de estados, a caracterização da microrrede como uma família de sistemas dependentes de parâmetros, e o desenvolvimento das técnicas de controle por realimentação de estados, com destaque para o projeto baseado em inequações matriciais lineares (LMIs) e regiões de

estabilidade do tipo D.

- **Capítulo 4 – Análise de Desempenho e Resultados**

Apresenta a arquitetura da microrrede CC considerada, a implementação dos controladores projetados e a análise comparativa do desempenho dinâmico das estratégias de controle investigadas. São avaliados diferentes cenários operacionais, incluindo variações da tensão de entrada e da carga, por meio de índices de desempenho integral e análise de estabilidade, evidenciando a robustez das técnicas analisadas.

- **Capítulo 5 – Conclusões**

Apresenta as conclusões do estudo, discutindo os principais resultados obtidos, as contribuições do trabalho e as limitações observadas, além de indicar direções para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Introdução

O setor elétrico vem enfrentando profundas transformações diante de desafios contemporâneos relacionados à segurança energética, sustentabilidade ambiental e evolução tecnológica. A crescente demanda por fontes renováveis, a necessidade de redução das emissões de carbono e as limitações da infraestrutura de geração centralizada tradicional têm pressionado o sistema elétrico a se adaptar. Nesse contexto, surgem novas abordagens para garantir um fornecimento de energia mais eficiente, resiliente e ambientalmente responsável. Entre essas abordagens, destaca-se a geração distribuída, que permite a produção de energia próxima ao ponto de consumo, reduzindo perdas em transmissão, aliviando o carregamento das redes principais e promovendo maior autonomia energética para consumidores e comunidades [17].

As microrredes ganham destaque como uma resposta estratégica a essas necessidades, consolidando-se como uma alternativa promissora para enfrentar os desafios emergentes do setor. Seu desenvolvimento tem sido impulsionado por fatores como a diversificação das fontes de energia, a expansão de tecnologias de armazenamento, o avanço da eletrônica de potência e o aumento da participação de consumidores ativos. Além disso, sua capacidade de operar de forma autônoma, responder rapidamente a variações na demanda e integrar diferentes fontes energéticas, torna-as fundamentais para aumentar a flexibilidade e a confiabilidade do sistema elétrico moderno. Assim, as microrredes vêm ocupando um papel central na transição energética global, sendo estudadas, testadas e implementadas em diferentes escalas como

parte de uma rede mais inteligente, descentralizada e sustentável [17].

2.2 Definição de Microrrede

As microrredes elétricas podem ser compreendidas como pequenos sistemas de distribuição que integram diversas fontes de geração distribuída, cargas controláveis e sistemas de armazenamento de energia, todos interligados por redes de média ou baixa tensão. Seu conceito surgiu como resposta à crescente demanda por soluções energéticas mais flexíveis, resilientes e sustentáveis, possibilitando a integração eficaz de fontes renováveis, como solar e eólica, às redes elétricas tradicionais [18].

Projetadas para operar tanto de forma interligada à rede principal quanto de maneira autônoma (modo ilhado), as microrredes se destacam pela capacidade de manter o fornecimento local de energia mesmo diante de falhas na rede principal. Além disso, sua arquitetura permite maior controle sobre a geração e o consumo de energia, promovendo estabilidade operacional, gerenciamento inteligente e resposta eficiente a distúrbios. Dessa forma, as microrredes representam uma alternativa estratégica e promissora para o futuro dos sistemas elétricos, especialmente em cenários com alta penetração de recursos energéticos distribuídos [18].

2.3 Microrredes de Corrente Contínua

As Microrredes de Corrente Contínua (MRCC) são sistemas de distribuição de energia de baixa potência que integram Sistemas de Geração Distribuída (SGD), preferencialmente oriundos de fontes renováveis, como solar e eólica, e, frequentemente, incluem também Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE). Diferente das redes tradicionais em corrente alternada (AC), as MRCC utilizam conversores eletrônicos de potência, como os *choppers* (conversores CC-CC), para gerenciar e otimizar o fluxo energético. Essas redes têm se mostrado altamente eficientes em aplicações específicas, como telecomunicações, centros de dados e estações de recarga rápida para veículos elétricos, permitindo maior eficiência energética e redução de perdas [19].

Embora a corrente alternada ainda predomine nos sistemas elétricos convencionais e não haja intenção de substituí-la completamente, a corrente contínua tem

ganhado espaço como solução complementar mais eficiente e confiável para cenários específicos. O sistema de distribuição em CC permite integrar diretamente fontes de energia distribuída, como painéis fotovoltaicos e baterias, a um barramento comum, eliminando perdas de conversão que podem atingir até 10% da energia gerada [20]. Além disso, o uso de fontes renováveis e dispositivos de armazenamento se alinha melhor às características dos sistemas em CC, aumentando a confiabilidade e a qualidade da energia entregue. Nesse contexto, as MRCC se apresentam como uma alternativa promissora, não para substituir a rede CA, mas para coexistir com ela e contribuir para um sistema energético mais eficiente e sustentável.

2.4 Topologias de Microrredes CC

A definição de uma topologia adequada para uma microrrede de corrente contínua é um fator decisivo, pois influencia diretamente características essenciais do sistema elétrico, como a flexibilidade de operação, os custos de implementação, a confiabilidade do fornecimento, a capacidade de controle, a robustez frente a falhas, a resiliência diante de distúrbios e a possibilidade de expansão futura. Além disso, a escolha do nível de tensão adotado desempenha um papel relevante no momento do projeto da estrutura da microrrede. As diferentes arquiteturas de microrredes CC existentes podem ser agrupadas em seis categorias distintas.

2.4.1 Estrutura Radial Aplicada em Microrredes CC

A topologia radial em microrredes de corrente contínua, apresentada na Figura 2.1, também conhecida como estrutura de barramento único ou de alimentador, caracteriza-se pela presença de um único barramento CC e um único ponto de conexão para geração, armazenamento e fornecimento de energia às cargas. Nesse arranjo, o fornecimento de energia depende do funcionamento contínuo das interfaces do sistema, embora a presença de fontes e dispositivos de armazenamento adicionais possa evitar a interrupção total em caso de falha de uma interface. O barramento pode ser unipolar ou bipolar, conforme os requisitos da aplicação. Essa topologia é comum em instalações residenciais, onde a maioria dos equipamentos opera em baixa tensão, o que reduz a necessidade de múltiplos estágios de conversão. Além

disso, a proximidade entre cargas e conversores de CA contribui para a diminuição das perdas na distribuição de energia.

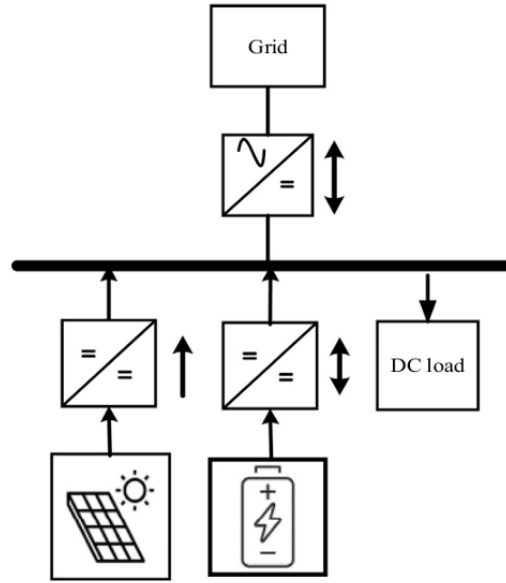


Figura 2.1: Topologia radial

Fonte: Adaptado de [21].

2.4.2 Topologia com Barramentos Múltiplos

A topologia de barramentos múltiplos, ilustrada na Figura 2.2, é uma versão ampliada da configuração radial, oferecendo maior confiabilidade, eficiência e densidade energética, geralmente com custos reduzidos de instalação e operação. Essa configuração se destaca pelo uso de recursos redundantes, sendo comum em sistemas críticos como navios de guerra. A energia pode ser transferida entre clusters vizinhos de microrredes para equilibrar déficits ou excessos energéticos. Além disso, barramentos com falhas podem ser automaticamente isolados, garantindo maior robustez ao sistema. O controle da troca de energia entre os barramentos CC múltiplos é realizado por meio de ajustes adequados na tensão [22].

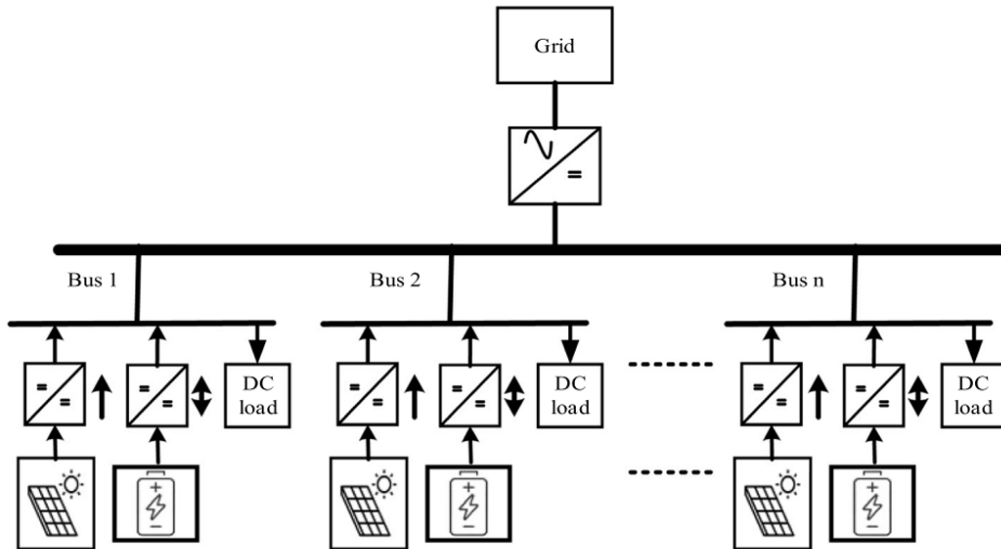


Figura 2.2: Topologia de barramento múltiplo

Fonte: Adaptado de [21].

2.4.3 Topologia Multiterminal

A topologia multiterminal foi inicialmente desenvolvida para aplicações em sistemas de corrente contínua (CC) em alta tensão, como na geração eólica offshore, e tem sido aplicada em microrredes CC devido à sua flexibilidade e capacidade de integração de múltiplas fontes. Como mostrado na Figura 2.3, a estrutura consiste em diversos terminais de entrada que alimentam o barramento CC, interligados por conversores CA-CC que conectam várias interfaces CA à rede contínua. O fluxo de energia nesta configuração é mais complexo que em sistemas radiais convencionais, devido à existência de múltiplos caminhos de transmissão, o que, por outro lado, permite maior flexibilidade na operação e no compartilhamento de potência entre os terminais. O sistema busca equilibrar a distribuição de energia, reduzindo desvios de tensão e frequência, utilizando conversores fonte de tensão para compensar automaticamente desequilíbrios, especialmente quando há insuficiência de energia disponível. No entanto, um dos principais desafios dessa topologia é a proteção do sistema, que se torna mais crítica com a integração de diversas fontes, exigindo soluções mais robustas de controle e proteção [23].

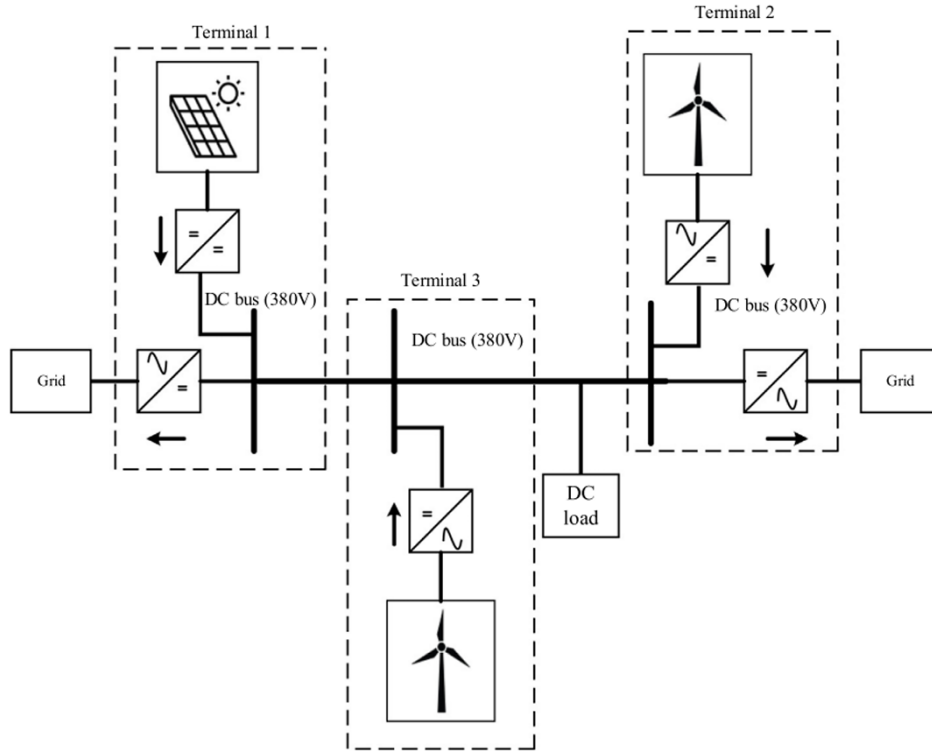


Figura 2.3: Topologia multiterminal.

Fonte: Adaptado de [21].

2.4.4 Topologia de Microrrede CC de Barramento em Anel

Para superar as limitações da topologia radial no que diz respeito à flexibilidade e à capacidade de gerenciamento de falhas, pode-se adotar uma arquitetura em anel para a distribuição em microrredes CC. A estrutura geral dessa topologia é ilustrada na Figura 2.4. Nessa configuração, as unidades de geração, armazenamento e carga são interligadas em um único anel, no qual interruptores de proteção são posicionados antes e depois de cada barramento, garantindo maior segurança operacional. Isso permite que cada unidade possua duas possíveis rotas de conexão com o sistema, uma à esquerda e outra à direita do barramento. Controladores dedicados, como os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), são utilizados para monitorar e controlar cada barramento e suas interações com os barramentos vizinhos. Em caso de falha, o IED detecta o problema, isola automaticamente o trecho defeituoso e reconfigura o sistema para manter o fornecimento de energia às demais cargas. Essa topologia é amplamente empregada em ambientes urbanos e industriais, destacando-se por sua maior confiabilidade em relação à estrutura radial. A principal vantagem

está na flexibilidade do sistema, que assegura resiliência, redundância e continuidade da operação mesmo diante de falhas locais [24].

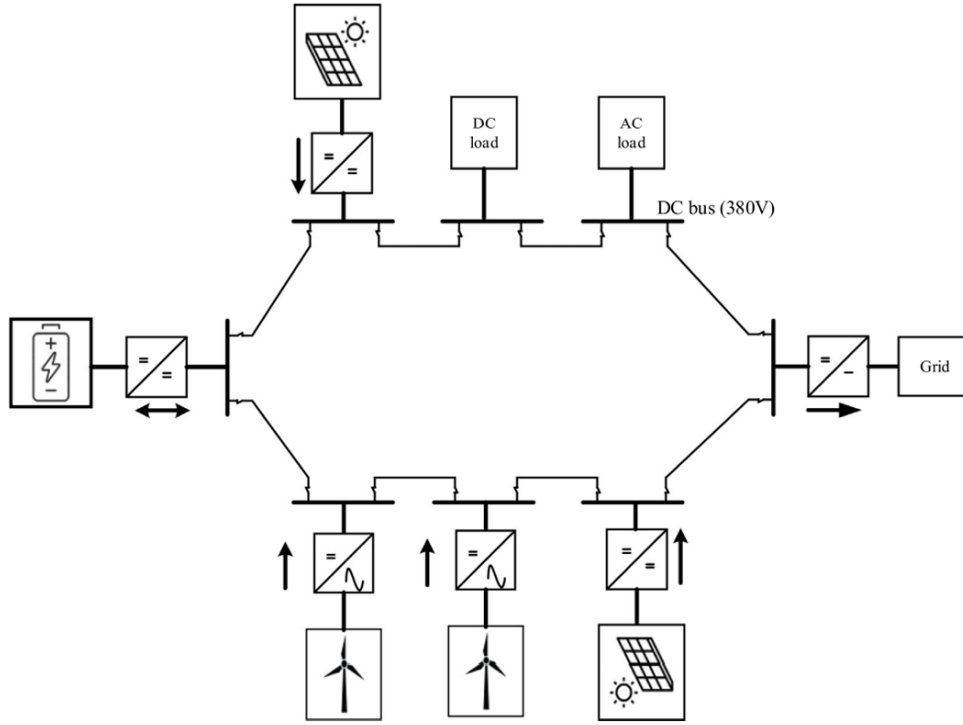


Figura 2.4: Topologia de microrrede CC de barramento em anel.

Fonte: Adaptado de [21].

2.4.5 Topologia de Escada

A topologia de escada é estruturada de forma semelhante a um anel, no qual estão conectadas fontes de energia distribuída, unidades de armazenamento e cargas. Dois barramentos principais se ligam ao anel central da escada, como ilustrado na Figura 2.5, permitindo que qualquer um deles forneça energia contínua aos demais segmentos da rede. Essa configuração contribui significativamente para a melhoria da estabilidade do sistema. Dentre as diversas topologias existentes, a de escada apresenta o maior nível de redundância, tornando-a eficaz na eliminação de falhas por circuito aberto e falhas de ponto único, além de garantir alta disponibilidade. Além disso, essa estrutura facilita o gerenciamento de falhas, pois, em caso de defeito, o segmento afetado pode ser isolado por meio de chaves de proteção, mantendo o restante da rede em operação normal [25].

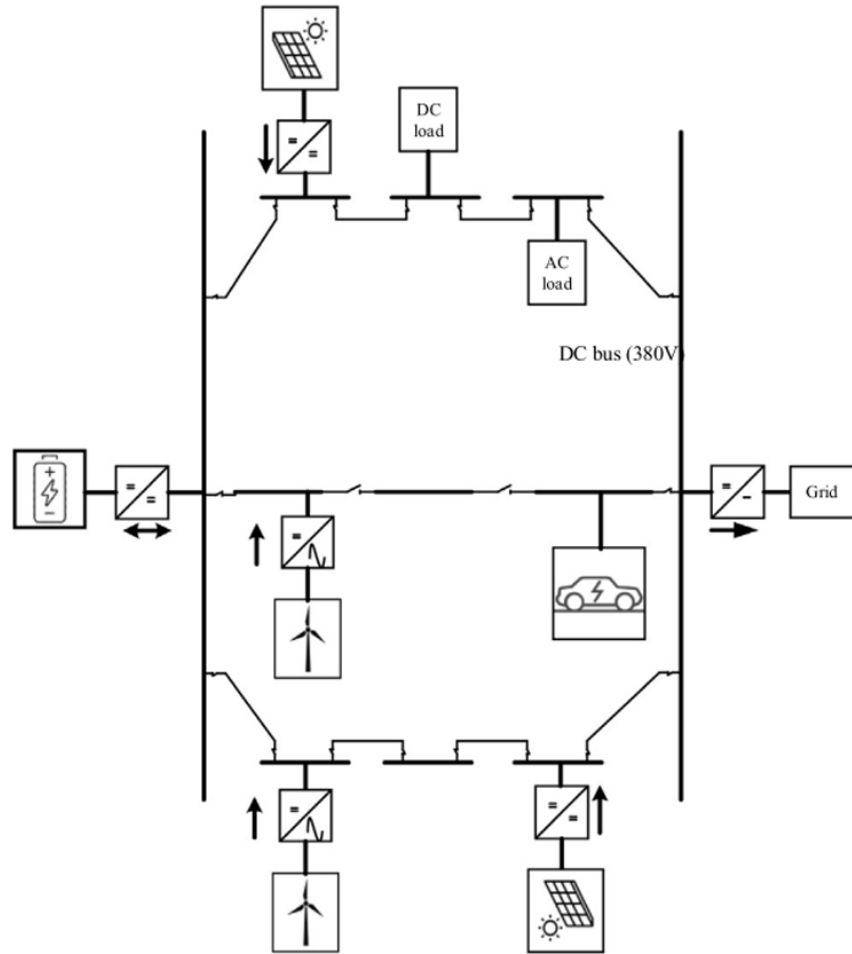


Figura 2.5: Topologia de escada

Fonte: Adaptado de [21].

2.4.6 Topologia Zonal

Na topologia zonal, o sistema de microrrede é segmentado em zonas independentes, cada uma com seu próprio centro de carga e proteção. Essa organização visa aumentar a confiabilidade da rede, conforme ilustrado na Figura 2.6. Em cada zona estão integrados elementos como unidades de geração, armazenamento de energia, conversores eletrônicos de potência e dispositivos de manobra, todos voltados ao fornecimento eficiente de energia às cargas locais. Cada zona é atendida por dois barramentos CC redundantes, que podem ser alimentados tanto por fontes distribuídas (CC e CA) quanto pela rede elétrica principal. Essa estrutura possibilita diferentes formas de suprimento energético, seja simultaneamente por múltiplos barramentos, de forma alternada ou por apenas um deles. Apesar das vantagens em termos de

flexibilidade e segurança, o fornecimento simultâneo por vários barramentos impõe desafios adicionais ao projeto e operação do sistema de distribuição [26].

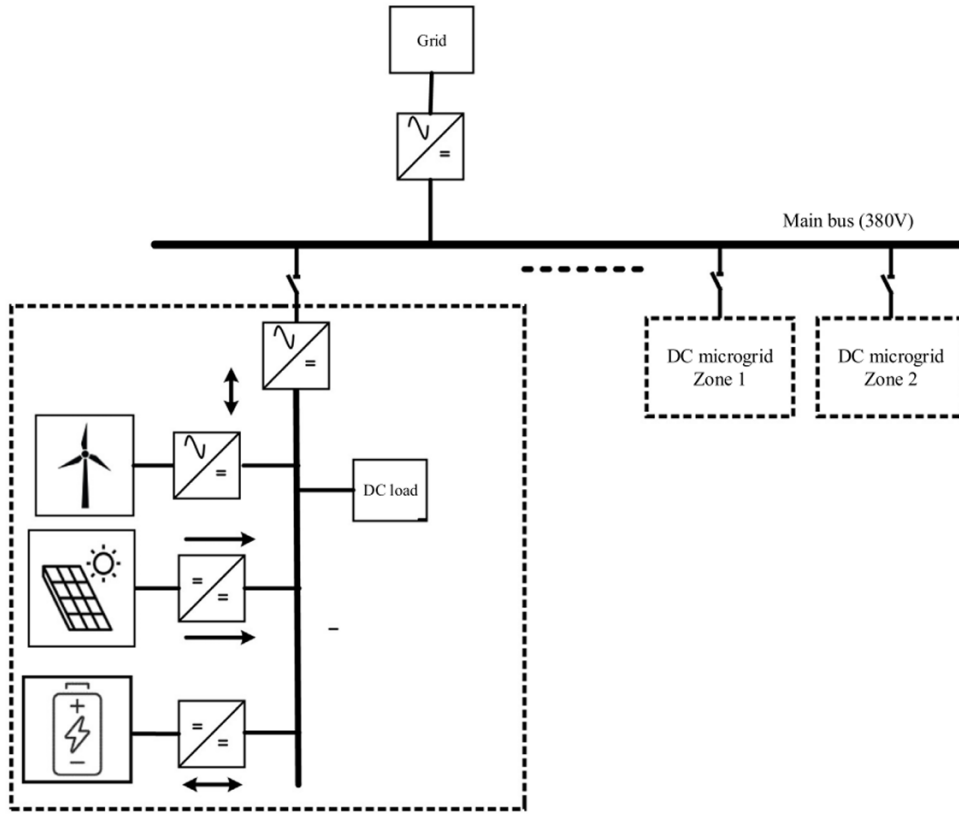


Figura 2.6: Topologia zonal

Fonte: Adaptado de [21].

2.5 Componentes de uma Microrrede CC

Uma microrrede de corrente contínua é composta por diversos elementos que garantem seu funcionamento eficiente e confiável. Os principais geradores de energia são os painéis solares fotovoltaicos, que fornecem energia renovável e distribuída. Para lidar com a variabilidade da geração e do consumo, utilizam-se sistemas de armazenamento, sendo as baterias amplamente empregadas por sua capacidade de resposta rápida e de acumulação de energia [27].

Além disso, os conversores de potência — CC-CC e CA-CC — são fundamentais para regular os níveis de tensão, garantir a compatibilidade entre diferentes dispositivos e integrar diversas fontes e cargas. As cargas conectadas podem incluir aplicações residenciais, comerciais, industriais ou de telecomunicações, todas

dependentes do suprimento de energia fornecido pela microrrede [27].

2.5.1 Sistema Solar Fotovoltaico

A energia solar fotovoltaica vem se consolidando como uma das principais soluções energéticas para sistemas isolados, especialmente por suas características de sustentabilidade, facilidade de expansão e alta incidência solar em regiões tropicais, como a Amazônia. Esse tipo de sistema converte diretamente a radiação solar em eletricidade (ver Figura 2.7) por meio do efeito fotovoltaico, um processo físico no qual materiais semicondutores, como o silício, geram corrente elétrica ao serem expostos à luz solar. Um sistema fotovoltaico é normalmente composto por módulos solares, controladores de carga, inversores (quando necessário) e baterias para o armazenamento de energia, garantindo o fornecimento mesmo em períodos sem sol [28].

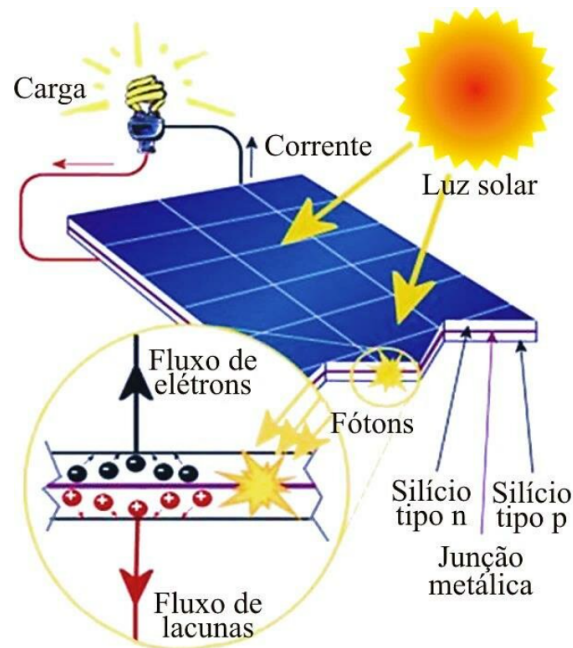


Figura 2.7: Diagrama de um painel solar fotovoltaico

Fonte: Adaptado de [29].

2.5.1.1 Modelo Matemático do Sistema Fotovoltaico

O modelo elétrico de uma célula fotovoltaica é ilustrado na Figura 2.8, e sua equação correspondente é apresentada na Equação (2.1), segundo [30].

A equação de uma célula fotovoltaica é expressa como:

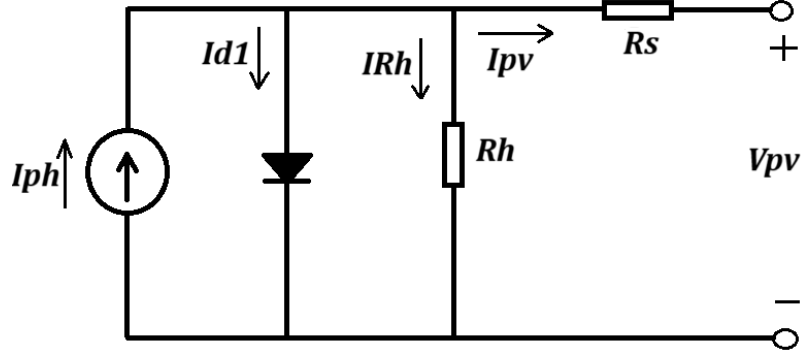


Figura 2.8: Esquemático elétrico de uma célula fotovoltaica

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{\eta V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_h}, \quad (2.1)$$

onde, I_{pv} : Corrente de saída do painel fotovoltaico [A]; V_{pv} : Tensão nos terminais do painel fotovoltaico [V]; I_{ph} : Corrente gerada pela incidência da luz (corrente de fotogeracao) [A]; I_{d1} : Corrente de saturação do diodo [A]; R_s : Resistência série do painel (representa as perdas internas por condução) [Ω]; R_h : Resistência paralela do painel (modela as perdas por fuga) [Ω]; η : Fator de idealidade do diodo (adimensional); V_t : Tensão térmica, dada por $V_t = \frac{kT}{q}$ [V]; k : Constante de Boltzmann ($1,380649 \times 10^{-23}$ J/K); T : Temperatura absoluta da célula [K]; q : Carga elementar do elétron ($1,602176634 \times 10^{-19}$ C).

2.5.2 Modelo Matemático dos Conversores de Potência

2.5.2.1 Conversor Buck

O conversor Buck, representado na Figura 2.9, é responsável por reduzir a tensão de entrada (V_i) para um nível inferior na saída (V_o).

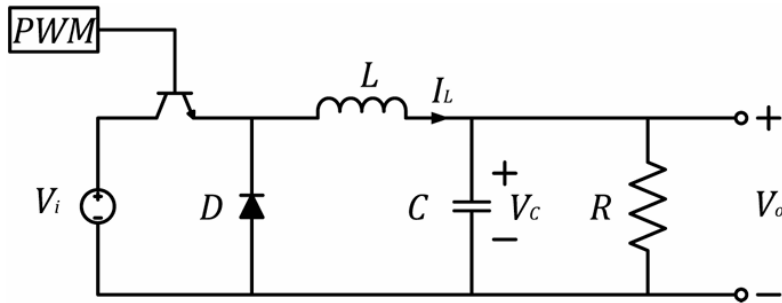


Figura 2.9: Esquemático elétrico do conversor Buck.

A modelagem dinâmica do conversor buck é baseada na representação por

espaço de estado médio [9]. O modelo de espaço de estado médio é dado pelas Equações (2.2) e (2.3):

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in}, \quad (2.2)$$

onde, i_L é a corrente na indutância L ; v_C é a tensão no capacitor C ; $\frac{di_L}{dt}$ é a taxa de variação da corrente no indutor; $\frac{dv_C}{dt}$ é a taxa de variação da tensão no capacitor; L é a indutância; R é a resistência; C é a capacitância; V_{in} é a tensão de entrada; d é o ciclo de trabalho (*duty cycle*). A saída é dada pela Equação (2.3):

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + 0 \cdot V_{in} \quad (2.3)$$

Considere um conversor do tipo *buck* operando em modo de condução contínua (CCM). O ganho estático do conversor é definido como a razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada, sendo expresso por

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (2.4)$$

Para o conversor *buck* ideal em CCM, o ganho estático coincide com a razão cíclica do sinal de comutação, de modo que

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = d \quad (2.5)$$

Sabendo que a tensão de saída do conversor é igual à tensão do barramento CC, isto é, $V_o = V_c$, a razão cíclica necessária para a regulação da tensão pode ser escrita como

$$d = \frac{V_c}{V_{in}} \quad (2.6)$$

Entretanto, essa equivalência é válida apenas para o modelo ideal operando em modo de condução contínua. Em situações reais, a presença de perdas nos dispositivos semicondutores, resistências parasitas no indutor e no capacitor, bem como a operação em modo de condução descontínua (DCM), fazem com que o ganho

estático passe a depender de outros parâmetros do circuito, tais como a carga, a indutância e a frequência de comutação. Nessas condições, a relação $\frac{V_o}{V_{in}} = d$ deixa de ser válida, e o ganho estático não coincide mais com a razão cíclica.

O dimensionamento dos elementos passivos do conversor *buck* é realizado de modo a garantir uma operação eficiente e estável do conversor, com ondulações de corrente e tensão mantidas dentro dos limites especificados [31].

- Indutor (L):

O valor do indutor é determinado com base na ondulação de corrente permitida na carga. A equação para o cálculo do indutor é dada por:

$$L = \frac{(V_{in} - V_o) \cdot d}{f_s \cdot \Delta I_L}, \quad (2.7)$$

onde, V_{in} é a tensão de entrada do conversor; V_o é a tensão de saída; d é a razão cíclica (*duty cycle*); f_s é a frequência de comutação; ΔI_L é a ondulação de corrente no indutor.

- Capacitor de saída (C):

O valor do capacitor é dimensionado para limitar a ondulação da tensão de saída dentro de um valor especificado. A equação de dimensionamento é dado pela seguinte relação:

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot \Delta V_c} \quad (2.8)$$

onde, ΔI_L é a ondulação de corrente no indutor; f_s é a frequência de comutação; ΔV_c é a ondulação permitida na tensão de saída.

- Razão cíclica (d):

A razão cíclica do conversor *buck*, em regime permanente, é dada por meio da seguinte relação:

$$d = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (2.9)$$

- Corrente de saída (I_o):

A corrente de saída pode ser obtida a partir da potência de saída, conforme apresenta a equação abaixo:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (2.10)$$

- Resistência de carga (R_o):

A resistência equivalente da carga é obtida por meio da seguinte relação:

$$R_o = \frac{V_o}{I_o} \quad (2.11)$$

Essas expressões permitem o correto dimensionamento dos elementos do conversor *buck*, garantindo a sua adequada operação, bem como ondulações dentro dos limites desejados.

2.5.2.2 Conversor *Boost*

O esquemático elétrico do conversor *Boost* é apresentado na Figura 2.10. Este conversor tem como função realizar a elevação do nível da tensão de entrada V_{in} para um nível maior na saída do conversor V_{out} .

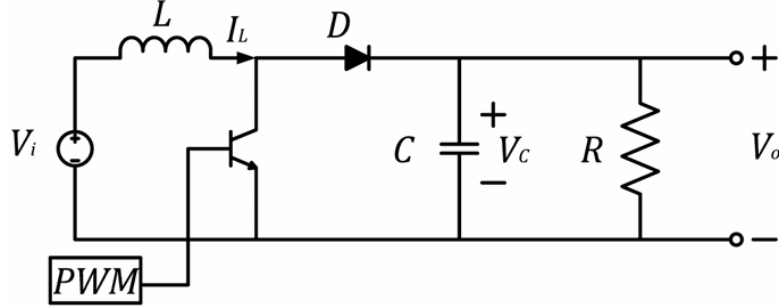


Figura 2.10: Esquemático elétrico do conversor *boost*.

O procedimento para a modelagem matemática do conversor *boost* ocorre de forma semelhante ao do conversor *buck*, sendo o modelo por espaço de estados médio dado pelas Equações (2.12) e (2.13). Para maiores detalhes sobre a modelagem dos conversores *buck* e *boost*, vide [9].

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-d}{L} \\ \frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \quad (2.12)$$

onde, a descrição dos parâmetros é a mesma que no conversor *buck*. A saída é dada pela seguinte Equação (2.13):

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + 0 \cdot V_{in} \quad (2.13)$$

Considere um conversor do tipo *boost* operando em modo de condução contínua (CCM). O ganho estático do conversor é definido como a razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada, sendo dado por

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (2.14)$$

Para o conversor *boost* ideal em CCM, o ganho estático é função da razão cíclica do sinal de comutação, sendo expresso por

$$G = \frac{1}{1 - d} \quad (2.15)$$

Isolando a razão cíclica, obtém-se

$$d = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} \quad (2.16)$$

Sabendo que a tensão de saída do conversor é igual à tensão do barramento CC, isto é, $V_o = V_c$, a razão cíclica necessária para a regulação da tensão pode ser escrita como

$$d = 1 - \frac{V_{in}}{V_c} \quad (2.17)$$

Ressalta-se que, diferentemente do conversor *buck*, o ganho estático do conversor *boost* não coincide com a razão cíclica, mesmo no caso ideal em CCM, uma vez que a relação entre V_o e V_{in} é não linear em função de d .

O dimensionamento dos elementos do conversor *boost* é conduzido de forma a assegurar o adequado funcionamento do sistema, atendendo aos critérios de estabilidade e eficiência, bem como à limitação das ondulações de corrente e de tensão aos valores admissíveis [32].

- Indutor (L):

O valor do indutor é determinado com base na ondulação de corrente permitida. A equação para o seu dimensionamento é dada pela seguinte relação:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_L} \quad (2.18)$$

onde, V_{in} é a tensão de entrada; D é a razão cíclica; f_s é a frequência de comutação; ΔI_L é a ondulação de corrente no indutor.

- Capacitor de saída (C):

O capacitor é dimensionado para limitar a ondulação de tensão de saída. A equação é dada pela seguinte relação:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_c} \quad (2.19)$$

onde, I_o é a corrente de saída; D é a razão cíclica; f_s é a frequência de comutação; ΔV_c é a ondulação permitida da tensão de saída.

- Razão cíclica (D):

A razão cíclica é obtida por meio da seguinte relação:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} \quad (2.20)$$

- Corrente de saída (I_o):

A corrente de saída é obtido por meio da seguinte relação:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (2.21)$$

- Resistência de carga (R_o):

A resistência de carga é obtido por meio da seguinte relação:

$$R_o = \frac{V_o}{I_o} \quad (2.22)$$

2.5.3 Modelo Linearizado dos Conversores de Potência

A linearização de conversores CC é realizado por meio da expansão do modelo matemático em série de Taylor, esta por sua vez é uma técnica amplamente utilizada para realizar a linearização de sistemas dinâmicos não lineares. Essa abordagem permite aproximar sistemas não lineares por modelos lineares em torno de pontos de operação, como ilustrado na Figura 2.11, possibilitando o uso de ferramentas de análise e projeto de controladores para sistemas lineares [33].

O procedimento envolve o cálculo das derivadas parciais (Jacobianas) das equações do sistema em função das variáveis de estado e das entradas, truncando a série nos termos de primeira ordem para obter um modelo linear aproximado. Em conversores CC-CC, a linearização por série de Taylor é especialmente empregada para a análise de pequenas oscilações (*small-signal analysis*), sendo uma ferramenta fundamental na modelagem e no projeto de sistemas de controle eficientes [33].

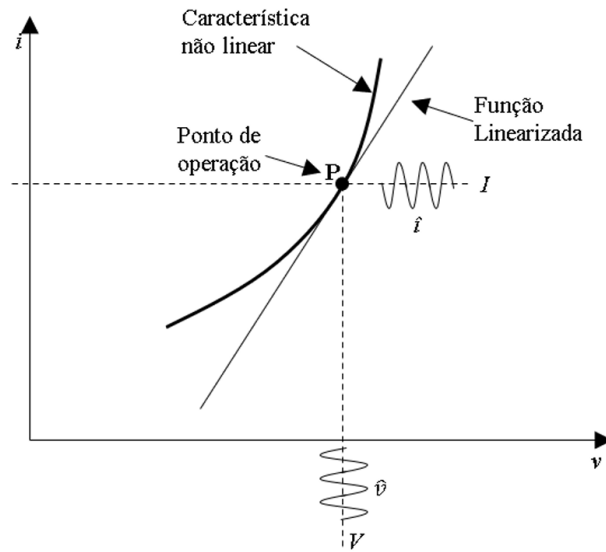


Figura 2.11: Linearização em torno de um ponto de operação.

Fonte: Adaptado de [21].

2.5.3.1 Modelo Linearizado do Conversor *Buck*

As Equações (2.8) e (2.9) representam o modelo linearizado do conversor Buck em torno de um ponto de operação de equilíbrio. Esse modelo descreve a dinâmica do sistema por meio de pequenas variações nas variáveis de estado — corrente do indutor (Δi_L) e tensão no capacitor (Δv_C) — em função da variação no ciclo de

trabalho do sinal de controle (Δd).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{in}^0}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta d \quad (2.23)$$

$$\Delta y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta v_C \end{bmatrix} + 0 \cdot \Delta d \quad (2.24)$$

2.5.3.2 Modelo Linearizado do conversor *Boost*

As Equações (2.10) e (2.11) representam o modelo linearizado do conversor *Boost*, obtido por meio da linearização em torno do ponto de operação de equilíbrio. Esse modelo descreve a dinâmica do sistema considerando pequenas variações na corrente do indutor (Δi_L) e na tensão do capacitor (Δv_C), em função da variação do ciclo de trabalho (Δd).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D^0)}{L} \\ \frac{(1-D^0)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_C^0}{L} \\ -\frac{i_L^0}{C} \end{bmatrix} \Delta d \quad (2.10)$$

$$\Delta y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_L \\ \Delta v_C \end{bmatrix} = \Delta v_C \quad (2.11)$$

2.5.4 Cargas Ativas e Passivas

Além das fontes, as microrredes incluem cargas ativas e passivas. Cargas passivas são os dispositivos tradicionais que consomem energia sem interagir diretamente com o controle do sistema. Já as cargas ativas podem influenciar a operação da rede, ajustando seu consumo de energia.

Um exemplo importante são os conversores eletrônicos, que podem se comportar como cargas ativas ao modular seu consumo e contribuir para a estabilidade e controle da microrrede [34].

2.5.5 Dispositivos de Armazenamento de Energia

O armazenamento é essencial para a confiabilidade das microrredes, equilibrando a geração variável e a demanda de energia. Baterias, supercapacitores e

outros dispositivos armazenam energia para suprir períodos de baixa geração ou picos de consumo [17].

Esses dispositivos podem estar conectados ao barramento CC ou AC e têm a função de:

- Equilibrar a demanda entre geração e carga;
- Armazenar energia durante baixa demanda para uso futuro;
- Suprir demandas inesperadas;
- Facilitar transições suaves entre operação isolada e conectada à rede;
- Atender picos diários de consumo.

2.6 Tipos de Controle Aplicados a Microrredes de Corrente Contínua

O controle de microrredes CC desempenha um papel essencial na manutenção da estabilidade, qualidade da energia e operação eficiente do sistema. A estrutura de controle geralmente é organizada em uma arquitetura hierárquica composta por três camadas principais: controle primário, secundário e terciário. Cada uma delas atua em diferentes escalas de tempo e objetivos operacionais, garantindo desde a regulação imediata da tensão e corrente até a otimização de fluxos de energia e estratégias econômicas de despacho [35].

No controle primário, o foco está na resposta rápida e local dos conversores, geralmente sem comunicação entre unidades. Essa camada garante a regulação básica da tensão de barramento e o balanceamento de potência em eventos dinâmicos. Já o controle secundário atua para restaurar os valores nominais de tensão e corrente, corrigindo desvios causados por variações de carga ou geração. Por fim, o controle terciário se concentra na operação econômica e no gerenciamento de energia da microrrede como um todo, podendo incluir estratégias de otimização e interação com redes externas [35].

Diferentes arquiteturas de controle podem ser implementadas com base na forma como as unidades da microrrede compartilham informações e se organizam

para tomada de decisões, as quais, na literatura, são frequentemente agrupadas em estruturas centralizadas, descentralizadas e distribuídas [36]:

- **Centralizado:** Um controlador mestre toma decisões com base em dados globais coletados de toda a microrrede. Essa abordagem oferece alta precisão no controle e boa coordenação entre as unidades, mas apresenta vulnerabilidade a falhas do nó central e limitações de comunicação, além de menor escalabilidade [35].
- **Descentralizado:** Cada unidade de controle opera de forma autônoma com base apenas em medições locais. Embora essa abordagem seja robusta, simples e menos dependente de infraestrutura de comunicação, pode levar a um desempenho inferior no compartilhamento de carga e na regulação global da microrrede [37].
- **Distribuído:** Controladores locais trocam informações com vizinhos próximos para tomar decisões cooperativas. Essa estratégia oferece um equilíbrio entre coordenação e robustez, sendo altamente escalável e resiliente. Tem se destacado como uma solução promissora em ambientes com comunicação limitada e configurações dinâmicas [38].

Com o aumento da complexidade das microrredes e a introdução de cargas não lineares e variáveis, novas técnicas de controle têm sido exploradas para melhorar o desempenho dinâmico e a robustez dos sistemas [39]. Entre elas, destacam-se:

- **Controle não linear**, que leva em conta as características dinâmicas reais dos conversores e permite melhor desempenho fora do ponto de operação.
- **Controle preditivo**, que utiliza modelos do sistema para prever seu comportamento futuro e aplicar ações de controle otimizadas em tempo real.
- **Controle por modos deslizantes (*sliding mode*)**, conhecido por sua robustez frente a incertezas e variações paramétricas, sendo especialmente útil em ambientes severamente perturbados.
- **Inteligência artificial**, incluindo técnicas como lógica fuzzy, redes neurais e algoritmos genéticos, aplicadas no controle adaptativo, diagnóstico de falhas e tomada de decisões em tempo real.

Essas técnicas avançadas têm contribuído significativamente para a melhoria da estabilidade, confiabilidade e eficiência das microrredes CC, especialmente em cenários com presença de geração renovável e cargas críticas.

2.7 Alocação de Polos

A metodologia de alocação de polos por realimentação de estados, bem como o método de Ackermann, constitui uma abordagem clássica e amplamente consolidada no projeto de sistemas de controle lineares. Uma descrição detalhada dos fundamentos teóricos, das condições de aplicabilidade e de exemplos práticos pode ser encontrada em [40].

Seja um sistema no espaço de estados representado por:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (2.25)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (2.26)$$

onde A , B , C e D são matrizes que descrevem a dinâmica do sistema.

O objetivo da técnica de alocação de polos é projetar uma matriz de ganho K tal que a realimentação de estados dada por:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (2.27)$$

posicione os polos do sistema em localizações desejadas no plano complexo, assegurando o comportamento dinâmico desejado, como estabilidade e tempo de resposta.

A matriz de ganho K pode ser calculada utilizando a fórmula de Ackermann:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \Phi^{-1} P(A), \quad (2.28)$$

onde:

- Φ é a matriz de controlabilidade do sistema, dada por:

$$\Phi = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix}$$

- $P(A)$ é o polinômio característico desejado avaliado na matriz A .

No projeto de controladores via alocação de polos, é comum estabelecer critérios de desempenho no domínio do tempo, como o tempo de acomodação (t_s) e o sobressinal máximo (M_p), e então associá-los aos polos desejados no plano s [41].

Sobressinal máximo (M_p) O sobressinal está relacionado ao fator de amortecimento ζ da seguinte forma:

$$M_p = e^{\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \times 100\% \quad (2.29)$$

A partir de um valor desejado de M_p , pode-se resolver numericamente para encontrar o valor correspondente de ζ .

Tempo de acomodação (t_s) Considerando o critério de 2% para o tempo de acomodação, tem-se:

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2.30)$$

onde:

- ζ é o fator de amortecimento,
- ω_n é a frequência natural do sistema.

Cálculo dos polos desejados Com ζ e ω_n conhecidos, os polos complexos conjugados desejados podem ser calculados como:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.31)$$

Esses polos podem então ser utilizados como referência para o projeto de controladores por alocação de polos, garantindo que o sistema resultante atenda aos critérios de desempenho especificados.

2.7.1 Alocação de Polos via Equação de Lyapunov

Além do método clássico de Ackermann para realimentação de estados, uma alternativa robusta e matemática para a alocação de polos desejados é por meio da

solução da equação de [42].

Este método consiste em selecionar previamente uma matriz F estável (ou seja, com autovalores desejados na região esquerda do plano s), os quais são definidos a partir dos polos desejados, previamente calculados com base nas condições de projeto, como tempo de acomodação e sobressinal. A seguir, transforma-se o sistema original em um novo sistema com a mesma estrutura dinâmica que F [42].

Etapas do Procedimento

Considere o sistema linear no espaço de estados:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (2.32)$$

e deseja-se realimentar o estado com:

$$u(t) = -Kx(t), \quad (2.33)$$

de forma que a matriz do sistema em malha fechada:

$$A_{\text{fechada}} = A - BK, \quad (2.34)$$

tenha os polos nas posições desejadas.

1. Escolhe-se uma matriz F com os autovalores desejados (por exemplo, $F = \text{diag}(-1, -2)$).
2. Seleciona-se uma matriz de ganho arbitrária K_{re} (geralmente aleatória).
3. Resolve-se a equação de Lyapunov para a matriz T :

$$AT + TF = -BK_{\text{re}}. \quad (2.35)$$

4. Obtém-se o ganho final como:

$$K = K_{\text{re}}T^{-1}. \quad (2.36)$$

2.8 Controle LQR

O LQR é uma técnica de controle ótimo que visa minimizar uma função de custo quadrática associada ao desempenho do sistema dinâmico. Ao contrário da alocação direta de polos, o método LQR determina automaticamente a posição dos polos realimentados com base na otimização de um critério de desempenho, fornecendo uma solução que equilibra o esforço de controle e o erro do sistema [43].

Considere um sistema linear no espaço de estados:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (2.37)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (2.38)$$

onde A , B , C e D são matrizes que descrevem a dinâmica do sistema.

O objetivo do controle LQR é determinar uma lei de controle do tipo:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (2.39)$$

que minimiza a seguinte função de custo quadrática:

$$J = \int_0^\infty (x(t)^\top Qx(t) + u(t)^\top Ru(t)) dt, \quad (2.40)$$

onde:

- $Q \geq 0$ é uma matriz simétrica semidefinida positiva que penaliza os estados,
- $R > 0$ é uma matriz simétrica definida positiva que penaliza o esforço de controle.

A matriz de ganho ótima K é obtida pela solução da Equação de Riccati algébrica:

$$A^\top P + PA - PBR^{-1}B^\top P + Q = 0, \quad (2.41)$$

onde P é a solução simétrica definida positiva da equação acima. Com isso, a matriz de ganho é dada por:

$$K = R^{-1}B^\top P. \quad (2.42)$$

2.8.1 Associação entre as Condições de Projeto e os Parâmetros do LQR

Diferentemente da alocação explícita de polos, o LQR não especifica diretamente as posições dos polos desejados. No entanto, a escolha das matrizes de ponderação Q e R influencia indiretamente essas posições, moldando a resposta dinâmica do sistema.

Penalização dos estados (matriz Q) Aumentar os elementos diagonais de Q penaliza mais fortemente os estados correspondentes, o que tende a acelerar a resposta do sistema (ou seja, polos mais à esquerda no plano s).

Penalização do controle (matriz R) Aumentar o valor de R penaliza o esforço de controle, resultando em ações de controle mais suaves e polos mais próximos do eixo imaginário (resposta mais lenta).

Ajuste iterativo Na prática, o projeto LQR envolve um ajuste iterativo das matrizes Q e R , avaliando a resposta temporal do sistema (tempo de acomodação, sobressinal, etc.) para obter o desempenho desejado, ainda que sem especificar diretamente os polos.

Relação com desempenho no tempo Embora o LQR não permita impor diretamente o tempo de acomodação t_s e o overshoot M_p , é possível associar essas características às posições reais dos polos obtidos e, com isso, ajustar as matrizes de ponderação para alcançar a resposta desejada.

Capítulo 3

Metodologia de Projeto de Controle Robusto Considerando Incertezas Politópicas Via LMI

3.1 Introdução

Uma ampla gama de problemas em engenharia de controle pode ser formulada como um conjunto de LMIs. O uso dessas desigualdades remonta ao final do século XIX, quando Lyapunov propôs uma condição para a estabilidade de sistemas lineares baseada na existência de uma matriz simétrica e definida positiva P que satisfaça $A^T P + P A < 0$. No entanto, foi apenas a partir da década de 1990 que as LMIs passaram a ser amplamente utilizadas na área de controle automático [10].

Esse avanço se deve, em grande parte, ao desenvolvimento de métodos numéricos eficientes, como os métodos de ponto interior, e ao crescimento da capacidade computacional. Em 1995, o lançamento do *toolbox* de LMIs para o MATLAB, desenvolvido por Gahinet, consolidou o uso prático dessas técnicas. Desde então, diversas ferramentas computacionais foram desenvolvidas para a resolução de problemas baseados em LMIs, como o SeDuMi, SDPT3 e, mais recentemente, o YALMIP — uma interface de livre distribuição que permite integrar diferentes solucionadores [10].

O interesse pelas LMIs no contexto de sistemas de controle está relacionado à natureza convexa de suas condições. A convexidade garante que, ao se encontrar uma solução viável, é possível assegurar propriedades importantes como a estabilidade

do sistema ou a convergência de observadores. Além disso, a formulação em termos de LMIs permite tratar simultaneamente múltiplas desigualdades matriciais, o que é particularmente útil em situações com diversas restrições estruturais ou incertezas no modelo [10].

Neste capítulo, será apresentada uma metodologia de projeto de controle robusto baseada em LMIs, considerando incertezas politópicas. A abordagem proposta será aplicada ao sistema estudado neste trabalho e comparada com outras metodologias de controle, destacando suas vantagens no contexto de sistemas sujeitos a variações paramétricas.

3.2 Estabilização de Sistemas Lineares Contínuos por Realimentação de Estados via LMI

O problema de estabilização por realimentação de estados para sistemas lineares contínuos pode ser formulado a partir do sistema da forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.1)$$

onde $x \in \mathbb{R}^n$ representa o vetor de estados, $u \in \mathbb{R}^m$ a entrada de controle, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ são matrizes constantes do sistema.

O objetivo é determinar uma lei de controle do tipo:

$$u = Kx \quad (3.2)$$

tal que o sistema em malha fechada:

$$\dot{x} = (A + BK)x \quad (3.3)$$

seja assintoticamente estável.

Segundo o critério de estabilidade de Lyapunov [10], essa estabilidade é garantida se, e somente se, existe uma matriz simétrica definida positiva $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ tal que:

$$(A + BK)P + P(A + BK)^T < 0 \quad (3.4)$$

Essa inequação pode ser transformada em uma condição convexa por meio de uma mudança de variáveis. Definindo $W = KP$, o problema de projeto de controle se reduz a encontrar as matrizes $P = P^T > 0$ e W que satisfaçam:

$$AP + PA^T + BW + W^T B^T < 0 \quad (3.5)$$

Uma vez resolvida a LMI (3.5), o ganho de realimentação de estados é obtido por:

$$K = WP^{-1} \quad (3.6)$$

É importante observar que, no contexto do projeto por LMIs, a lei de controle adotada é $u = Kx$, e não $u = -Kx$ como comumente se encontra na literatura clássica de controle. Isso ocorre porque, durante a formulação e resolução das LMIs, a própria ferramenta de otimização define o sinal apropriado para K , de modo que a realimentação estabilize o sistema. Portanto, não é necessário forçar o sinal negativo na aplicação da lei de controle.

3.3 Regiões LMI

Em muitas situações, pode-se desejar restringir o conjunto de soluções admissíveis no projeto por realimentação de estados. A abordagem baseada em desigualdades lineares matriciais (LMIs), entretanto, oferece maior flexibilidade, ao permitir que diferentes soluções viáveis sejam exploradas a partir de graus de liberdade introduzidos na formulação.

Para direcionar o comportamento dinâmico do sistema, é possível definir *regiões de solução* no plano complexo, dentro das quais os autovalores em malha fechada devem ser alocados. Essa estratégia consiste em adicionar restrições às LMIs para garantir que os polos permaneçam em regiões que atendam critérios como margem de amortecimento, frequência natural ou tempo de acomodação desejado.

3.3.1 Região Delimitada por Faixas

Uma das regiões mais utilizadas no projeto de controladores por LMIs é a delimitada por faixas verticais no plano complexo, Figura 3.1. Essa configuração permite impor restrições sobre a parte real dos autovalores do sistema em malha fechada, garantindo uma taxa mínima de decaimento exponencial.

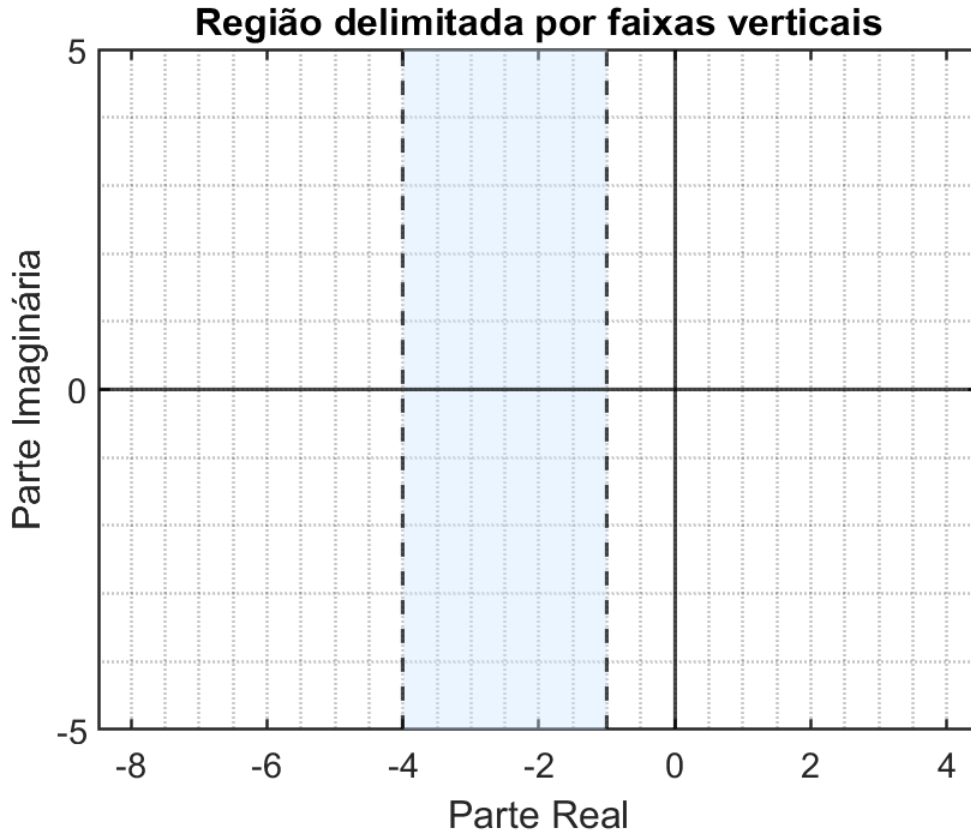


Figura 3.1: Região delimitada por faixas verticais.

Matematicamente, a região é definida por duas retas verticais $\text{Re}(s) = -\alpha$ e $\text{Re}(s) = -\beta$, com $\alpha > \beta > 0$, formando uma faixa onde se deseja que todos os polos do sistema permaneçam. A presença dessas faixas garante que o sistema tenha um amortecimento suficiente, assegurando desempenho dinâmico aceitável [10].

A existência de uma solução para esse problema está vinculada à viabilidade das seguintes desigualdades lineares matriciais:

$$AP + PA^T + BW + W^T B^T + 2\alpha P < 0 \quad (3.7)$$

$$-AP - PA^T - BW - W^T B^T - 2\beta P < 0 \quad (3.8)$$

com $P > 0$, $W = KP$ e, portanto, $K = WP^{-1}$. Essas LMIs asseguram que os autovalores do sistema em malha fechada estejam confinados dentro da faixa desejada no plano complexo.

3.3.2 Região Circular

A região circular representada na Figura 3.2, é caracterizada por um disco no plano complexo, definido por um centro $-q$ sobre o eixo real e raio $r > 0$. Essa região é utilizada quando se deseja limitar simultaneamente a parte real e o módulo dos autovalores em malha fechada, assegurando tanto amortecimento quanto frequência natural dentro de limites específicos.

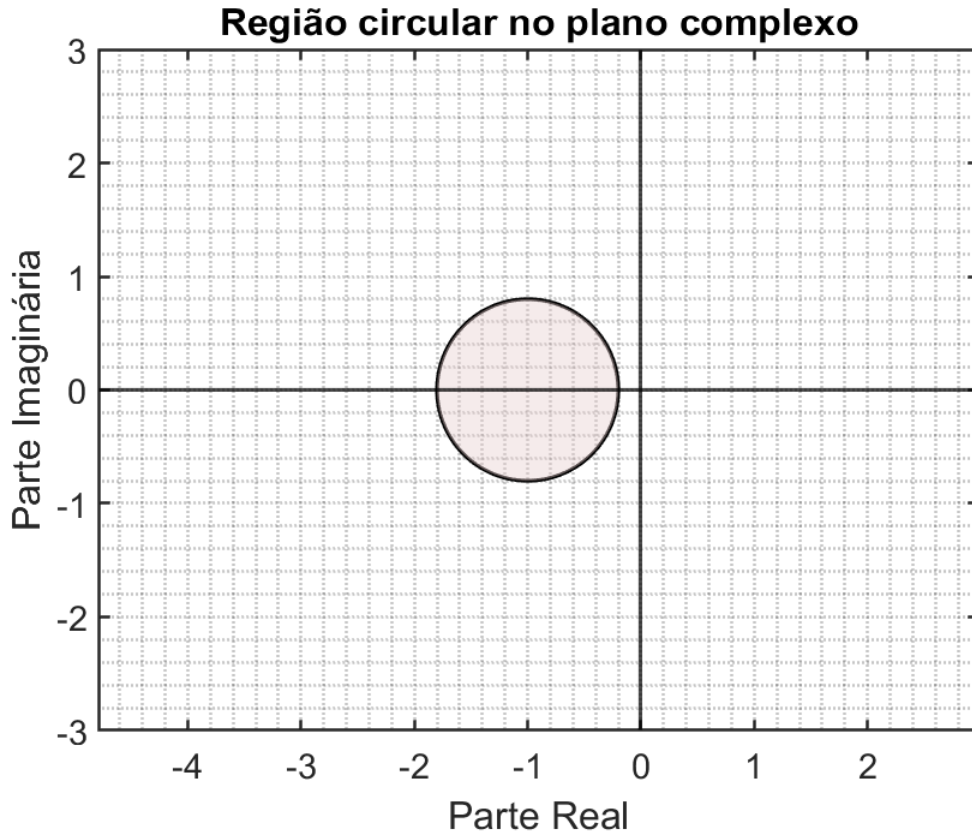


Figura 3.2: Região circular.

A existência de uma solução para esse problema está vinculada à viabilidade da seguinte desigualdade linear matricial [10]:

$$\begin{bmatrix} -rP & qP + AP + BW \\ qP + PA^T + W^T B^T & -rP \end{bmatrix} < 0 \quad (3.9)$$

com $P > 0$ e $W = KP$. A matriz de realimentação de estados pode ser recuperada por $K = WP^{-1}$. Essa LMI garante que todos os autovalores do sistema em malha fechada permaneçam dentro do círculo especificado.

3.3.3 Região Cônica

A região cônica representada na Figura 3.3, define um setor simétrico no plano complexo, delimitado por duas retas que formam um ângulo 2θ com o eixo real negativo. Essa região é útil quando se deseja impor uma margem mínima de amortecimento para os autovalores em malha fechada, ou seja, garantir que estes fiquem afastados do eixo imaginário por um determinado ângulo.

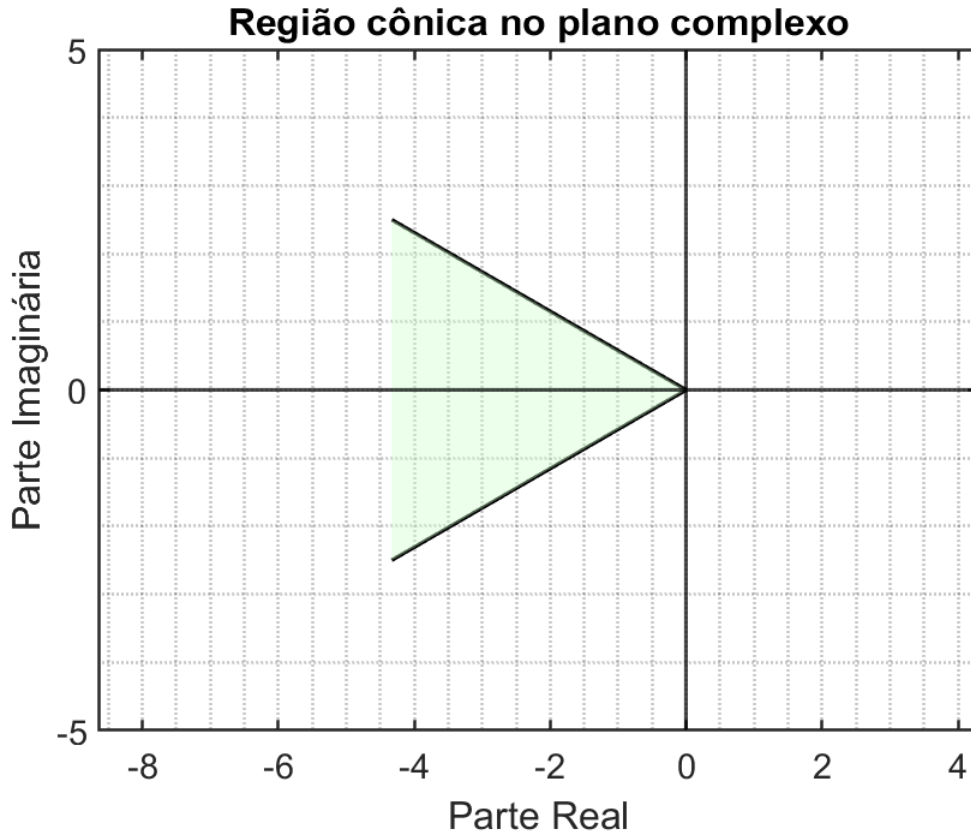


Figura 3.3: Região cônica .

A existência de uma solução está associada à viabilidade da seguinte desigualdade matricial [10]:

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta)(AP + BW + (AP + BW)^T) & \cos(\theta)(AP + BW - (AP + BW)^T) \\ \cos(\theta)((AP + BW)^T - AP - BW) & \sin(\theta)(AP + BW + (AP + BW)^T) \end{bmatrix} < 0 \quad (3.10)$$

com $P > 0$ e $W = KP$. Essa condição LMI garante que os autovalores do sistema em malha fechada estejam localizados dentro do setor desejado, assegurando um comportamento dinâmico com amortecimento mínimo pré-definido.

É importante destacar que as regiões apresentadas — faixa vertical, circular e cônica — podem ser combinadas em um único problema de LMI, Figura 3.4. Essa abordagem permite impor simultaneamente diferentes restrições sobre os autovalores do sistema, oferecendo maior flexibilidade no projeto de controladores com múltiplos critérios de desempenho [10].

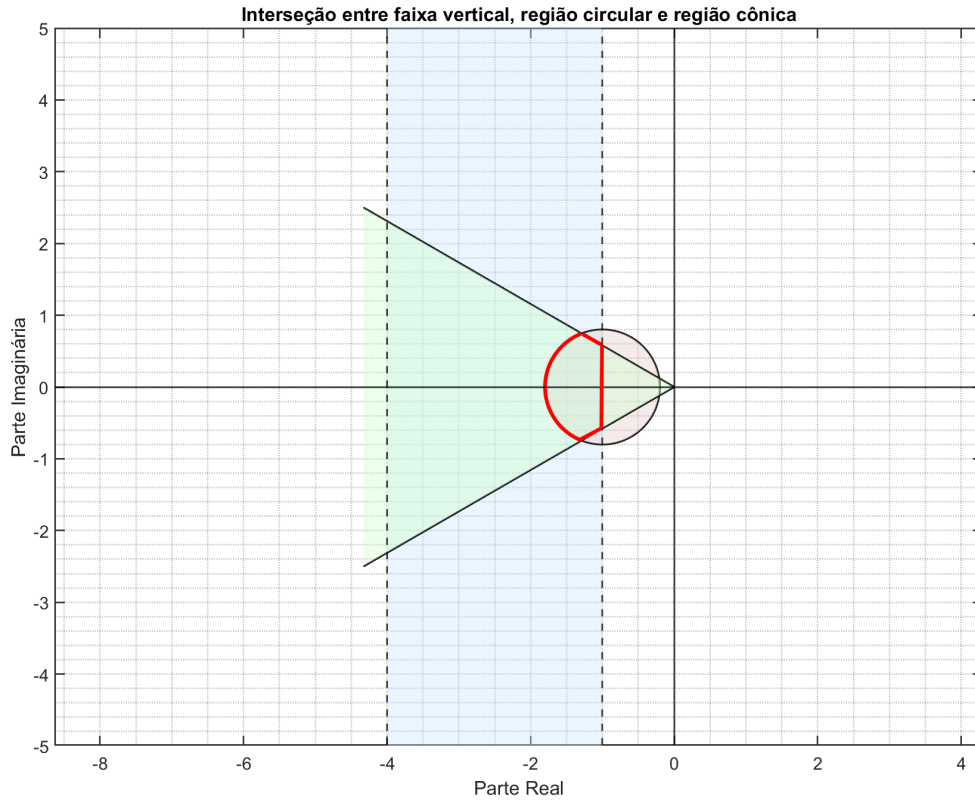


Figura 3.4: Regiões combinadas.

3.4 Estabilização Quadrática e Sistemas Politópicos

A estabilização quadrática surge no contexto do controle robusto, tendo como objetivo garantir a estabilidade de uma família de sistemas incertos. O conceito baseia-se na busca de uma única função de Lyapunov quadrática comum que assegure a estabilidade de todos os sistemas pertencentes a essa família, independentemente das variações paramétricas que possam ocorrer.

Considere o sistema dinâmico incerto dado por:

$$\rho x(t) = A(\delta(t))x(t) + B(\delta(t))u(t), \quad (3.11)$$

onde ρ representa o operador diferencial no caso contínuo, ou o operador de avanço no tempo no caso discreto. As matrizes $A(\delta(t))$ e $B(\delta(t))$ modelam as incertezas paramétricas no sistema, sendo escritas como:

$$A(\delta(t)) = A_0 + \sum_{i=1}^k \delta_i(t) A_i, \quad (3.12)$$

$$B(\delta(t)) = B_0 + \sum_{i=1}^k \delta_i(t) B_i, \quad (3.13)$$

em que A_0 e B_0 são as matrizes nominais, e os pares (A_i, B_i) definem as direções das perturbações conhecidas. Os parâmetros $\delta_i(t)$ são variáveis dependentes do tempo que indicam a contribuição de cada perturbação e definem a estrutura de incerteza.

3.4.1 Caso de Sistemas Politópicos

Um caso particular amplamente utilizado em controle robusto é o dos *sistemas politópicos*, nos quais as incertezas estão contidas dentro de um politopo convexo. Neste cenário, o vetor de incertezas $\delta(t)$ pertence ao conjunto:

$$\mathcal{P} = \left\{ \delta \in \mathbb{R}^k \mid \sum_{i=1}^k \delta_i = 1, \delta_i \geq 0, \forall i \right\}. \quad (3.14)$$

Esse conjunto define um politopo cujos vértices são dados por:

$$E = \{[1 \ 0 \ \cdots \ 0], [0 \ 1 \ \cdots \ 0], \dots, [0 \ 0 \ \cdots \ 1]\}. \quad (3.15)$$

Segundo o Corolário 4.2 do livro [10], um sistema politópico é *quadraticamente estável de Hurwitz* se, e somente se, existe uma matriz simétrica definida positiva P tal que:

$$[(A_0 + A_i) + (B_0 + B_i)K]P + P[(A_0 + A_i) + (B_0 + B_i)K]^T < 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, k. \quad (3.16)$$

A formulação tradicional dessas desigualdades é convertida em um problema de LMI através da substituição $W = KP$, resultando no seguinte conjunto de condições:

$$(A_0 + A_i)P + P(A_0 + A_i)^T + (B_0 + B_i)W + W^T(B_0 + B_i)^T < 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, k, \quad (3.17)$$

com $P > 0$. Nesse caso, os ganhos de realimentação são obtidos como $K = WP^{-1}$.

Essa abordagem é fundamental para a introdução das incertezas na modelagem do sistema considerado neste trabalho. A modelagem politópica permite capturar variações paramétricas de forma estruturada, e a metodologia via LMIs garante a estabilidade robusta com base em um único critério quadrático de Lyapunov.

3.5 Metodologia de Projeto por D-Estabilização Quadrática com Incertezas Politópicas e Regiões LMI

A metodologia adotada para o projeto dos controladores do caso de estudo baseia-se na técnica de estabilização quadrática robusta via regiões LMI, conforme apresentada no Corolário 7.1 do livro *LMIs in Control Systems* [10]. Essa abordagem permite lidar com incertezas paramétricas através da modelagem politópica, assegurando que os polos do sistema em malha fechada estejam confinados em regiões desejadas do plano complexo.

Dado um sistema incerto representado por:

$$\rho x(t) = A(\delta(t))x(t) + B(\delta(t))u(t),$$

com $\delta(t) \in \Delta_E$, onde $A(\delta(t)) = A_0 + \sum_{i=1}^k \delta_i(t)A_i$ e $B(\delta(t)) = B_0 + \sum_{i=1}^k \delta_i(t)B_i$, a matriz $\delta(t)$ representa a combinação convexa de vértices politópicos, satisfazendo

$$\delta_i(t) \geq 0 \text{ e } \sum_{i=1}^k \delta_i(t) = 1.$$

A estabilização robusta é obtida a partir da viabilidade do seguinte conjunto de LMIs:

$$A(\delta(t))P + PA^T(\delta(t)) + B(\delta(t))W + W^T B^T(\delta(t)) + 2\alpha P < 0, \quad \forall \delta(t) \in \Delta_E, \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} -rP & A(\delta(t))P + B(\delta(t))W \\ PA^T(\delta(t)) + W^T B^T(\delta(t)) & -rP \end{bmatrix} < 0, \quad \forall \delta(t) \in \Delta_E, \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_1(\delta(t)) \sin \theta & \Omega_2(\delta(t)) \cos \theta \\ \Omega_2^T(\delta(t)) \cos \theta & \Omega_1(\delta(t)) \sin \theta \end{bmatrix} < 0, \quad \forall \delta(t) \in \Delta_E, \quad (3.20)$$

com:

$$\Omega_1(\delta(t)) = A(\delta(t))P + PA^T(\delta(t)) + B(\delta(t))W + W^T B^T(\delta(t)),$$

$$\Omega_2(\delta(t)) = A(\delta(t))P - PA^T(\delta(t)) + B(\delta(t))W - W^T B^T(\delta(t)),$$

e a lei de controle definida por:

$$K = WP^{-1}.$$

As regiões LMI utilizadas são determinadas a partir de especificações desejadas de desempenho no tempo, como tempo de acomodação (t_s) e sobressinal máximo (M_p). A partir desses parâmetros, calculam-se os seguintes valores que caracterizam as regiões D:

- Razão de amortecimento ζ , resolvendo a equação:

$$\frac{M_p}{100} = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

- Frequência natural ω_n :

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta t_s}$$

- Parâmetros das regiões:

$$\alpha = \zeta\omega_n, \quad r = \omega_n, \quad \theta = \arccos(\zeta)$$

Esses parâmetros determinam a faixa vertical, o raio da circunferência e o ângulo do setor cônico usados nas desigualdades matriciais para limitar os autovalores a regiões específicas no semiplano esquerdo, garantindo estabilidade e desempenho desejado. A formulação completa do problema leva em conta todos os vértices do politopo, verificando as LMIs para cada um deles.

Cabe destacar que o modelo no espaço de estados adotado neste trabalho,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (3.21)$$

não representa um sistema único com matrizes constantes. Devido às incertezas paramétricas associadas às variações da tensão de entrada e da resistência da carga, as matrizes A e B dependem dessas condições operacionais, resultando em uma família de sistemas lineares.

Dessa forma, o sistema pode ser descrito como um sistema politópico, no qual as matrizes do modelo pertencem ao fecho convexo de um conjunto finito de vértices, cada um correspondente a uma condição extrema de operação. A análise e o projeto de controle desenvolvidos neste trabalho consideram explicitamente essa característica, garantindo estabilidade e desempenho para todos os sistemas pertencentes a essa família.

Capítulo 4

Análise dos Resultados Experimentais

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a análise detalhada dos resultados experimentais obtidos a partir da implementação prática das estratégias de controle desenvolvidas ao longo deste trabalho, aplicadas a uma microrrede isolada em corrente contínua. Diferentemente das etapas anteriores, voltadas ao modelamento, projeto e validação em ambiente de simulação, o foco deste capítulo está exclusivamente na avaliação do desempenho do sistema real, permitindo verificar a viabilidade prática, a robustez e o comportamento dinâmico dos controladores em condições operacionais reais.

Inicialmente, é descrita a arquitetura da microrrede em corrente contínua utilizada como plataforma experimental, destacando-se seus principais componentes, parâmetros elétricos e a estrutura adotada para a integração dos conversores de potência. Em seguida, é apresentada a estrutura de controle implementada nos conversores CC-CC, incluindo o modelo de controle empregado, o diagrama em blocos do sistema e os procedimentos de implementação dos controladores por alocação de polos (AP), regulador linear quadrático (LQR) e controle robusto baseado em desigualdades matriciais lineares (LMI).

Na sequência, são apresentados os ganhos obtidos para cada estratégia de controle, organizados de forma comparativa para os diferentes conversores da microrrede, evidenciando as particularidades e critérios de projeto associados a cada

metodologia. Posteriormente, são discutidos os resultados dos ensaios experimentais realizados, contemplando diferentes cenários de operação, tais como rastreamento de referência, variações na tensão de entrada e variações combinadas da tensão de entrada e da carga conectada ao sistema.

A avaliação do desempenho dos controladores é conduzida por meio de índices de desempenho clássicos extraídos exclusivamente dos dados experimentais, possibilitando uma análise objetiva e quantitativa do comportamento dinâmico do sistema real. Por fim, é realizada uma análise de estabilidade baseada no conceito de regiões D, investigando o posicionamento dos polos em malha fechada obtidos por cada estratégia de controle e relacionando esses resultados com o desempenho observado experimentalmente. Dessa forma, o capítulo consolida uma análise comparativa global, ressaltando as vantagens, limitações e a eficácia das técnicas de controle investigadas quando aplicadas a microrredes CC em ambiente prático.

Ressalta-se que os resultados apresentados neste capítulo correspondem à avaliação do desempenho dos controladores para diferentes condições operacionais, associadas às variações da tensão de entrada e da carga conectada ao barramento CC. Cada condição analisada representa um membro distinto da família de sistemas politópicos, permitindo avaliar a robustez dos controladores frente às incertezas paramétricas consideradas.

4.2 Arquitetura da Microrrede CC

A Figura 4.1 apresenta esquematicamente a arquitetura da microrrede em corrente contínua (MRCC) considerada neste trabalho, baseada em um barramento CC simples de topologia radial. Nessa configuração, uma fonte de geração em corrente contínua é conectada ao barramento por meio de um conversor Boost, responsável pela elevação e regulação da tensão, enquanto as cargas CC são alimentadas diretamente pelo barramento ou através de um conversor Buck, conforme os níveis de tensão requeridos.

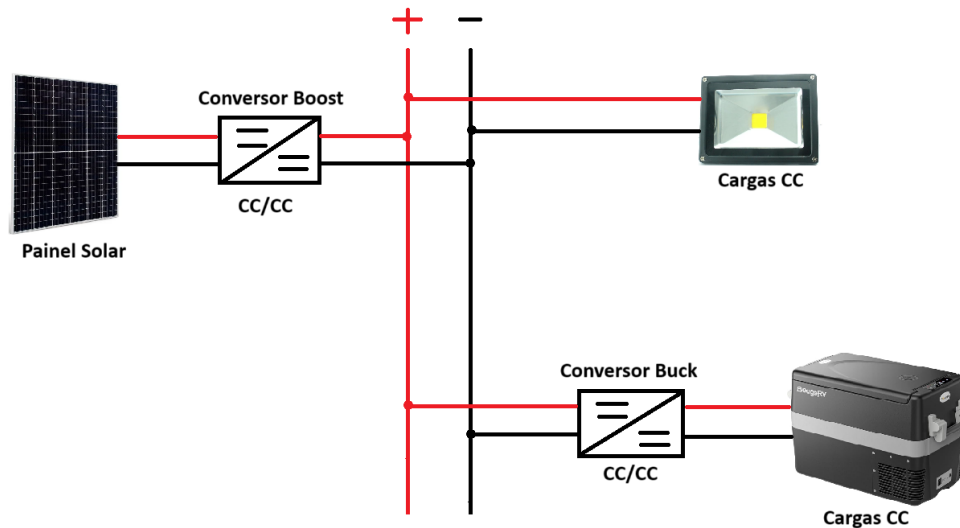


Figura 4.1: Arquitetura proposta para a aplicação no problema da comunidade isolada selecionada.

Essa arquitetura permite a manutenção de uma tensão de barramento regulada, facilitando a integração de diferentes cargas e conversores, além de simplificar a análise e o controle do sistema.

A estrutura da microrrede analisada neste estudo de caso é composta pelos seguintes componentes (vide a Figura 4.1):

- **Fonte de geração fotovoltaica com conversor Boost:** responsável por converter a energia solar gerada para um nível de tensão adequado ao barramento CC. Na implementação prática, o painel fotovoltaico foi representado por uma fonte programável IT6722A da ITECH [44], ilustrada na Figura 4.2, a qual permite o ajuste e o controle da tensão de saída, possibilitando a emulação do comportamento da fonte solar sob diferentes condições de operação.
- **Cargas:** No presente trabalho, tanto a carga conectada diretamente ao barramento CC, representando uma luminária, quanto a carga acoplada a um conversor Buck, que representa uma geladeira, foram implementadas por meio de resistores na etapa experimental, permitindo a avaliação do comportamento do sistema sob diferentes níveis de demanda de potência.



Figura 4.2: Fonte programável IT6722A da ITECH.

4.2.1 Ambiente Experimental

Esta subseção apresenta o ambiente experimental da microrrede CC, conforme implementado neste trabalho, fornecendo uma visão geral da montagem dos conversores que compõem a arquitetura do sistema. São apresentadas as estruturas físicas dos conversores CC-CC utilizados, de modo a evidenciar os principais elementos empregados na implementação experimental e a forma como esses dispositivos foram organizados durante os ensaios.

A Figura 4.3 apresenta o conversor Boost utilizado para a elevação da tensão e a formação do barramento CC da microrrede. Esse conversor constitui o estágio principal do sistema, sendo responsável por regular a tensão do barramento e fornecer energia aos demais conversores conectados.

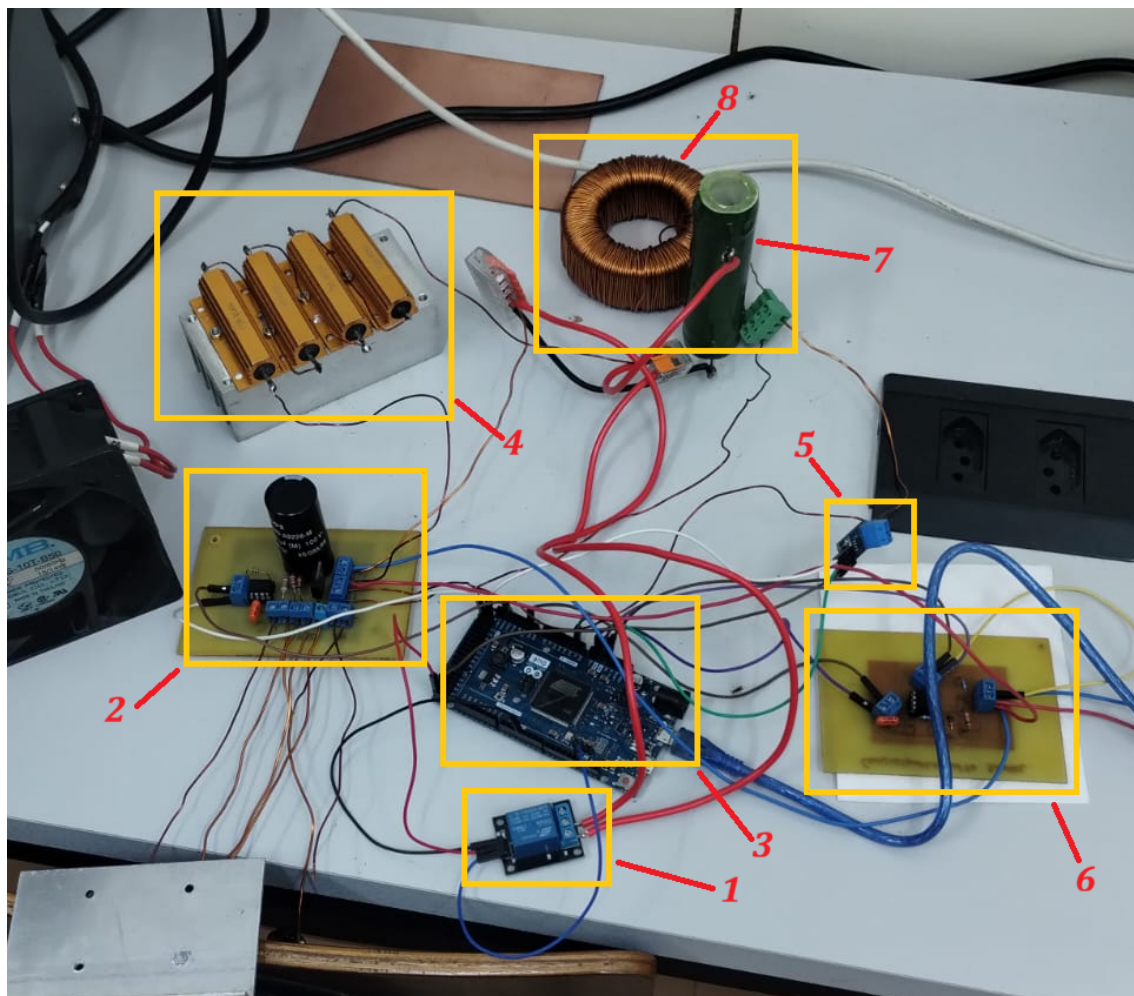


Figura 4.3: Elementos constituintes do conversor Boost utilizado no sistema.

Legenda: (1) Módulo relé; (2) Conversor Boost; (3) Arduino Due; (4) Resistor de carga de $16\ \Omega$; (5) Sensor de corrente ACS712 – 5 A; (6) Circuito de condicionamento de sinal para leitura de tensão; (7) Resistor de carga de $11\ \Omega$; (8) Indutor de 12 mH.

A Figura 4.4 ilustra o conversor Buck empregado no sistema. Na implementação experimental, esse conversor foi acoplado diretamente à saída do conversor Boost, ou seja, ao barramento CC, representando uma carga controlada conectada à microrrede. Essa configuração permitiu a avaliação do comportamento do barramento diante de variações de carga, conforme discutido nos testes experimentais apresentados neste trabalho.

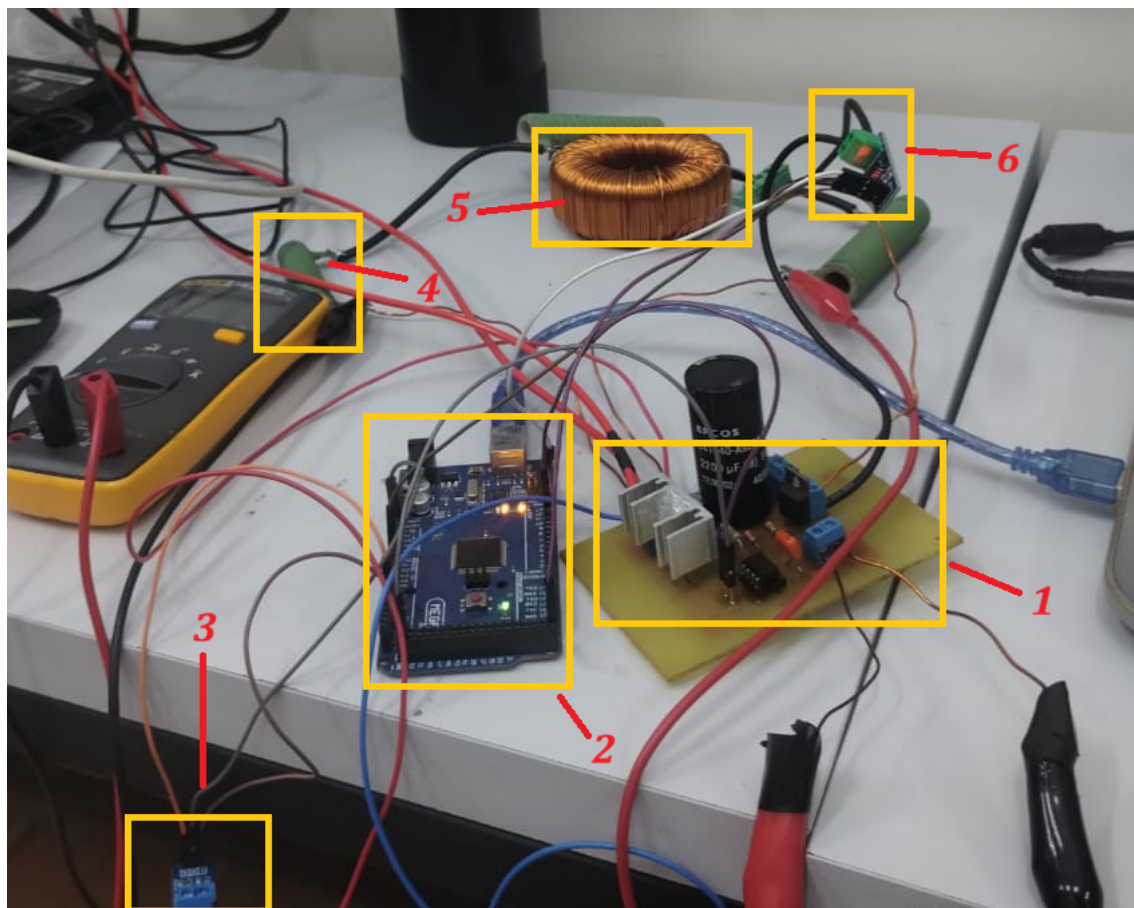


Figura 4.4: Elementos constituintes do conversor Buck utilizado no sistema.

Legenda: (1) Conversor Buck; (2) Arduino Mega 2560; (3) Sensor De Tensão (Voltagem) 0-25 Vdc - Para Arduino; (4) Conjunto de resistores de carga (três resistores em série), totalizando 14 Ω ; (5) Indutor de 12 mH; (6) Sensor de corrente ACS712 – 5 A.

A Figura 4.5 apresenta a visão global da microrrede em corrente contínua implementada neste trabalho. Na figura, observa-se a disposição dos principais elementos do sistema experimental, incluindo os conversores de potência, o barramento CC, os dispositivos de carga, bem como os computadores utilizados para a execução das interfaces gráficas de controle e monitoramento.

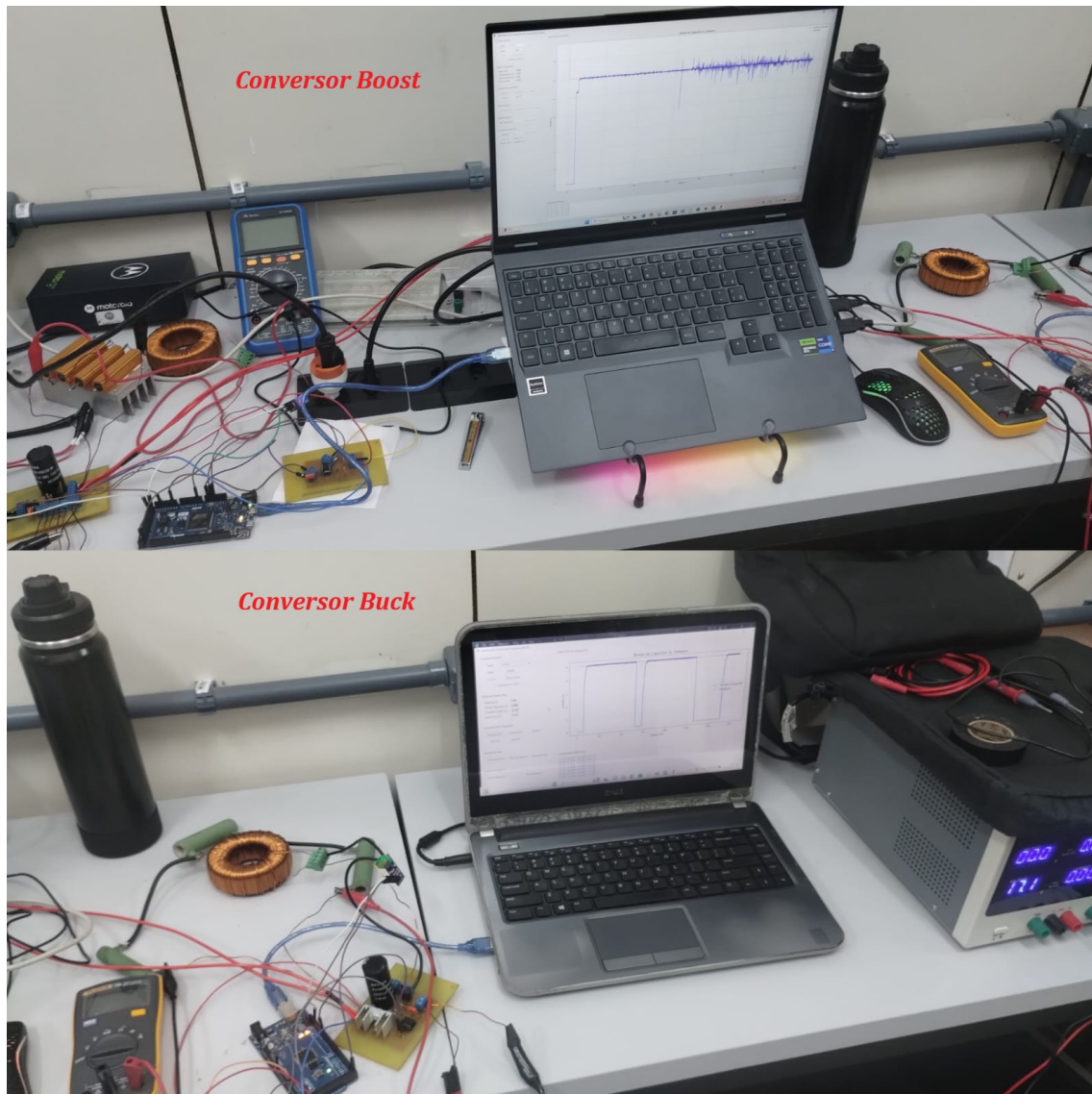


Figura 4.5: Visão global da microrrede em corrente contínua considerada neste trabalho.

Destaca-se que os conversores Boost e Buck encontram-se fisicamente instalados em proximidade, conectados ao mesmo barramento CC. Na figura, o conversor Boost é apresentado na parte superior e o conversor Buck na parte inferior, disposição adotada apenas por uma questão de organização visual e limitação de espaço, não representando uma separação funcional entre os módulos.

Adicionalmente, são evidenciados os microcontroladores responsáveis pela implementação dos algoritmos de controle e pela comunicação com as interfaces desenvolvidas em ambiente *desktop*, permitindo o acompanhamento em tempo real das grandezas elétricas do sistema durante a realização dos ensaios experimentais. Essa visão geral tem como objetivo contextualizar a infraestrutura utilizada nos testes e

facilitar a compreensão da integração entre os componentes de hardware e software da microrrede CC.

4.3 Arquitetura e Implementação do Sistema de Controle

Esta seção apresenta a arquitetura do sistema de controle adotada neste trabalho, bem como os procedimentos de implementação dos controladores por AP, LQR e LMI aplicados aos conversores CC–CC da microrrede. Inicialmente, é descrito o diagrama em blocos que representa a lógica de controle empregada, destacando-se os principais componentes da estrutura de realimentação de estados. Em seguida, são discutidos os aspectos relacionados à implementação das diferentes estratégias de controle, enfatizando as similaridades estruturais e as particularidades associadas à obtenção dos ganhos de realimentação.

4.3.1 Diagrama em Blocos do Sistema de Controle

A Figura 4.6 apresenta o diagrama em blocos do sistema de controle implementado neste trabalho, desenvolvido no ambiente *Simulink* do *MATLAB*. Esse modelo computacional foi construído de forma a reproduzir fielmente a lógica de controle empregada no sistema real, permitindo a avaliação do desempenho dinâmico dos conversores sob diferentes estratégias de controle e condições operacionais. A mesma estrutura de controle é aplicada aos conversores do tipo Boost e Buck, diferenciando-se apenas pelos parâmetros do modelo e pelos ganhos de realimentação utilizados em cada caso.

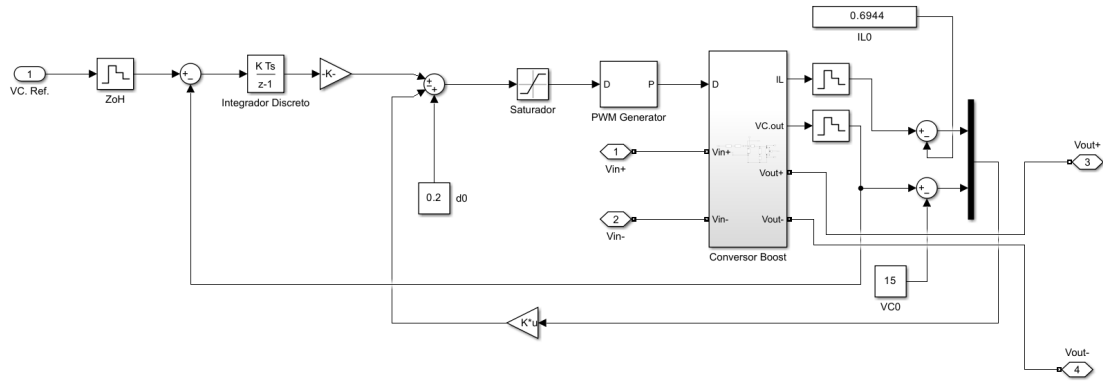


Figura 4.6: Diagrama em blocos do sistema de controle.

Conforme ilustrado na Figura 4.6, o sistema de controle é baseado em uma estrutura de realimentação de estados. A tensão de referência do barramento CC é comparada com a tensão medida na saída do conversor, gerando o sinal de erro que é processado por um integrador discreto. A presença do termo integral tem como objetivo eliminar o erro em regime permanente e melhorar o desempenho de rastreamento da referência.

A realimentação de estados é composta pelas variáveis associadas aos elementos de armazenamento de energia do conversor, especificamente a corrente no indutor e a tensão no capacitor de saída. Esses estados são ponderados por uma matriz de ganhos, obtida a partir das metodologias de Alocação de Polos, controle LQR ou controle baseado em LMI, conforme descrito nas seções anteriores. O sinal de controle resultante é somado ao valor do ponto de operação do ciclo de trabalho, obtido a partir da linearização do modelo em torno de um ponto de equilíbrio, garantindo a correta atuação do controlador sobre o sistema não linear.

Os blocos de retenção de ordem zero (*Zero-Order Hold* – ZOH) indicam que o sistema de controle é implementado em tempo discreto, refletindo a lógica de amostragem típica de sistemas digitais embarcados. O sinal de controle passa ainda por um bloco de saturação, responsável por limitar o ciclo de trabalho a valores fisicamente admissíveis, antes de ser aplicado ao gerador PWM que aciona o conversor CC-CC.

Essa estrutura modular permite a aplicação direta do mesmo modelo de controle a diferentes topologias de conversores, mantendo a coerência entre o modelo

matemático, o ambiente de simulação e a implementação prática. Dessa forma, o diagrama em blocos apresentado constitui a base para os ensaios experimentais e análises comparativas de desempenho discutidas nas seções subsequentes deste capítulo.

4.3.2 Implementação dos Controladores AP, LQR e LMI

A implementação dos controladores por AP, controle ótimo LQR e controle baseado em LMI adota a mesma estrutura de realimentação de estados, diferenciando-se apenas pelo método empregado para a obtenção da matriz de ganhos K . Em todos os casos, a lei de controle utilizada é expressa por

$$u(t) = -Kx(t), \quad (4.1)$$

em que $x(t)$ representa o vetor de estados do sistema e $u(t)$ corresponde à ação de controle aplicada ao ciclo de trabalho do conversor.

Apesar das diferenças conceituais entre as técnicas de AP, LQR e LMI, todas são avaliadas neste trabalho considerando a mesma família de sistemas dependentes de parâmetros, associada às variações da tensão de entrada e da resistência de carga. Essa abordagem assegura uma base de comparação consistente entre as estratégias de controle, sob condições operacionais equivalentes.

No método de AP, a matriz K é determinada de modo a posicionar os polos do sistema em malha fechada em regiões previamente especificadas do plano complexo, atendendo a requisitos de estabilidade e desempenho transitório. No controle LQR, os ganhos são obtidos por meio da minimização de uma função de custo quadrática, estabelecendo um compromisso entre desempenho dinâmico e esforço de controle. Já no controle baseado em LMI, os ganhos resultam da solução de um problema de otimização convexa, considerando explicitamente as incertezas politópicas do modelo e impondo condições de estabilidade robusta.

Os ganhos obtidos para cada conversor e para cada estratégia de controle são apresentados na Seção 4.4 e avaliados posteriormente por meio de ensaios experimentais.

4.4 Projeto dos Controladores por Realimentação de Estados

Esta seção apresenta os resultados do projeto dos controladores por realimentação de estados aplicados aos conversores da microrrede. Foram consideradas três metodologias distintas: AP, controle ótimo LQR e controle robusto via LMI.

Todos os controladores foram projetados com base nas mesmas especificações de desempenho:

- Tempo de acomodação desejado: $t_s = 0.1$ s;
- Sobressinal máximo permitido: de 10% a 30%.

Nota: Considerando que o conversor Boost apresenta uma dinâmica bastante rápida, sendo o principal responsável pela regulação da tensão do barramento CC, foi adotado um tempo de acomodação de 0,1 s, com o objetivo de se aproximar da velocidade natural do conversor. Observa-se ainda que o sobressinal medido foi muito pequeno, da ordem de aproximadamente 0,42%, com a tensão variando de 11,8 V para 11,85 V, o que indica que a característica natural do conversor Boost é bem amortecida, conforme ilustrado na Figura 4.7.

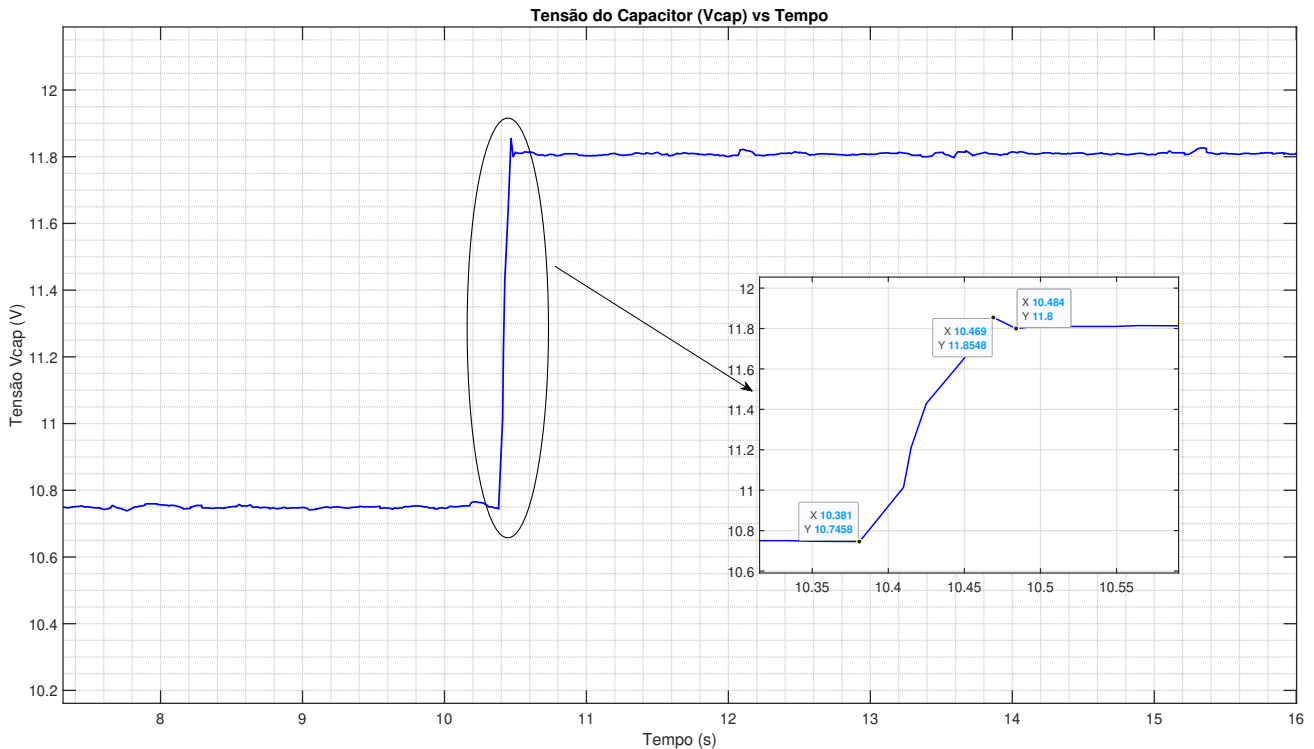


Figura 4.7: Conversor Boost em malha aberta - Implementação Experimental.

Durante a etapa de projeto dos controladores, optou-se por utilizar valores de sobressinal maiores do que os observados no sistema real, como forma de aumentar a ação integral e, conseqüentemente, conferir maior rapidez à resposta do sistema em malha fechada. Dessa forma, foram considerados, no projeto, valores de sobressinal na faixa de 10% a 30%, tratando-se de uma escolha deliberada de projeto do controlador.

Para garantir erro de regime permanente nulo, os sistemas foram aumentados com um integrador na entrada. Assim:

- Os conversores Boost e Buck, originalmente de segunda ordem, passam a ter três estados no modelo aumentado e, conseqüentemente, três ganhos de realimentação.

A seguir, são apresentadas as tabelas com os ganhos de cada controlador, organizadas por conversor e metodologia de projeto. Ressalta-se que, para a implementação do controlador no Arduino, o projeto deve ser realizado em tempo discreto, utilizando o período de amostragem (T_s) correspondente ao definido na IDE utilizada para o código de implementação, garantindo assim a coerência entre o modelo de projeto e o comportamento do controlador no sistema real.

4.4.1 Ganhos dos Controladores por Conversor

Nesta subseção são apresentados os ganhos de realimentação de estados obtidos a partir do projeto dos controladores em tempo contínuo para cada conversor analisado. Esses ganhos correspondem aos valores calculados pelas metodologias de alocação de polos, controle LQR e controle baseado em LMI, sendo utilizados como referência para a análise de estabilidade, posicionamento de polos e regiões D no plano complexo S .

Ressalta-se que, embora a implementação prática dos controladores tenha sido realizada em tempo discreto, os ganhos apresentados a seguir referem-se ao projeto em tempo contínuo. A discretização foi aplicada exclusivamente para fins de implementação digital, preservando as características dinâmicas do projeto original.

Conversor Boost

A Tabela 4.1 apresenta os ganhos de realimentação de estados obtidos em tempo contínuo para o conversor Boost, considerando as três metodologias de controle avaliadas neste trabalho. Os ganhos K_1 e K_2 estão associados às variáveis de estado do sistema (corrente no indutor e tensão no capacitor), enquanto o ganho K_3 corresponde ao termo integral, responsável pela eliminação do erro em regime permanente.

Tabela 4.1: Ganhos dos controladores em tempo contínuo aplicados ao conversor Boost.

Metodologia	K_1	K_2	K_3
Alocação de Polos	0,2041	-0,0256	2,0145
LQR	2,5497	0,7489	2,2361
LMI	0,5836	0,4580	24,9531

Observa-se, a partir da Tabela 4.1, que as diferentes metodologias de projeto resultam em conjuntos de ganhos significativamente distintos para o conversor Boost. O controlador obtido por alocação de polos apresenta valores de ganhos relativamente menores, refletindo um projeto mais conservador e diretamente associado à escolha explícita dos polos em malha fechada. No caso do controle LQR, verifica-se um aumento nos ganhos associados às variáveis de estado, resultado do compromisso entre desempenho dinâmico e esforço de controle imposto pela função custo adotada. Para o controlador projetado via LMI, nota-se um valor elevado do ganho integral K_3 , o qual está associado às restrições de desempenho e à região D especificada no projeto, influenciando diretamente a ação integral necessária para o atendimento das especificações de estabilidade e resposta dinâmica estabelecidas.

Conversor Buck

Para o conversor Buck, os ganhos de realimentação de estados em tempo contínuo dependem do ponto de operação e da topologia específica adotada. Dessa forma, os valores correspondentes devem ser obtidos a partir do modelo linearizado desse conversor, seguindo o mesmo procedimento metodológico aplicado ao conversor Boost.

Tabela 4.2: Ganhos dos controladores em tempo contínuo aplicados ao conversor Buck.

Metodologia	K_1	K_2	K_3
Alocação de Polos	-0,0446	0,1980	1,6116

A Tabela 4.2 apresenta os ganhos do controlador em tempo contínuo projetado por alocação de polos para o conversor Buck. Observa-se que os ganhos associados às variáveis de estado assumem valores de menor magnitude quando comparados aos obtidos para o conversor Boost, o que está diretamente relacionado às características dinâmicas do conversor Buck e ao ponto de operação considerado no processo de linearização. O sinal negativo do ganho K_1 reflete a relação entre a corrente no indutor e a ação de controle imposta pela realimentação de estados, enquanto os ganhos K_2 e K_3 contribuem para a regulação da tensão de saída e para a eliminação do erro em regime permanente. Esses ganhos resultam da escolha explícita dos polos em malha fechada, de acordo com as especificações de estabilidade e desempenho estabelecidas para o sistema.

4.5 Interface Gráfica para Realização dos Testes Experimentais

Para a realização dos testes experimentais do conversor Boost, foi desenvolvida uma interface gráfica em ambiente *desktop*, com o objetivo de facilitar a operação do sistema, o envio de comandos de controle e a aquisição de dados em tempo real. A interface foi implementada na linguagem Python e é apresentada na Figura 4.8, enquanto um detalhamento do bloco de comandos e botões disponíveis para a realização dos testes é mostrado na Figura 4.9.

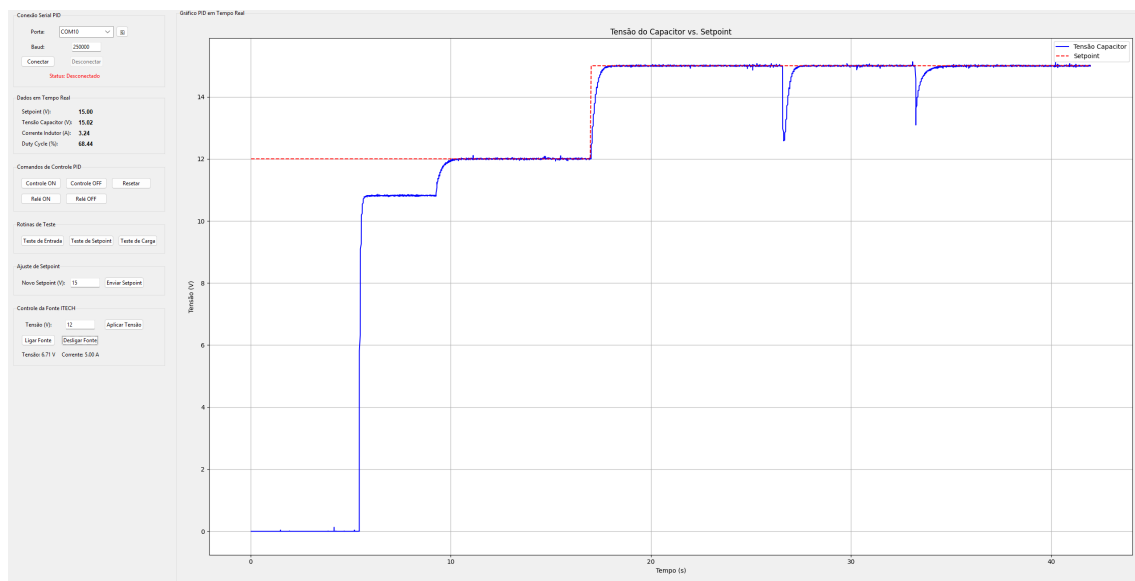


Figura 4.8: Interface gráfica desenvolvida para a realização dos testes experimentais.

Conexão Serial PID

Porta:

COM10



Baud:

250000

Conectar
Desconectar

Status: Desconectado

Dados em Tempo Real

Setpoint (V):

15.00

Tensão Capacitor (V):

15.02

Corrente Indutor (A):

3.24

Duty Cycle (%):

68.44

Comandos de Controle PID

Controle ON

Controle OFF

Resetar

Relé ON

Relé OFF

Rotinas de Teste

Teste de Entrada

Teste de Setpoint

Teste de Carga

Ajuste de Setpoint

Novo Setpoint (V):

15

Enviar Setpoint

Controle da Fonte ITECH

Tensão (V):

12

Aplicar Tensão

Ligar Fonte

Desligar Fonte

Tensão: 6.71 V Corrente: 5.00 A

A comunicação entre a interface gráfica e o sistema de controle embarcado é realizada por meio de uma porta serial, utilizando um microcontrolador Arduino Due como unidade de processamento. Por meio dessa comunicação, a interface é responsável tanto pela leitura das variáveis medidas pelo sistema, quanto pelo envio

de comandos de controle ao conversor.

Entre as funcionalidades disponíveis, a interface permite a visualização em tempo real da tensão do barramento em corrente contínua e do respectivo valor de referência (setpoint), os quais são apresentados graficamente ao longo do tempo. Adicionalmente, são exibidos valores instantâneos das principais grandezas do sistema, como a tensão no capacitor, a corrente no indutor e o ciclo de trabalho aplicado ao conversor.

A interface também disponibiliza comandos para habilitar e desabilitar o controle, realizar o acionamento de relés, modificar o valor do setpoint durante a operação e executar rotinas automatizadas de teste, como variações de tensão de entrada e testes de carga. Essas rotinas permitem a padronização dos ensaios experimentais e a repetibilidade dos resultados obtidos.

Além disso, a interface possibilita o controle remoto da fonte de alimentação programável IT6722A da ITECH, utilizada nos experimentos por meio de comunicação via USB, permitindo o ajuste da tensão de entrada, o acionamento e desligamento da fonte, bem como o monitoramento dos valores de tensão e corrente fornecidos durante os testes. Todos os dados recebidos durante a execução dos ensaios são armazenados em arquivo para posterior análise.

4.6 Breve Descritivo dos Testes Realizados

Com o objetivo de avaliar de forma sistemática o desempenho dinâmico da microrrede CC sob diferentes estratégias de controle, foram realizados quatro testes experimentais distintos. Cada ensaio foi cuidadosamente planejado de modo a permitir a análise do comportamento do sistema frente a variações de referência, perturbações na tensão de entrada e alterações na carga conectada ao barramento CC.

Em todos os testes, o sistema foi inicialmente levado ao ponto de operação desejado, garantindo condições iniciais equivalentes para a comparação entre os controladores por AP, LQR e LMI. A seguir, são descritos detalhadamente os procedimentos adotados em cada teste, especificando-se as variáveis envolvidas, as perturbações aplicadas, os instantes de variação e os critérios de avaliação conside-

rados, de forma a possibilitar a completa reprodução dos experimentos.

Teste 1 – Rastreamento de Referência

O Teste 1 tem como finalidade avaliar a capacidade de rastreamento de referência do sistema, bem como a resposta dinâmica da microrrede CC diante de variações programadas na tensão de referência do barramento.

Inicialmente, o sistema é operado com tensão de saída estabilizada em 12 V. A partir dessa condição, a tensão de referência é modificada em degraus sucessivos, com intervalos de 4 s entre cada variação. Primeiramente, a referência é incrementada gradualmente até atingir o valor máximo de 17 V. Em seguida, a tensão de referência é reduzida de forma progressiva, também em degraus, até retornar ao valor inicial de 12 V.

Esse procedimento é repetido de maneira idêntica para os três controladores avaliados (AP, LQR e LMI). Durante o ensaio, são observados o tempo de resposta, o sobressinal, o erro em regime permanente e a capacidade do sistema de acompanhar fielmente a referência imposta, permitindo uma análise comparativa do desempenho de cada técnica de controle.

Teste 2 – Variação da Tensão de Entrada

O Teste 2 visa analisar a robustez do sistema frente a perturbações na tensão de entrada da fonte, avaliando a capacidade do controlador em manter a estabilidade e restabelecer o ponto de equilíbrio do barramento CC.

Inicialmente, o sistema é conduzido ao ponto de operação com tensão do barramento estabilizada em 15 V, considerando uma tensão de entrada nominal da fonte igual a 12 V. A partir dessa condição, são aplicadas variações na tensão de entrada, seguindo a seguinte sequência: redução para 10 V, retorno para 12 V e, posteriormente, incremento para 13 V, com cada alteração ocorrendo em intervalos de 4 s entre as transições. Esse ciclo completo de variações é repetido duas vezes consecutivas, após o ensaio é finalizado.

O teste é realizado para os três controladores investigados, permitindo avaliar a resposta dinâmica do barramento CC, o tempo de recuperação e a capacidade do sistema em retornar ao ponto de equilíbrio após cada perturbação na tensão de

entrada.

Teste 3 – Variação Combinada da Tensão de Entrada e da Carga

O Teste 3 tem como objetivo avaliar o comportamento do sistema diante de perturbações simultâneas na tensão de entrada e na carga conectada ao conversor Boost, caracterizando uma condição mais severa de operação.

Inicialmente, o sistema é novamente levado ao ponto de equilíbrio, operando em regime permanente. Em seguida, a tensão de entrada da fonte é reduzida para 10 V. Após essa variação, a resistência de carga do conversor Boost é alterada de 27 Ω para 16 Ω , representando um aumento abrupto da demanda de potência. Posteriormente, a tensão de entrada é restabelecida para 12 V e, por fim, a resistência de carga retorna ao valor original de 27 Ω .

Ao longo de todo o ensaio, são observadas a resposta transitória do barramento CC, a capacidade de rejeição às perturbações e o restabelecimento do ponto de equilíbrio após cada variação aplicada. Assim como nos testes anteriores, o procedimento é executado para os controladores AP, LQR e LMI, possibilitando uma comparação direta do desempenho e da robustez de cada técnica de controle.

Teste 4 – Avaliação dos Índices de Desempenho

O Teste 4 tem como finalidade quantificar o desempenho dos controladores por meio de índices clássicos de desempenho, permitindo uma análise objetiva e comparativa dos resultados obtidos nos testes anteriores.

Ressalta-se que a avaliação dos índices de desempenho é baseada nos dados experimentais obtidos nos Testes 2 e 3, uma vez que esses ensaios impõem perturbações relevantes ao sistema, tais como variações na tensão de entrada e alterações simultâneas de tensão e carga. Dessa forma, os índices calculados refletem de maneira mais representativa a resposta dinâmica do sistema e o esforço de controle requerido para a manutenção da estabilidade e do ponto de operação.

Para essa avaliação, são considerados os índices Integral do Erro Quadrático (ISE), Integral do Erro Absoluto (IAE), Integral do Erro Absoluto Ponderado no Tempo (ITAE) e Integral do Quadrado do Sinal de Controle (ISCS). Esses índices são calculados a partir das respostas do sistema durante os ensaios experimentais,

possibilitando avaliar não apenas a precisão do rastreamento, mas também o esforço de controle exigido por cada estratégia.

ISE – Integral of the Squared Error

(Integral do Erro ao Quadrado)

$$\text{ISE} = \int_0^T e^2(t) dt \quad (4.2)$$

Penaliza fortemente erros de grande magnitude, sendo útil para minimizar o erro ao longo do tempo, especialmente em sistemas onde grandes desvios não são toleráveis.

IAE – Integral of the Absolute Error

(Integral do Valor Absoluto do Erro)

$$\text{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt \quad (4.3)$$

Mede a soma absoluta do erro ao longo do tempo, destacando a resposta global do sistema sem dar peso maior a erros mais intensos.

ITAE – Integral of Time-weighted Absolute Error

(Integral do Tempo Multiplicado pelo Erro Absoluto)

$$\text{ITAE} = \int_0^T t \cdot |e(t)| dt \quad (4.4)$$

Penaliza erros que persistem no tempo, incentivando uma resposta rápida e estável. Reduz a importância de erros iniciais e valoriza o amortecimento do erro ao longo do tempo.

ISCS – Integral of the Squared Control Signal

(Integral do Sinal de Controle ao Quadrado)

$$\text{ISCS} = \int_0^T (\Delta u(t))^2 dt \quad (4.5)$$

Avalia o esforço de controle necessário, penalizando sinais de controle com alta intensidade. Um valor menor de ISCS indica menor exigência energética e menor estresse sobre os atuadores.

Os valores obtidos fornecem subsídios quantitativos para a comparação global entre os controladores, complementando a análise qualitativa baseada nas respostas temporais do sistema.

4.7 Resultados Experimentais e Discussão

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos a partir da implementação prática da microrrede em corrente contínua proposta neste trabalho. Os ensaios experimentais têm como objetivo analisar o comportamento dinâmico do sistema em diferentes cenários operacionais, permitindo avaliar, de forma prática, o desempenho das estratégias de controle aplicadas à regulação da tensão do barramento CC.

Os testes experimentais contemplam variações nas condições de geração fotovoltaica e alterações no perfil de carga conectada ao barramento, sendo analisadas as respostas de tensão, corrente e os sinais de controle dos conversores implementados. Sempre que pertinente, os resultados experimentais são comparados com aqueles obtidos em ambiente de simulação no *MATLAB/Simulink*, visando validar os modelos desenvolvidos e discutir as diferenças observadas entre o comportamento simulado e o comportamento real da microrrede.

4.7.1 Teste 1: Rastreamento de Referência

Neste primeiro ensaio experimental é realizado um teste de rastreamento de referência, com o objetivo de avaliar a capacidade do sistema de controle em seguir adequadamente o valor de tensão de referência imposto ao barramento CC, conforme ilustrado na Figura 4.10. Esse teste é particularmente relevante, uma vez que a malha de controle do conversor Boost incorpora um integrador na entrada, característica fundamental para a eliminação do erro em regime permanente e para o correto seguimento da referência.

O rastreamento é avaliado a partir da saída do conversor Boost, que representa o barramento principal da microrrede. A análise concentra-se no comportamento da tensão do barramento diante de variações na referência, permitindo verificar a eficiência das diferentes estratégias de controle em termos de resposta

dinâmica.

Para a avaliação de desempenho, são considerados principalmente o tempo de acomodação e o sobresinal, verificando-se se esses parâmetros permanecem dentro dos limites estabelecidos no projeto dos controladores. Os resultados obtidos são analisados para as três técnicas de projeto investigadas — alocação de polos, controle ótimo LQR e controle baseado em incertezas politópicas via LMI — possibilitando uma comparação direta da capacidade de cada abordagem em realizar o rastreamento de referência.

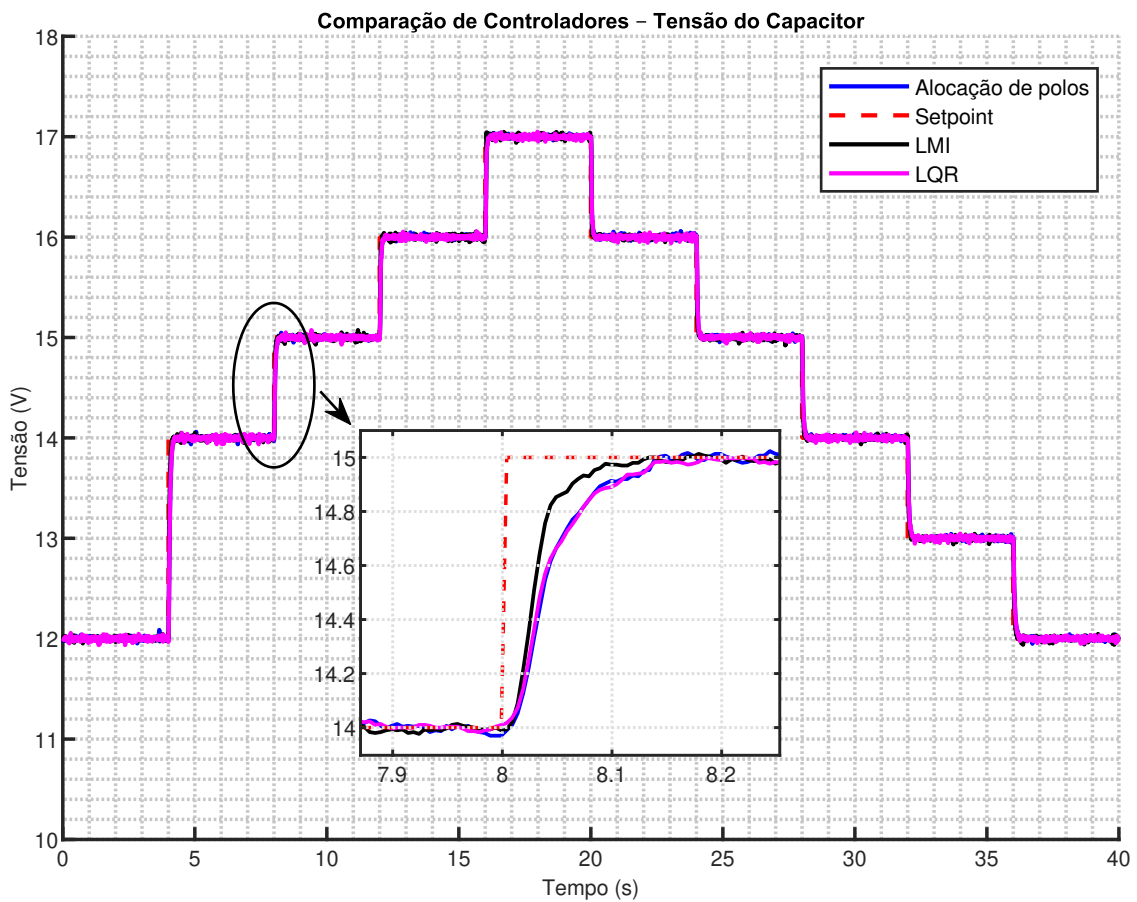


Figura 4.10: Rastreamento de Referência - Implementação Experimental.

A partir da Figura 4.10, observa-se que, para uma variação da referência de tensão de 14 V para 15 V, todas as estratégias de controle avaliadas apresentam comportamento estável e adequado no seguimento da referência, sem a ocorrência de sobresinal. Em termos de resposta dinâmica, o controlador projetado com base em incertezas politópicas via LMI, representado em preto, apresenta o menor tempo

de acomodação, estabilizando a tensão do barramento em aproximadamente 0,13 s.

As estratégias baseadas em controle ótimo LQR, representada em magenta, e em alocação de polos, representada em azul, apresentam desempenhos muito semelhantes entre si, com tempos de acomodação em torno de 0,15 s. Destaca-se que os tempos de acomodação observados experimentalmente são próximos e aceitáveis em relação ao tempo especificado na etapa de projeto dos controladores, definido como 0,1 s. Além disso, mesmo com respostas dinâmicas rápidas, nenhuma das técnicas avaliadas apresentou sobresinal, evidenciando a adequada sintonia dos controladores. Essas características podem ser confirmadas na Figura 4.11, na qual observa-se que o comportamento do *duty cycle* é muito semelhante para os três controladores analisados.

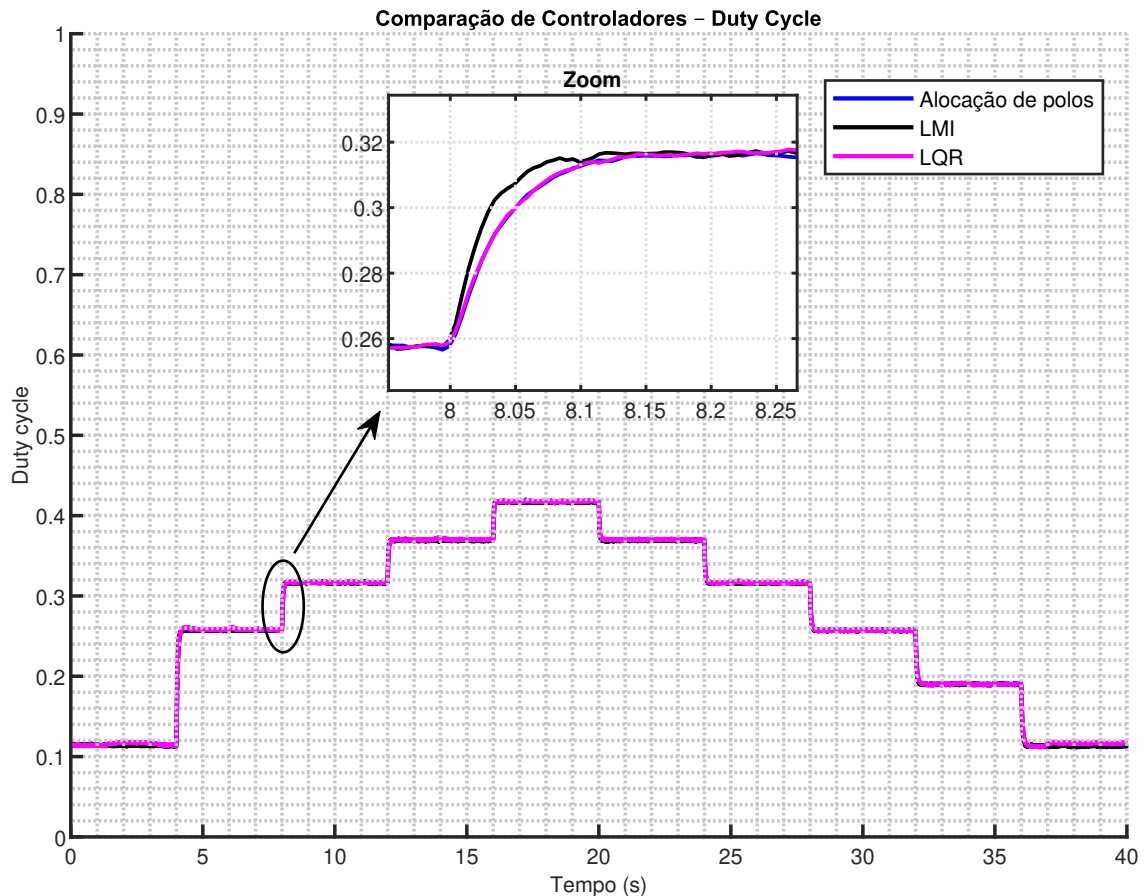


Figura 4.11: Resposta do Duty Cycle no Rastreamento da Referência para Diferentes Controladores - Implementação Experimental.

4.7.2 Teste 2: Variação da Tensão de Entrada

Neste segundo ensaio experimental, é avaliado o comportamento da microrrede diante de variações na tensão de entrada do conversor Boost, com o objetivo de analisar a robustez do sistema e o desempenho das diferentes estratégias de controle adotadas. O teste é iniciado a partir do ponto de operação nominal, com a tensão de entrada fixada em 12 V e a tensão do barramento CC regulada em 15 V .

A partir dessa condição inicial, a tensão da fonte de entrada é submetida a uma sequência de variações entre 10 V , 12 V e 13 V , a qual é repetida duas vezes ao longo do ensaio. Durante todo o teste, a referência de tensão do barramento CC é mantida constante, permitindo observar exclusivamente o impacto das perturbações na entrada sobre a resposta do sistema.

Esse tipo de variação na tensão de entrada representa uma condição típica encontrada em sistemas fotovoltaicos, em que o nível de geração pode oscilar em função das variações de irradiância solar. Dessa forma, o ensaio permite verificar a capacidade da microrrede em manter a regulação da tensão do barramento CC, bem como comparar o desempenho e a robustez das diferentes técnicas de controle aplicadas. Os resultados experimentais obtidos para esse ensaio são apresentados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, correspondentes, respectivamente, às estratégias de controle por AP, LMI e LQR.

A Figura 4.12 apresenta o comportamento da tensão do barramento CC para o controle projetado por AP, considerando as variações impostas na tensão de entrada. Observa-se que, durante a transição da tensão de entrada de 10 V para 12 V , a tensão do barramento atinge um valor máximo de aproximadamente $16,37\text{ V}$, o que corresponde a um acréscimo de cerca de $9,13\%$ em relação ao valor nominal de 15 V .

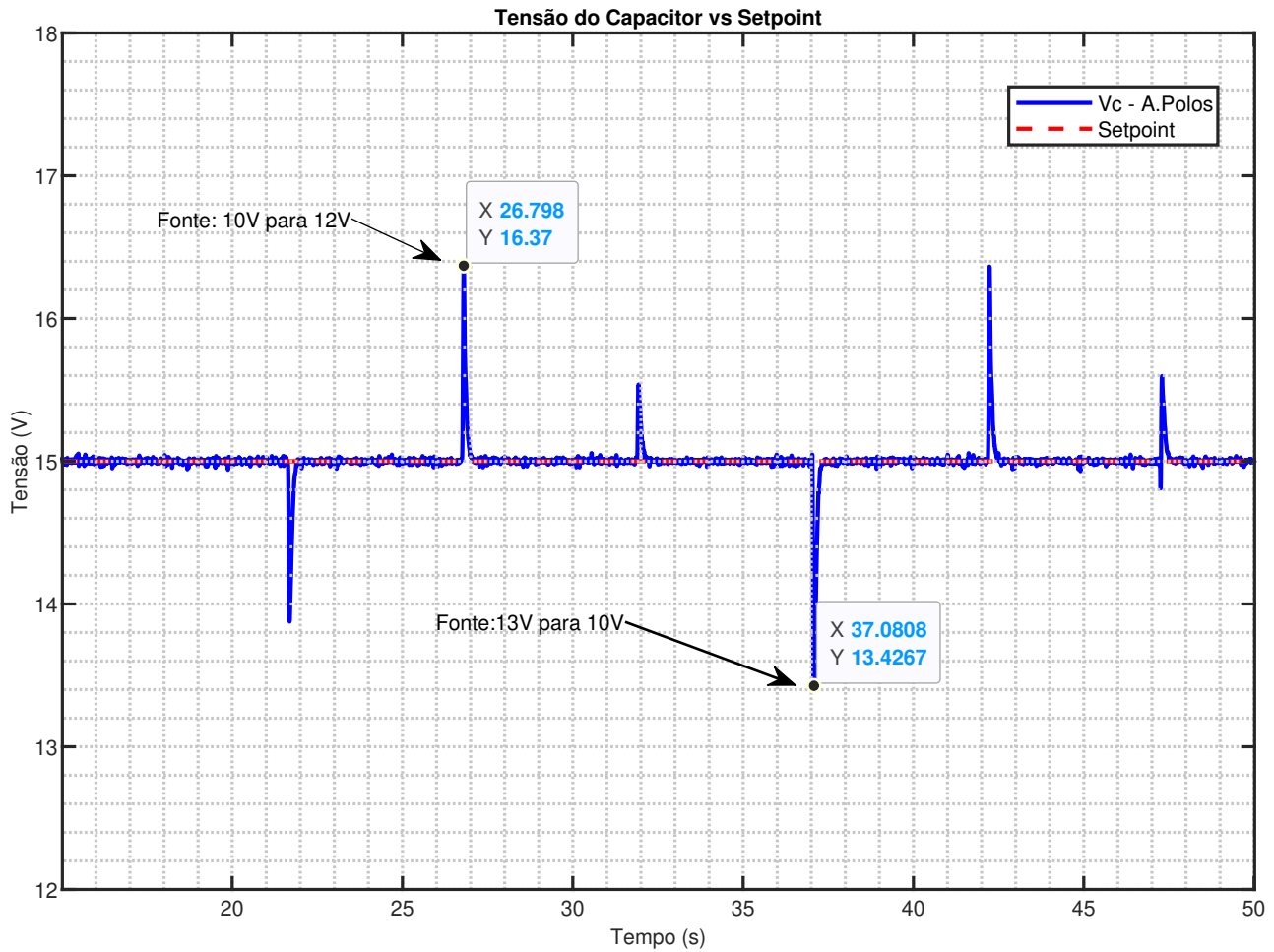


Figura 4.12: Variação da Tensão de Entrada — Controle por Alocação de Polos - Implementação Experimental.

Por outro lado, na variação da tensão de entrada de 13 V para 10 V, verifica-se uma queda da tensão do barramento para aproximadamente 13,42 V, representando uma redução de cerca de 10,53% em relação ao valor nominal. Esses resultados evidenciam o impacto das perturbações na entrada sobre a regulação do barramento CC, permitindo avaliar a robustez do sistema quando submetido a variações significativas na tensão de alimentação.

A Figura 4.13 ilustra a resposta da tensão do barramento CC quando é empregada a estratégia de controle baseada em incertezas politópicas via LMI, diante das variações aplicadas na tensão de entrada. Durante o aumento da tensão de entrada de 10 V para 12 V, observa-se que a tensão do barramento apresenta um valor máximo próximo de 16,09 V, correspondendo a um desvio positivo de aproximadamente 7,27% em relação ao valor nominal de 15 V.

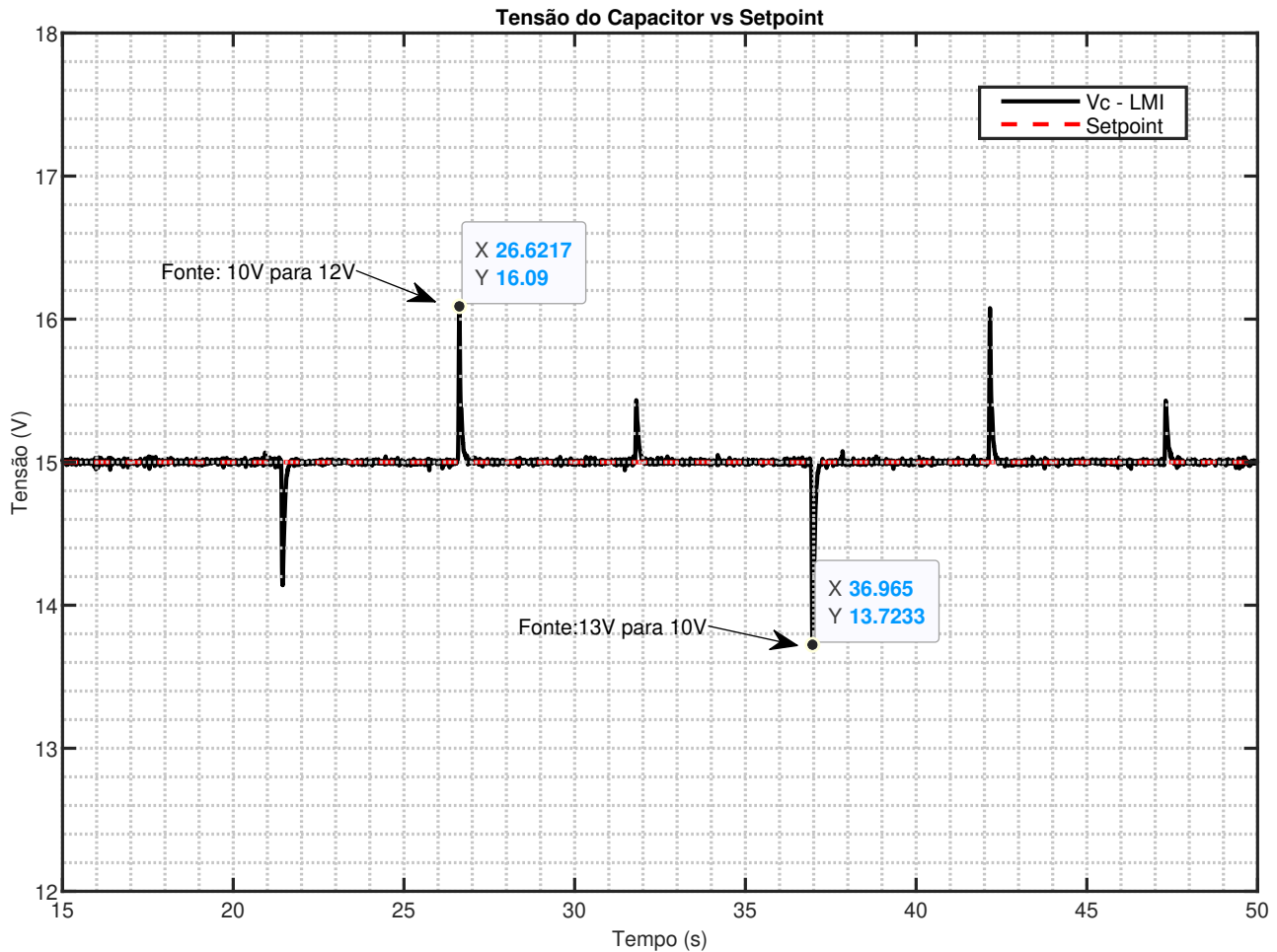


Figura 4.13: Variação da Tensão de Entrada — Controle por LMI - Implementação Experimental.

De forma análoga, na transição da tensão de entrada de 13 V para 10 V, a tensão do barramento é reduzida para cerca de 13,72 V, o que representa uma variação negativa de aproximadamente 8,53%. Esses resultados indicam que, embora ocorram perturbações na tensão do barramento em função das variações na entrada, o controlador baseado em LMI mantém a estabilidade do sistema e contribui para uma resposta robusta frente a mudanças na tensão de alimentação.

Na Figura 4.14 é apresentada a resposta da tensão do barramento CC quando se utiliza o controlador projetado por meio da técnica de controle ótimo LQR, considerando as variações impostas na tensão de entrada. Durante o incremento da tensão de entrada de 10 V para 12 V, verifica-se que a tensão do barramento atinge aproximadamente 16,19 V, o que corresponde a um desvio de cerca de 7,93% em relação ao valor nominal de 15 V.

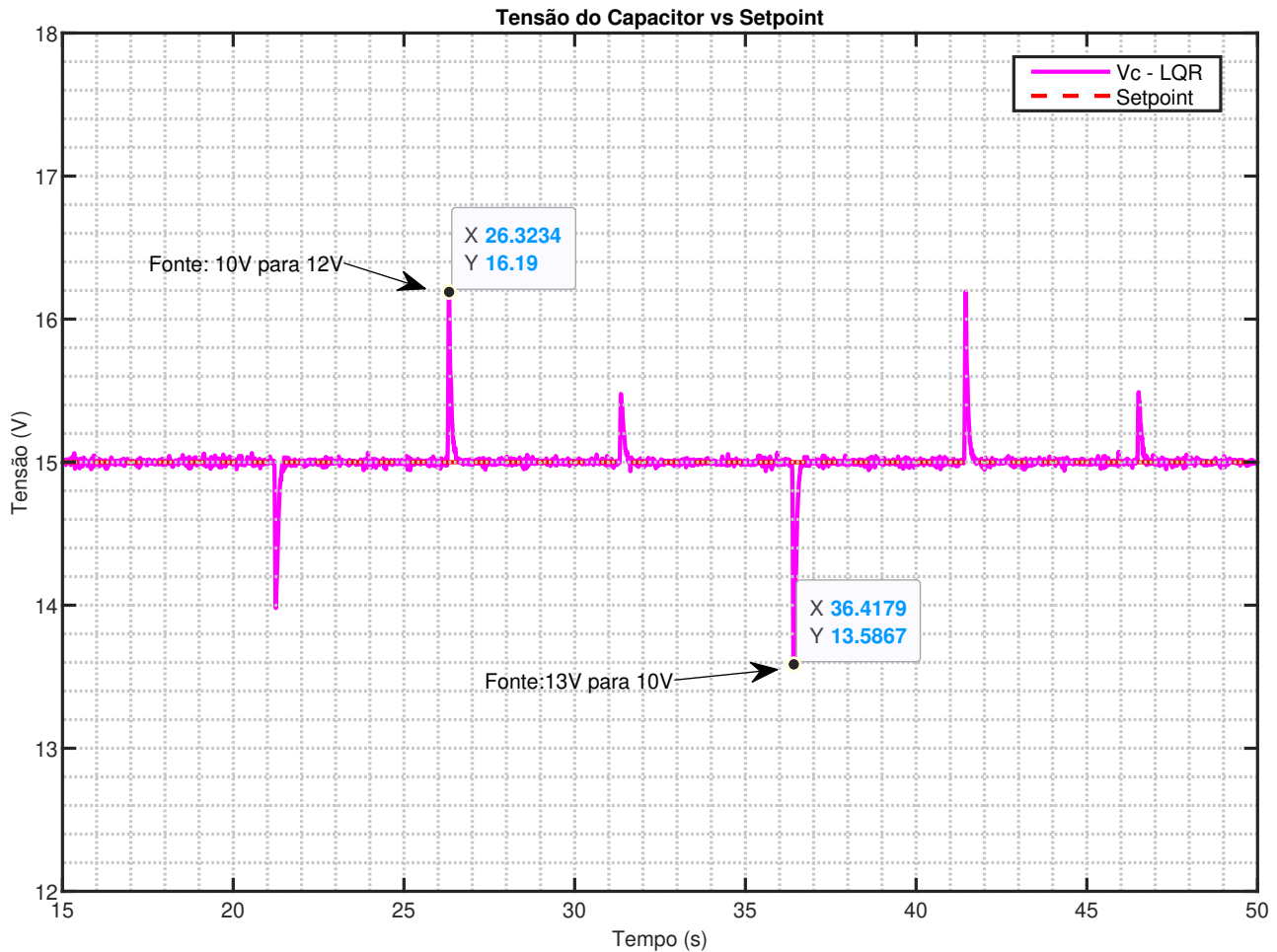


Figura 4.14: Variação da Tensão de Entrada — Controle por LQR - Implementação Experimental.

Por sua vez, quando a tensão de entrada é reduzida de 13 V para 10 V, a tensão do barramento decresce para aproximadamente 13,58 V, representando uma variação negativa de cerca de 9,47%. Esses resultados demonstram que o controlador LQR é capaz de manter a estabilidade do sistema frente a perturbações na tensão de entrada, apresentando um comportamento consistente e adequado sob as condições avaliadas.

Com base nos desvios percentuais observados na tensão do barramento CC durante as variações na tensão de entrada, verifica-se que a estratégia de controle baseada em incertezas politópicas via LMI apresentou o melhor desempenho entre as técnicas avaliadas. Esse método resultou nos menores desvios positivos e negativos em relação ao valor nominal de 15 V, indicando maior capacidade de atenuar os efeitos das perturbações na entrada. As estratégias de controle ótimo LQR e de AP apresentaram desvios mais elevados, sendo o controle por AP o que exibiu as

maiores variações na tensão do barramento. Esses resultados evidenciam a maior robustez da abordagem baseada em LMI para o cenário analisado.

4.7.3 Teste 3: Variação Combinada da Tensão de Entrada e da Carga

Neste terceiro ensaio experimental é avaliada a resposta da microrrede diante de variações combinadas na tensão de entrada e na carga conectada ao conversor Boost, com o objetivo de analisar o comportamento do sistema sob a atuação simultânea de diferentes perturbações. O teste tem início no ponto de operação nominal, com a tensão de entrada ajustada em 12 V, a tensão do barramento CC regulada em 15 V e a carga inicialmente configurada com uma resistência de 27 Ω .

Ao longo do ensaio, a tensão de entrada é inicialmente reduzida de 12 V para 10 V. Em seguida, é acionado um relé que promove a alteração da resistência de carga do conversor Boost de 27 Ω para 16 Ω . Posteriormente, a tensão de entrada retorna ao valor nominal de 12 V e o relé é desativado, restabelecendo a resistência de carga original.

Os resultados experimentais obtidos para esse teste são apresentados nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17, correspondentes, respectivamente, às estratégias de controle por AP, LMI e LQR, permitindo comparar o desempenho e a robustez das diferentes técnicas de controle sob variações simultâneas de entrada e carga.

Na Figura 4.15 é apresentada a resposta da tensão do barramento CC para o caso de variação combinada da tensão de entrada e da carga, considerando a estratégia de controle por AP. No instante da perturbação sinalizada, com a tensão de entrada já estabelecida em 10 V, ocorre a variação da resistência conectada ao barramento CC de 27 Ω para 16 Ω . Essa condição representa o cenário mais crítico de carga para a microrrede analisada, uma vez que há também o acoplamento do conversor buck ao barramento, aumentando a demanda de potência do sistema.

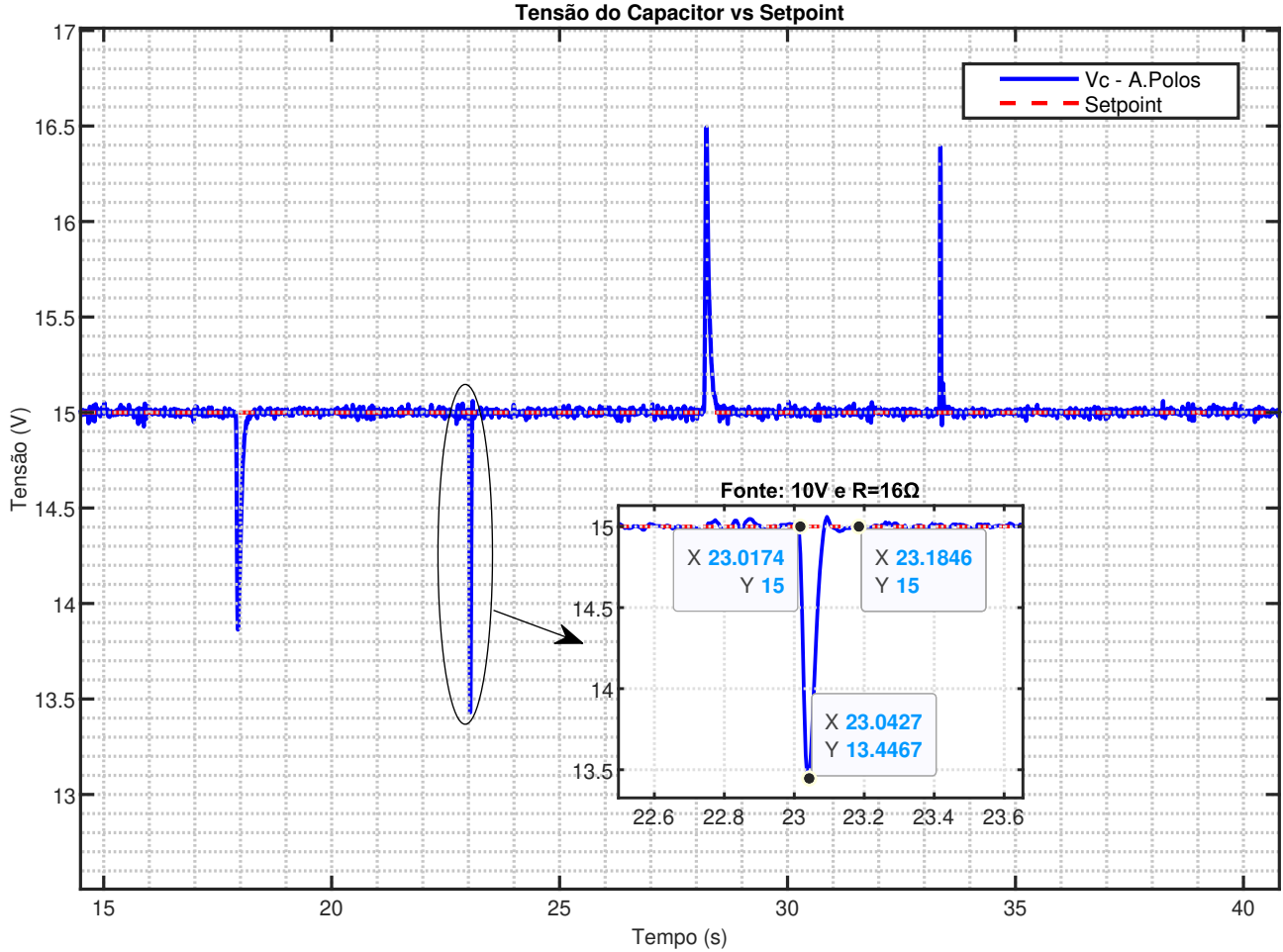


Figura 4.15: Tensão do barramento CC sob variação combinada da tensão de entrada e da carga — Controle baseado em A.Polos - Implementação Experimental.

Como consequência dessa perturbação, observa-se uma queda transitória da tensão do barramento para 13,44 V, o que corresponde a uma variação de aproximadamente 10,4% em relação ao valor nominal de 15 V. Apesar do desvio observado, o sistema permanece estável e o controlador atua de forma eficaz na rejeição da perturbação. A tensão do barramento retorna ao valor de referência de 15 V, apresentando um tempo de acomodação de aproximadamente 0,17 s, calculado entre 23,01 s e 23,18 s, sem a presença de oscilações sustentadas.

Na Figura 4.16 é apresentada a resposta da tensão do barramento CC para a variação combinada da tensão de entrada e da carga, considerando o controle baseado em LMI. No instante da perturbação sinalizada, com a tensão de entrada mantida em 10 V, ocorre a redução da resistência conectada ao barramento de 27 Ω para 16 Ω , caracterizando novamente a condição mais crítica de carregamento da microrrede.

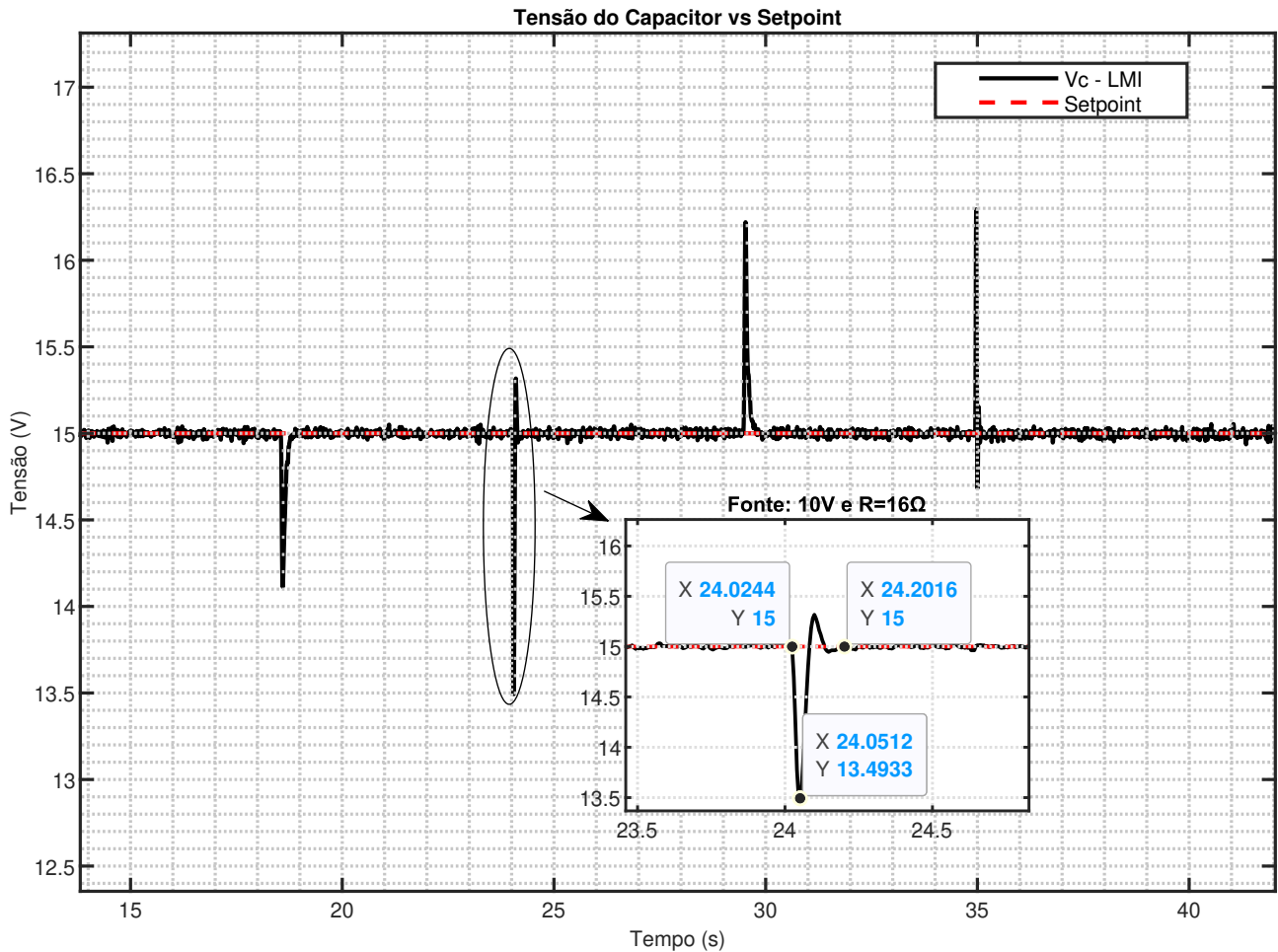


Figura 4.16: Tensão do barramento CC sob variação combinada da tensão de entrada e da carga — Controle baseado em LMI - Implementação Experimental.

Como efeito dessa perturbação, a tensão do barramento apresenta uma queda transitória até 13,49 V, correspondente a aproximadamente 10,1% em relação ao valor nominal de 15 V. Em seguida, o sistema recupera a tensão de referência, atingindo novamente 15 V com um tempo de acomodação de aproximadamente 0,18 s, calculado entre 24,02 s e 24,20 s, sem oscilações persistentes.

Na Figura 4.17 é apresentada a resposta da tensão do barramento CC sob a variação combinada da tensão de entrada e da carga, considerando o controle LQR. No instante da perturbação sinalizada, com a tensão de entrada já fixada em 10 V, a resistência conectada ao barramento CC é reduzida de 27 Ω para 16 Ω, configurando a condição mais severa de carregamento da microrrede.

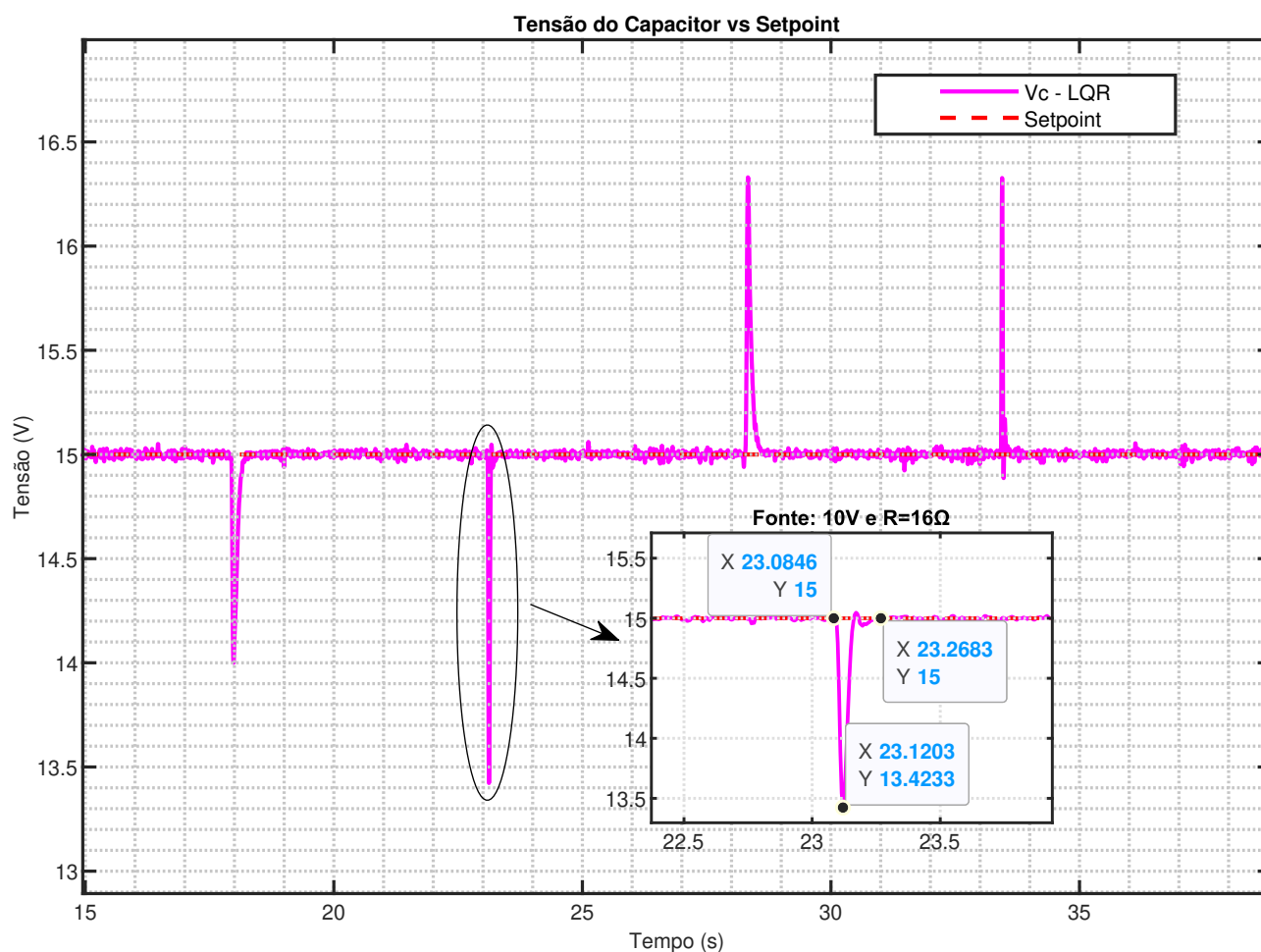


Figura 4.17: Tensão do barramento CC sob variação combinada da tensão de entrada e da carga — Controle LQR - Implementação Experimental.

Em decorrência dessa perturbação, a tensão do barramento sofre uma queda transitória até 13,42 V, o que representa aproximadamente 10,5% em relação ao valor nominal de 15 V. Em seguida, o sistema restabelece a tensão de referência, retornando a 15 V com um tempo de acomodação de aproximadamente 0,18 s, estimado entre 23,08 s e 23,26 s, sem apresentar oscilações sustentadas.

De forma geral, os resultados apresentados nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 demonstram que as três estratégias de controle analisadas são capazes de manter a estabilidade da tensão do barramento CC de 15 V, mesmo sob a condição mais crítica de carregamento, caracterizada pela redução da resistência de 27 Ω para 16 Ω com a tensão de entrada mantida em 10 V. Em todos os casos, os desvios transitórios de tensão permaneceram em torno de 10%, e os tempos de acomodação foram inferiores a 0,2 s, sem a presença de oscilações sustentadas. Esses resultados evidenciam a robustez e a eficácia das estratégias de AP, controle baseado em LMI

e controle LQR frente a variações simultâneas da carga e das condições de operação da microrrede.

4.7.4 Breve Apresentação do Sistema Simulado

Com o objetivo de validar previamente as estratégias de controle antes de sua implementação no ambiente experimental, foram realizadas simulações computacionais dos testes considerados neste trabalho. A Figura 4.18 apresenta a simulação correspondente ao Teste 3, considerando o controlador projetado por meio de LMI. Essa simulação tem como finalidade ilustrar que todos os ensaios experimentais foram previamente avaliados em ambiente de simulação, permitindo uma noção inicial do comportamento dinâmico esperado do sistema.

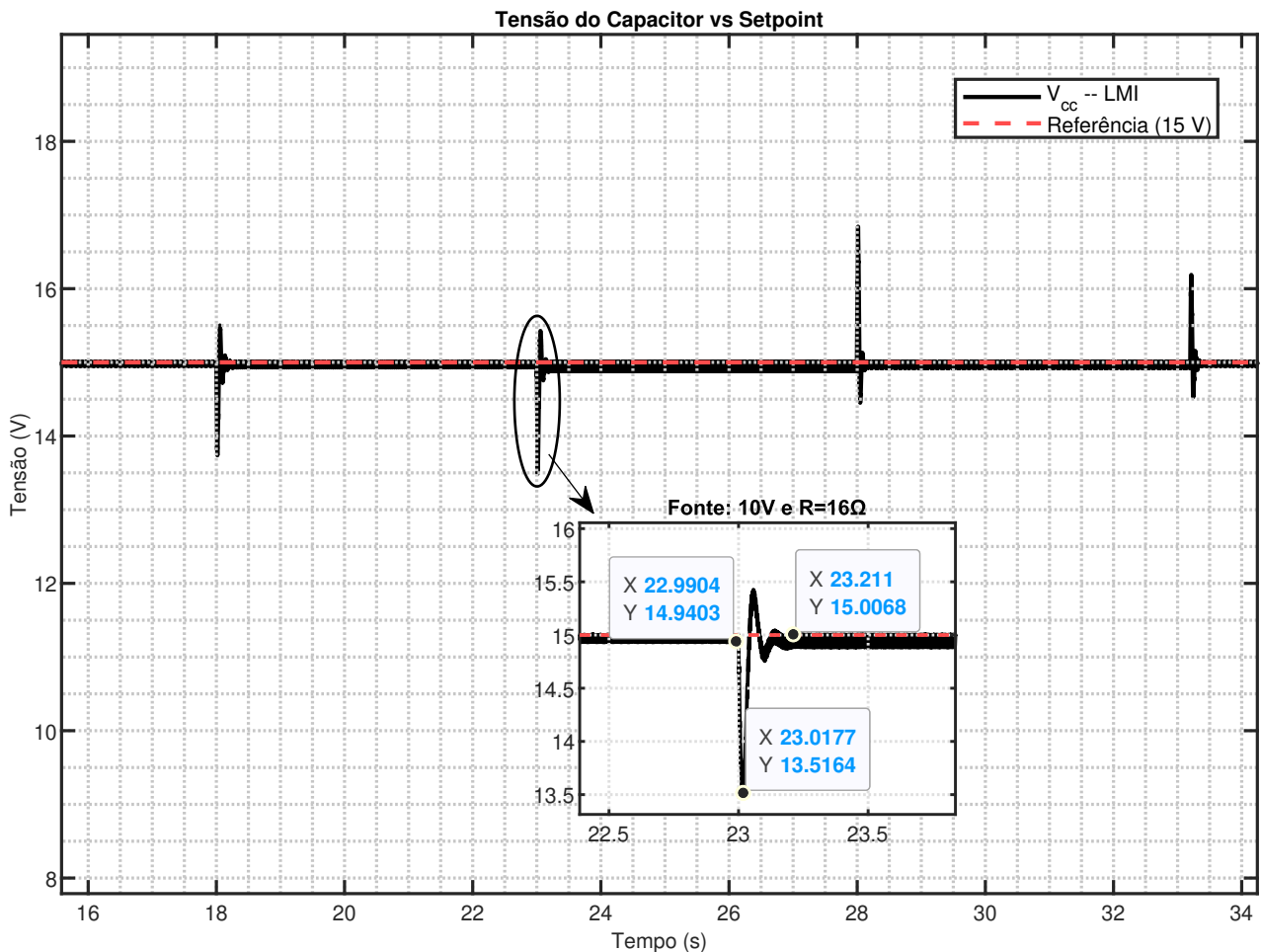


Figura 4.18: Tensão do barramento CC sob variação combinada da tensão de entrada e da carga — Controle LMI - Simulado.

É importante ressaltar que, embora o ambiente de simulação possibilite a aná-

lise preliminar do desempenho dos controladores, existem diferenças inerentes entre o modelo simulado e o sistema real, especialmente em função de não idealidades, atrasos, ruídos de medição e incertezas paramétricas presentes na implementação experimental. Dessa forma, para que a simulação represente de maneira fiel o comportamento do sistema físico, faz-se necessária a configuração cuidadosa do modelo computacional, utilizando valores da planta real o mais próximos possível daqueles empregados na implementação prática.

Cabe destacar que o foco principal desta pesquisa está na aplicação e validação de técnicas robustas de controle em um sistema real de microrrede CC. Por esse motivo, não são apresentados de forma extensiva os resultados obtidos exclusivamente em ambiente de simulação. Ademais, observou-se que os resultados simulados apresentaram elevada similaridade com os resultados experimentais, o que reforça a coerência entre o modelo matemático adotado e o sistema físico implementado.

Como exemplo dessa correspondência, durante a simulação do cenário em que a tensão da fonte é reduzida para 10 V e a resistência de carga é alterada para $16\ \Omega$ — procedimento análogo ao descrito no Teste 3 experimental —, a tensão do barramento CC apresentou um valor mínimo de aproximadamente $13,51\text{ V}$. Esse resultado é bastante próximo ao valor observado experimentalmente, da ordem de $13,49\text{ V}$. De forma semelhante, o tempo de acomodação foi da ordem de $0,22\text{ s}$ no ambiente de simulação e aproximadamente $0,18\text{ s}$ no sistema experimental, evidenciando a boa aderência entre a simulação e o comportamento real do sistema.

4.7.5 Teste 4: Índices de Desempenho

Nesta seção, realiza-se a avaliação quantitativa do desempenho dos métodos de controle aplicados ao conversor *Boost*, utilizando quatro índices clássicos de desempenho no domínio do tempo. Esses índices permitem comparar a qualidade da resposta dinâmica do sistema a partir de diferentes critérios.

Os índices de desempenho analisados neste capítulo são calculados a partir dos resultados experimentais obtidos nos Testes 2 e 3. Esses ensaios contemplam, respectivamente, variações na tensão de entrada e perturbações combinadas de tensão e carga, permitindo avaliar de forma consistente o comportamento dinâmico e o esforço de controle das estratégias analisadas sob diferentes condições.

A Tabela 4.3 apresenta a coleta dos índices de desempenho Integral of Squared Error (ISE), Integral of Absolute Error (IAE), Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) e Integral of the Squared Control Signal (ISCS) obtidos a partir dos resultados experimentais do Teste 2, no qual é avaliada a resposta do sistema sob variação da tensão de entrada.

Tabela 4.3: Índices de desempenho ISE referentes ao Teste 2, sob variação da tensão de entrada.

Controlador	ISE	IAE	ITAE	ISCS
AP	0,503608	0,860446	29,366236	3,607060
LMI	0,248912	0,609101	20,565571	3,656059
LQR	0,394853	0,819784	27,497537	3,617137

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.3, observa-se que o controlador baseado em LMI apresenta os menores valores para os índices ISE, IAE e ITAE no Teste 2, indicando melhor desempenho em termos de erro de rastreamento e amortecimento da resposta frente a variações na tensão de entrada. Os controladores AP e LQR apresentam valores mais elevados desses índices, com desempenhos relativamente próximos entre si. No que se refere ao índice ISCS, associado ao esforço de controle, nota-se que os três controladores demandam níveis semelhantes de atuação, com diferenças pouco significativas entre as estratégias avaliadas.

A Tabela 4.4 apresenta a coleta dos índices de desempenho ISE, IAE, ITAE e ISCS obtidos a partir dos resultados experimentais do Teste 3, no qual é avaliada a resposta do sistema sob variações combinadas da tensão de entrada e da carga conectada.

Tabela 4.4: Índices de desempenho obtidos no Teste 3, sob variações combinadas da tensão de entrada e da carga.

Controlador	ISE	IAE	ITAE	ISCS
AP	0,319401	0,515048	12,965630	3,460413
LMI	0,208215	0,454474	12,019669	3,578646
LQR	0,265726	0,470366	11,953011	3,479670

De forma análoga, os resultados apresentados na Tabela 4.4 evidenciam que,

sob variações combinadas da tensão de entrada e da carga, o controlador LMI mantém desempenho superior nos índices ISE e IAE, enquanto os controladores AP e LQR apresentam valores próximos entre si. Para o índice ITAE, observa-se que os controladores LMI e LQR apresentam valores bastante semelhantes e inferiores ao obtido pelo controlador AP, indicando menor persistência do erro ao longo do tempo. Em relação ao índice ISCS, os valores obtidos permanecem próximos para as três estratégias, evidenciando que o aumento da complexidade das perturbações não resulta em diferenças expressivas no esforço de controle exigido.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam a comparação normalizada dos índices de desempenho ISE, IAE, ITAE e ISCS obtidos durante a realização dos Testes 2 e 3, respectivamente. Os valores representados nessas figuras correspondem aos índices apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, os quais foram normalizados com o objetivo de permitir uma comparação direta entre os diferentes critérios de desempenho e entre as estratégias de controle avaliadas.

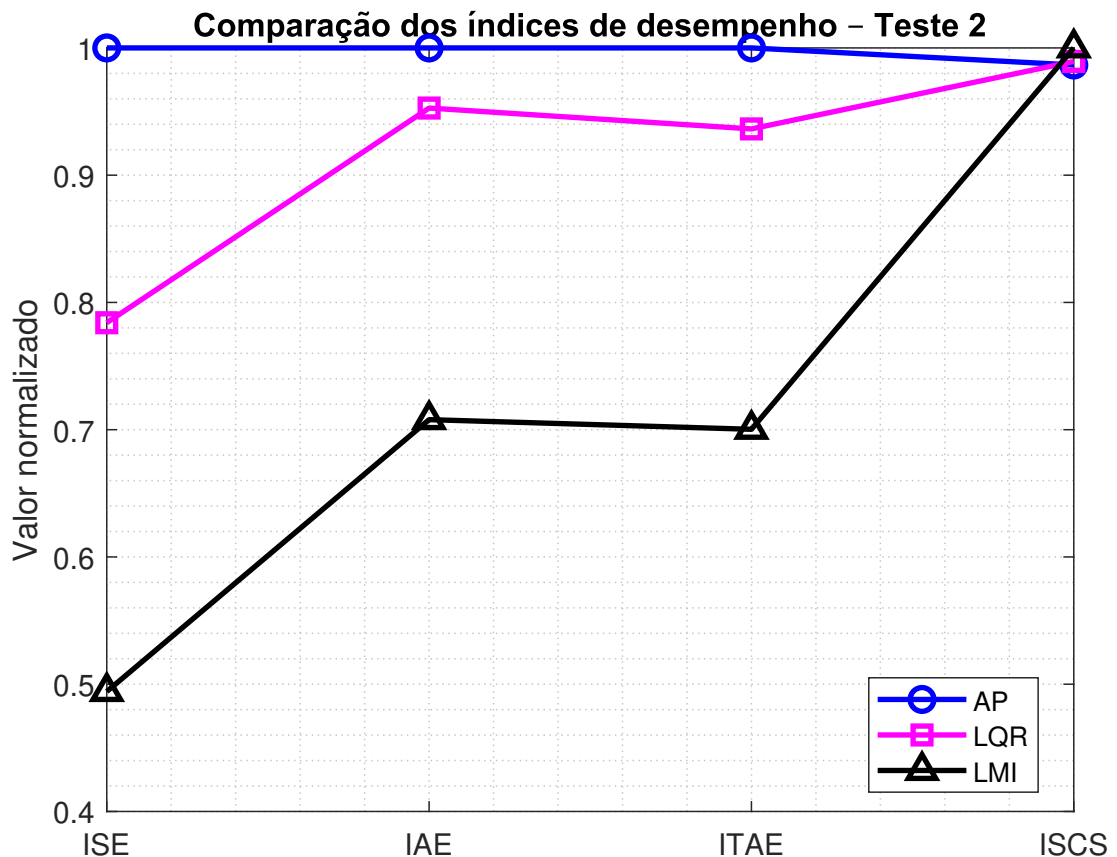


Figura 4.19: Índices de desempenho ISE, IAE, ITAE e ISCS referentes ao Teste 2, no qual é avaliada a resposta do sistema sob variação da tensão de entrada.

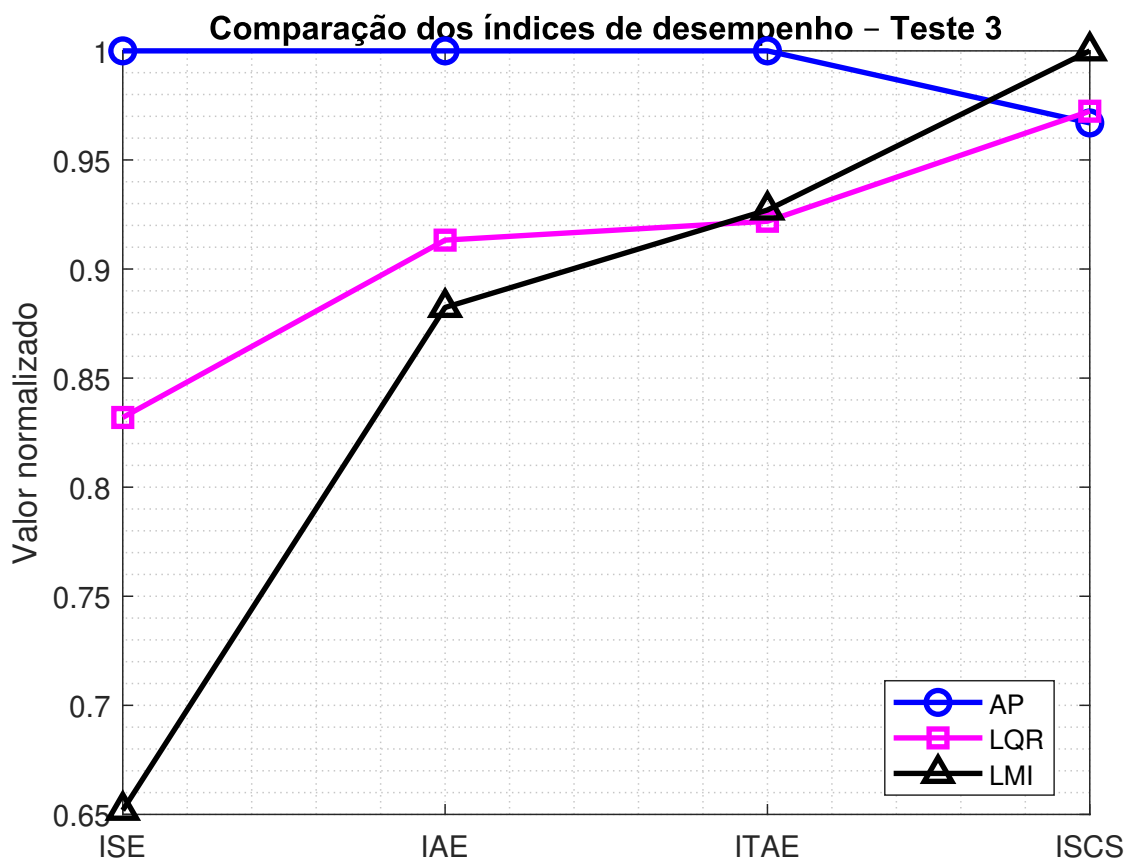


Figura 4.20: Índices de desempenho ISE, IAE, ITAE e ISCS referentes ao Teste 3, no qual é avaliada a resposta do sistema sob variações combinadas da tensão de entrada e da carga conectada.

Essa forma de representação gráfica possibilita uma análise conjunta do comportamento dinâmico dos controladores, considerando simultaneamente aspectos relacionados à precisão de rastreamento (ISE e IAE), à penalização de erros persistentes ao longo do tempo (ITAE) e ao esforço de controle requerido (ISCS). Dessa maneira, as figuras fornecem uma visão integrada do desempenho relativo de cada estratégia frente às perturbações impostas em cada ensaio experimental.

Por meio dessa análise comparativa, torna-se possível identificar o compromisso entre desempenho dinâmico e custo de controle adotado por cada controlador, bem como avaliar sua robustez frente às variações de tensão de entrada e às perturbações combinadas de tensão e carga. Assim, as representações gráficas complementam a análise numérica apresentada nas tabelas, evidenciando de forma clara as diferenças e semelhanças no comportamento dos controladores durante os Testes 2 e 3.

4.7.5.1 Análise dos Índices de Desempenho — Teste 2

A Figura 4.19 apresenta a comparação normalizada dos índices de desempenho ISE, IAE, ITAE e ISCS para os controladores AP, LQR e LMI, considerando o Teste 2, no qual o sistema é submetido a variações na tensão de entrada.

Observa-se que o controlador baseado em LMI apresenta os menores valores normalizados de ISE, IAE e ITAE, indicando melhor desempenho em termos de erro de seguimento e amortecimento da resposta. Os controladores LQR e AP apresentam desempenhos semelhantes entre si, porém com índices de erro superiores aos obtidos com o controlador LMI.

Quanto ao índice ISCS, os três controladores demandam níveis de esforço de controle próximos, com uma leve elevação associada ao controlador LMI. Esse resultado evidencia que o melhor desempenho dinâmico obtido por essa estratégia é alcançado com um aumento marginal no esforço de atuação.

4.7.5.2 Análise dos Índices de Desempenho — Teste 3

A Figura 4.20 apresenta a comparação normalizada dos índices de desempenho para o Teste 3, no qual o sistema é submetido simultaneamente a variações na tensão de entrada e na carga, caracterizando uma condição operacional mais severa.

Nesse cenário, os controladores mantêm valores reduzidos de ISE e IAE, indicando estabilidade mesmo sob perturbações combinadas. O controlador LMI apresenta o menor valor de ISE, enquanto os controladores LMI e LQR exibem valores próximos de ITAE, refletindo respostas com características dinâmicas semelhantes quanto à eliminação de erros persistentes.

Em relação ao ISCS, os valores permanecem próximos entre as estratégias, com ligeiro aumento associado ao controlador LMI, compatível com o desempenho superior observado nos índices de erro.

4.7.6 Análise Comparativa Global

A análise conjunta dos índices de desempenho obtidos nos Testes 2 e 3 evidencia que o controlador baseado em LMI apresenta o melhor desempenho global, especialmente em termos de precisão de rastreamento e robustez frente a perturbações. O controlador LQR destaca-se como uma alternativa equilibrada, com bom

compromisso entre desempenho e esforço de controle, enquanto o controlador por AP apresenta maiores índices de erro, sobretudo em condições mais severas de operação.

Esses resultados confirmam a eficácia da abordagem baseada em múltiplos índices de desempenho para a avaliação comparativa das estratégias de controle investigadas.

4.8 Análise de Estabilidade e Regiões D

Esta seção apresenta uma análise complementar de estabilidade dos sistemas em malha fechada, com base no conceito de regiões D no plano complexo. O objetivo é avaliar a robustez e o posicionamento dos polos associados aos controladores projetados via LMI, bem como verificar a localização dos polos obtidos pelos controladores LQR e por AP em relação à região de estabilidade especificada. Essa análise fornece uma interpretação geométrica dos resultados experimentais discutidos anteriormente, contribuindo para uma comparação mais abrangente entre as estratégias de controle investigadas.

Ressalta-se que, embora a implementação dos controladores tenha sido realizada em tempo discreto, a análise de estabilidade apresentada nesta seção é conduzida no domínio contínuo, conforme a formulação clássica baseada em LMI. Tal abordagem é válida considerando que o sistema físico é inerentemente contínuo e que a implementação digital do controlador, realizada por meio de retenção de ordem zero e com período de amostragem reduzido, constitui uma aproximação da lei de controle contínua projetada. Dessa forma, a análise no plano complexo S representa adequadamente as dinâmicas dominantes do sistema em malha fechada, sendo coerente com os resultados observados experimentalmente.

4.8.1 Conceito de Região D Aplicada ao Projeto Via LMI

No contexto do controle baseado em desigualdades matriciais lineares, o conceito de região D é empregado como uma ferramenta para impor restrições geométricas à localização dos polos do sistema em malha fechada. Essa abordagem permite especificar regiões admissíveis no plano complexo, associadas a requisitos mínimos de estabilidade e desempenho dinâmico, como taxa de amortecimento e velocidade

de resposta. No presente trabalho, a região D é utilizada como critério adicional no projeto dos controladores via LMI, garantindo que os polos do sistema permaneçam confinados a uma área previamente definida, mesmo na presença de incertezas paramétricas consideradas no modelo.

4.8.2 Análise da Região D e Posicionamento dos Polos em Malha Fechada

Nesta subseção é apresentada a análise da região D especificada no projeto via LMI, bem como o posicionamento dos polos dos sistemas em malha fechada obtidos pelos diferentes métodos de projeto de controle considerados neste trabalho. A região D foi definida no plano complexo a partir de restrições geométricas que combinam limites de taxa de decaimento exponencial e amortecimento mínimo, permitindo avaliar a robustez dinâmica dos controladores sob uma interpretação geométrica unificada.

A região D adotada possui a forma de um trapézio no semiplano esquerdo, sendo delimitada por duas retas verticais associadas aos limites de decaimento real, definidos por $\alpha = -40$ e $\alpha = -500$, e por duas semirretas inclinadas que formam uma região em “V”, associadas a um ângulo de abertura de $\theta = 69,03^\circ$. Essa configuração impõe simultaneamente requisitos de rapidez de resposta e amortecimento mínimo, assegurando polos suficientemente afastados do eixo imaginário e evitando dinâmicas excessivamente oscilatórias.

A Figura 4.21 apresenta a região D especificada e o posicionamento dos polos do sistema em malha fechada obtidos a partir do controlador projetado via LMI. Observa-se que todos os polos permanecem integralmente contidos no interior da região D, mesmo considerando variações nos parâmetros do sistema. Esse resultado confirma que o controlador LMI atende explicitamente às restrições de desempenho impostas no projeto, garantindo estabilidade robusta, taxa mínima de decaimento e adequado nível de amortecimento, conforme previsto teoricamente pelo método.

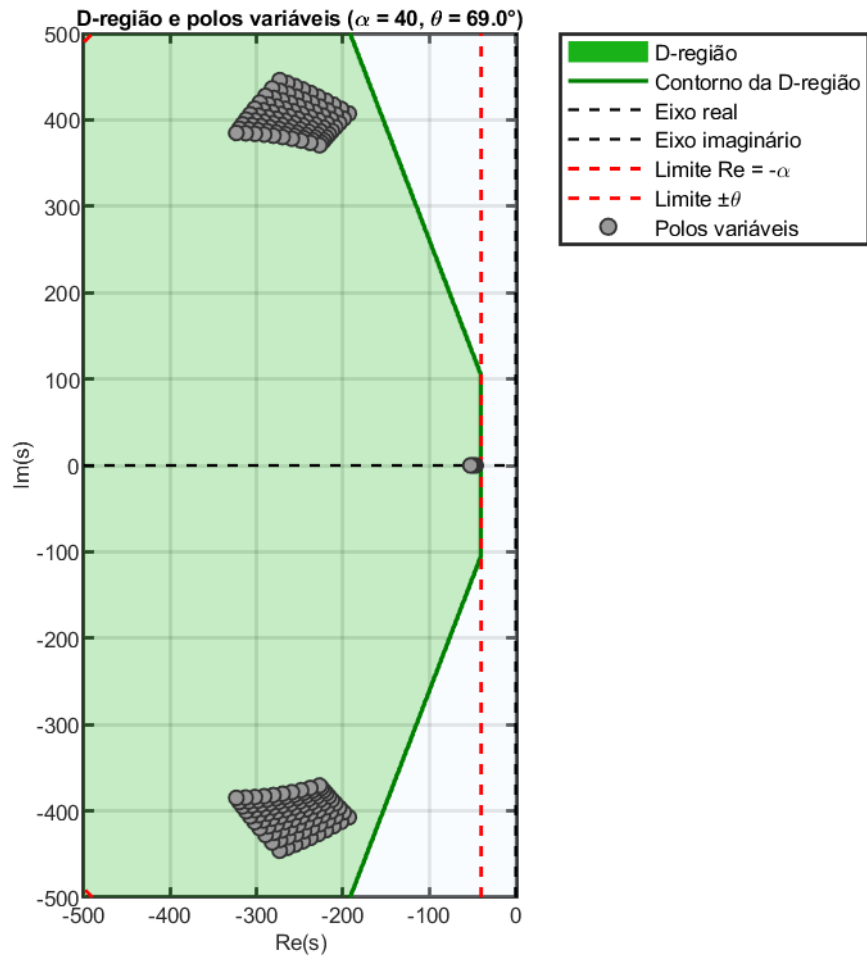


Figura 4.21: Região D especificada no projeto via LMI e posicionamento dos polos do sistema em malha fechada obtidos pelo controlador projetado por LMI.

Na Figura 4.22 é ilustrado o posicionamento dos polos do sistema em malha fechada obtidos por meio da metodologia de AP, considerando a mesma região D definida no projeto via LMI. Nota-se que, embora a maioria dos polos permaneça dentro da região especificada, observa-se a presença de polos localizados fora dos limites da D-região. Esse comportamento indica que, apesar de o sistema permanecer estável no sentido clássico, nem todos os requisitos de desempenho dinâmico impostos pela região D são satisfeitos, podendo resultar em respostas com menor amortecimento ou maior sensibilidade a variações paramétricas.

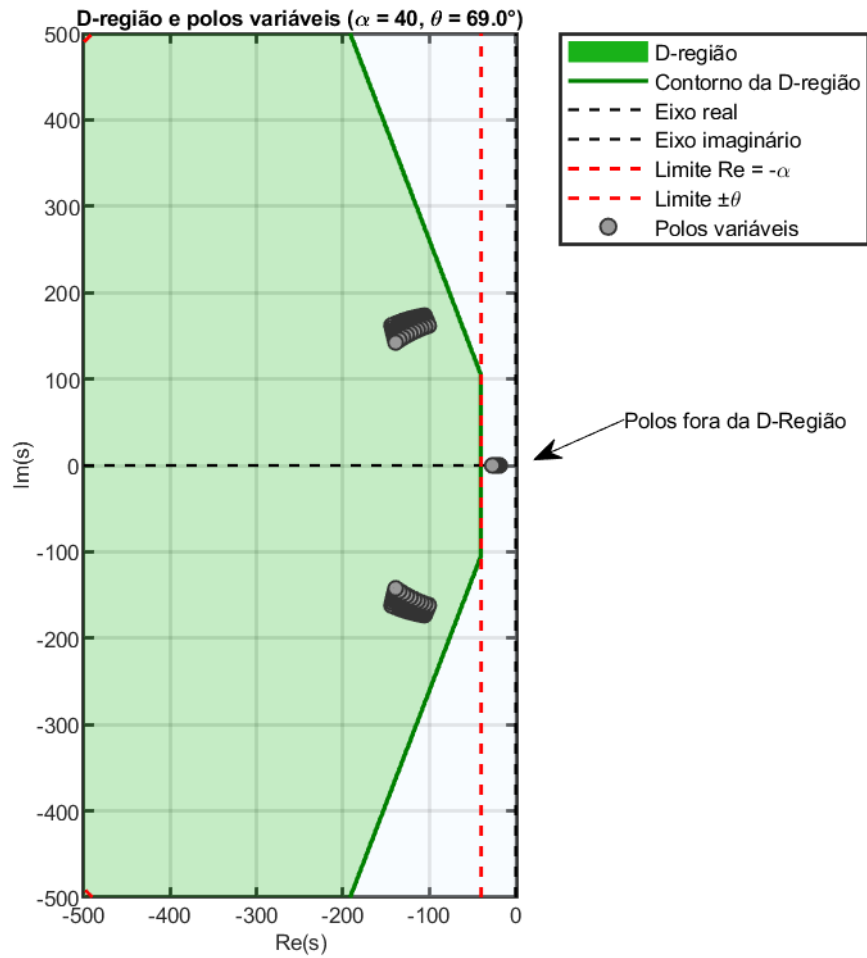


Figura 4.22: Região D especificada no projeto via LMI e posicionamento dos polos do sistema em malha fechada obtidos pelo controlador projetado por Alocação de polos.

De forma semelhante, a Figura 4.23 apresenta o posicionamento dos polos obtidos com o controlador projetado via LQR. Verifica-se novamente a existência de polos fora da região D especificada, evidenciando que o critério de otimização quadrática do LQR, embora eficiente em termos de compromisso entre esforço de controle e desempenho, não garante explicitamente o atendimento às restrições geométricas associadas à região D. Como consequência, determinadas dinâmicas do sistema podem apresentar respostas menos amortecidas ou com menor margem de robustez quando comparadas ao projeto via LMI.

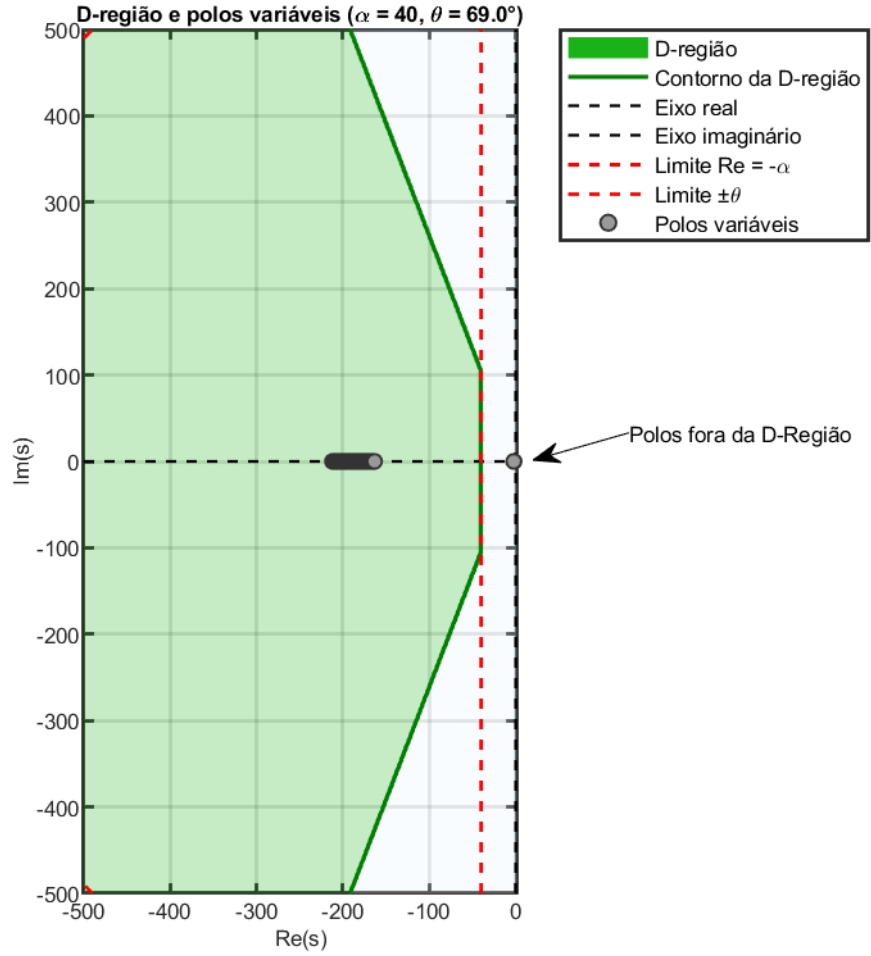


Figura 4.23: Região D especificada no projeto via LMI e posicionamento dos polos do sistema em malha fechada obtidos pelo controlador projetado por LQR.

De maneira geral, a análise conjunta das Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 evidencia que apenas o controlador projetado via LMI assegura que todos os polos do sistema em malha fechada permaneçam estritamente dentro da região D previamente especificada. Esse resultado reforça a principal vantagem do método LMI, que permite incorporar diretamente restrições de desempenho e robustez no processo de síntese do controlador. Por outro lado, os métodos de AP e LQR, apesar de garantirem estabilidade, não asseguram explicitamente o cumprimento dessas restrições, o que se reflete na presença de polos fora da região admissível e em possíveis diferenças no comportamento dinâmico observadas nos ensaios experimentais apresentados anteriormente.

Capítulo 5

Conclusão do Estudo

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo a avaliação comparativa de diferentes estratégias de controle aplicadas a uma microrrede isolada em corrente contínua, com ênfase na análise da estabilidade e do desempenho dinâmico do sistema frente a variações operacionais típicas, tais como mudanças na tensão de referência, variações da tensão de entrada e perturbações de carga. Para esse fim, foram investigadas as técnicas de Alocação de Polos, Regulador Linear Quadrático (LQR) e controle robusto baseado em Desigualdades Matriciais Lineares (LMI), considerando critérios clássicos de desempenho no domínio do tempo e restrições de estabilidade impostas por regiões D.

A implementação experimental dos controladores permitiu validar as metodologias de projeto propostas e analisar o comportamento do sistema real sob diferentes condições de operação. Os resultados obtidos demonstram que todas as estratégias avaliadas foram capazes de manter a estabilidade do barramento CC ao longo dos ensaios realizados, confirmando a viabilidade de aplicação dos métodos estudados no contexto de microrredes em corrente contínua.

A análise quantitativa dos resultados experimentais, apresentada no Capítulo 4, evidenciou diferenças relevantes entre os controladores em termos de magnitude dos desvios transitórios, tempos de acomodação e índices de desempenho. Nos Testes 2 e 3, mesmo sob variações significativas da tensão de entrada e da carga, a tensão do barramento CC permaneceu regulada em torno de 15 V para todas as estratégias.

Contudo, o controlador baseado em LMI apresentou, de forma consistente, menores valores dos índices ISE, IAE e ITAE, refletindo menor erro acumulado e respostas mais bem amortecidas.

No Teste 2, sob variação da tensão de entrada, o controle via LMI apresentou reduções da ordem de 40% a 50% no índice ISE em relação à Alocação de Polos, enquanto o controlador LQR apresentou desempenho intermediário. No Teste 3, que representa a condição operacional mais severa, com perturbações simultâneas de tensão e carga, o controlador LMI novamente apresentou os menores índices de erro, ao passo que LMI e LQR exibiram tempos de acomodação semelhantes, ambos inferiores a 0,2 s. Em todos os ensaios, o índice ISCS manteve-se da mesma ordem de grandeza entre os controladores, indicando que as diferenças de desempenho não estiveram associadas a variações significativas no esforço de controle.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam que o controle robusto baseado em LMI apresenta o melhor desempenho global, caracterizado por maior precisão de rastreamento, melhor amortecimento da resposta e maior robustez frente a perturbações e incertezas operacionais. O controlador LQR mostrou-se uma alternativa equilibrada, com bom compromisso entre desempenho dinâmico e esforço de controle, enquanto a técnica de Alocação de Polos, embora estável e eficaz, apresentou maiores índices de erro e maior sensibilidade a variações abruptas das condições de operação.

Assim, este trabalho evidencia a relevância do uso de técnicas de controle robusto baseadas em LMI para aplicações em microrredes em corrente contínua, especialmente em cenários sujeitos a incertezas paramétricas e variações operacionais, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas mais estáveis, confiáveis e com melhor desempenho dinâmico.

5.1.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, propõe-se a ampliação da estrutura experimental por meio da implementação de um conversor bidirecional Buck–Boost associado a um sistema de armazenamento de energia. Essa extensão permitirá avaliar de forma mais abrangente a influência da atuação da bateria na regulação da tensão do barramento CC e no desempenho dinâmico da microrrede.

Espera-se que a ação coordenada do conversor bidirecional e do sistema de armazenamento contribua para uma maior atenuação das variações de tensão, bem como para uma melhoria adicional da estabilidade global do sistema, especialmente sob condições de operação mais severas.

Adicionalmente, a investigação de novos cenários operacionais, como diferentes perfis de carga e fontes de geração, assim como a aplicação de outras estratégias de controle avançado, poderá ampliar a compreensão sobre o desempenho, a robustez e a aplicabilidade prática de microrredes em corrente contínua em sistemas reais.

5.2 Artigos Publicados e/ou Submetidos

- **Título:** Avaliação de uma Arquitetura de Microrrede CC como Solução Energética Sustentável para Comunidades Isoladas no Amazonas.

Evento: XI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2025), realizado entre os dias 29 de julho e 1º de agosto de 2025 em São João del-Rei, Minas Gerais.

Tipo: Artigo de conferência.

Referências Bibliográficas

- [1] MARQUES, S. A., KNAK NETO, N., “Análise da viabilidade da implementação de microrredes em corrente contínua na região Sul e região Amazônica do Brasil”, *SEPOC 2022*, 2022.
- [2] MONFARED, M. N., KAWANO, Y., CUCUZZELLA, M., “Decentralized Voltage Control of Boost Converters in DC Microgrids: Feasibility Guarantees”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 33, pp. 3–15, 2025.
- [3] MOKHTAR, M., MAREI, M., EL-SATTAR, A. A., “An Adaptive Droop Control Scheme for DC Microgrids Integrating Sliding Mode Voltage and Current Controlled Boost Converters”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 10, pp. 1685–1693, 2019.
- [4] BRAITOR, A.-C., KONSTANTOPOULOS, G., KADIRKAMANATHAN, V., “Current-Limiting Droop Control Design and Stability Analysis for Parallel Boost Converters in DC Microgrids”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 29, pp. 385–394, 2020.
- [5] LIU, Y., WEN, M., ZHANG, X., et al., “Small-Signal Analysis and Comparative Simulation of Control Techniques for Boost Converter Circuits”. In: *2024 3rd International Conference on Energy and Electrical Power Systems (ICEEPS)*, pp. 1188–1193, 2024.
- [6] AGRAWAL, N., SAMANTA, S., GHOSH, S., “Modified LQR Technique for Fuel-Cell-Integrated Boost Converter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 68, n. 7, pp. 5887–5896, 2021.

- [7] SONI, S. K., SINGH, S., SINGH, K. A., et al., “Event-Triggered Control for LPV Modeling of DC–DC Boost Converter”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, v. 70, n. 6, pp. 2062–2066, 2023.
- [8] AFSHARINEJAD, A., DEHGHANI, M., ASEMANI, M. H., et al., “Advanced Control of DC Grid-Connected Proton Exchange Membrane Fuel Cell: A Linear Parameter Varying Approach”. In: *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1–6, 2021.
- [9] DE BESSA, I. V., DE MEDEIROS, R. L., BESSA, I., et al., “Comparative study of control strategies for stabilization and performance improvement of DC Microgrids with a CPL connected”, *Energies*, v. 13, n. 10, pp. 2663, 2020.
- [10] DUAN, G.-R., YU, H.-H., *LMIs in Control Systems: Analysis, Design and Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [11] CARLI, R., CAVONE, G., PIPPIA, T., et al., “Robust Optimal Control for Demand Side Management of Multi-Carrier Microgrids”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 19, n. 3, pp. 1338–1351, 2022.
- [12] SHOBUG, M. A., ALAMGIR HOSSAIN, M., YANG, F., et al., “Dynamic Control of Isolated Network Microgrids: A Resilient Backpropagation Neural Network-Based Virtual Inertia Control Approach”, *IEEE Access*, v. 13, pp. 99939–99956, 2025.
- [13] ISWANTO, RAHARJA, N. M., MA’ARIF, A., et al., “Pole Placement Based State Feedback for DC Motor Position Control”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1783, 2021.
- [14] AGUIRRE, L. A., *Enciclopédia de Automática: Controle e Automação*. 1st ed., v. 1. Editora Blucher: São Paulo, SP, Brasil, 2007, Páginas 86–91.
- [15] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), “Amazon Energy Program”, Página web, 2025, Programa visando modernizar o suprimento de energia em comunidades isoladas na Amazônia Legal (cerca de 3 milhões de pessoas em 211 localidades) e reduzir dependência de geração a diesel.

- [16] CANAL SOLAR, “Solar energy benefits more than 150 thousand consumers in the Legal Amazon”, Online news article, 2024, More than 150 000 residents of remote areas of the Legal Amazon have received electricity through solar energy via the Luz Para Todos program; goal is to serve about 900 000 by 2026.
- [17] MAHMOUD, M. S., (ed), *Microgrid: Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration*. Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier: Oxford, United Kingdom, 2017, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Systems Engineering Department, Dhahran, Saudi Arabia.
- [18] BEVRANI, H., “An Updated Microgrid Hierarchical Control Scheme”. In: *2023 10th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE)*, pp. 239–243, 2023.
- [19] FERRARI, F., RUGGERI, F., *Diseño y construcción de una microrred de cc*, Ph.D. Thesis, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería; Argentina, 2022.
- [20] ABBASI, A. R., BALEANU, D., “Recent developments of energy management strategies in microgrids: An updated and comprehensive review and classification”, *Energy Conversion and Management*, v. 297, pp. 117723, 2023.
- [21] PEREIRA, G. H. P., “Aplicação de técnicas de controle robusto ao problema de eletromobilidade em comunidades na Amazônia”, 2025.
- [22] UDDIN, M., MO, H., DONG, D., et al., “Microgrids: A review, outstanding issues and future trends”, *Energy Strategy Reviews*, v. 49, pp. 101127, 2023.
- [23] WANG, Y., LI, Q., LI, B., et al., “A Practical DC Fault Ride-Through Method for MMC Based MVDC Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 36, n. 4, pp. 2510–2519, 2020.
- [24] PARK, J.-D., CANDELARIA, J., MA, L., et al., “DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 4, pp. 2574–2584, 2013.

- [25] MOHAN, F., SASIDHARAN, N., “DC Microgrid and its Protection – A Review”. In: *2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, pp. 1–6, IEEE, 2020.
- [26] BALOG, R. S., KREIN, P. T., “Bus selection in multibus DC microgrids”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 26, n. 3, pp. 860–867, 2010.
- [27] JITHIN, K., HARIDEV, P. P., MAYADEVI, N., et al., “A Review on Challenges in DC Microgrid Planning and Implementation”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, v. 11, n. 5, pp. 1375–1395, 2023.
- [28] AHMED, S., ALI, A., AHMED ANSARI, J., et al., “A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic Systems: Scope, Technologies, Applications, Progress, Challenges, and Recommendations”, *IEEE Access*, v. 13, pp. 69723–69750, 2025.
- [29] SILVA, L., VIGODERIS, R., “Estudo da viabilidade para instalação eletrogeradores termossolares no município de Garanhuns, Pernambuco”, *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 11, pp. 347, 01 2022.
- [30] SILVA, M., *Modelado y estudio del impacto de sombras sobre paneles solares fotovoltaicos*, Ph.D. Thesis, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería; Argentina, 2020.
- [31] DEUS, F. R. A. D., “Estudo comparativo entre técnicas de controle aplicadas em um conversor Buck.” 2018.
- [32] VILELA, A. O. R., “Projeto e construção de um conversor boost controlado em modo de tensão”, *Universidade Federal de Viçosa*, pp. 26, 2011.
- [33] RANINGA, D., RADHAKRISHNAN, T. K., VELSWAMY, K., “Optimal Linearization–Based Computationally Proficient Predictive Control of MIMO Nonlinear System Using Least Square Support Vector Machine”, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, v. 20, n. 3, pp. e70006, 2025.
- [34] MENDES, R. P., OTHERS, “Digitally driven control for inductive buck converters in portable battery-powered applications”, 2024.

- [35] GAO, F., KANG, R., CAO, J., et al., “Primary and secondary control in DC microgrids: a review”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, v. 7, n. 2, pp. 227–242, 2019.
- [36] OLIVARES, D., MEHRIZI-SANI, A., ETEMADI, A., et al., “Trends in microgrid control”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 4, pp. 1905–1919, 2014.
- [37] AL-ISMAIL, F. S., “DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review”, *IEEE Access*, v. 9, pp. 36154–36172, 2021.
- [38] PENG, J., FAN, B., YANG, Q., et al., “Distributed Event-Triggered Control of DC Microgrids”, *IEEE Systems Journal*, v. 15, n. 2, pp. 2504–2514, 2021.
- [39] XU, Q., VAFAMAND, N., CHEN, L., et al., “Review on Advanced Control Technologies for Bidirectional DC/DC Converters in DC Microgrids”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 9, n. 2, pp. 1205–1221, 2021.
- [40] NISE, N. S., *Control Systems Engineering*. John Wiley & Sons, 2020.
- [41] CASTRUCCI, P. B. D. L., BITTAR, A., SALES, R. M., *Controle Automático*. 2nd ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos: Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [42] BABIARZ, A., CZORNIK, A., MAKAROV, E., et al., “Pole Placement Theorem for Discrete Time-Varying Linear Systems”, *SIAM Journal on Control and Optimization*, v. 55, n. 2, pp. 671–692, 2017.
- [43] BJÖRK, T., KHAPKO, M., MURGOCI, A., “The Linear Quadratic Regulator”, In: *Time-Inconsistent Control Theory with Finance Applications*, pp. 23–25, Springer International Publishing: Cham, 2021.
- [44] ITECH Electronic Co., Ltd., *IT6722 Series DC Power Supply – User Manual*, 2017, Available at: <https://www.manualslib.com/manual/1321107/Itech-It6722.html>. Accessed: Jan. 2026.