



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Aplicação de técnicas de controle robusto ao problema de eletromobilidade
em comunidades isoladas na Amazônia**

GABRIEL HENRIQUE PRINTES PEREIRA

MANAUS-AM

2025

GABRIEL HENRIQUE PRINTES PEREIRA

Aplicação de técnicas de controle robusto ao problema de eletromobilidade em
comunidades isoladas na Amazônia

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica da Uni-
versidade 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. Iury Valente de Bessa

MANAUS-AM

2025

Ficha Catalográfica

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

- P436a Pereira, Gabriel Henrique Printes
 Aplicação de técnicas de controle robusto ao problema de
 eletromobilidade em comunidades isoladas na Amazônia / Gabriel
 Henrique Printes Pereira. - 2025.
 116 f. ; 31 cm.
- Orientador(a): Renan Landau Paiva de Medeiros.
 Coorientador(a): Iury de Bessa Valente.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
 de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Manaus, 2025.
1. Controle Robusto. 2. Eletromobilidade. 3. Embarcações elétricas. 4.
 Conversor CC-CC buck. 5. Alocação de polos. I. Medeiros, Renan Landau
 Paiva de. II. Valente, Iury de Bessa. 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

GABRIEL HENRIQUE PRINTES PEREIRA

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE ROBUSTO AO PROBLEMA DE ELETROMOBILIDADE EM COMUNIDADES ISOLADAS NA AMAZÔNIA

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.

Aprovada em 02 de maio de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Landau Paiva de Medeiros- Presidente
Prof. Dr. Cleonor Crescêncio das Neves - Membro Titular 1 - Externo
Prof. Dr. Ozenir Farah da Rocha Dias - Membro Titular 2 - Interno

Manaus, 25 de abril de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Renan Landau Paiva de Medeiros, Professor do Magistério Superior**, em 02/05/2025, às 16:29, 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 **Ozenir Farah da Rocha Dias, Professor do Magistério Superior**, em 02/05/2025, às 16:40, 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 **Cleonor Crescêncio das Neves, Usuário Externo**, em 13/05/2025, às 17:03, 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 **2561544** e o código CRC **5ADF9F01**.

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 23105.015587/2025-45

SEI nº 2561544

Criado por [31183646291](#), versão 2 por [31183646291](#) em 25/04/2025 09:49:16.

*Dedico este trabalho a minha família
por sempre estarem comigo em todos os mo-
mentos.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo deste trabalho.

À minha família, pelo apoio incondicional e pela base sólida que me proporcionaram ao longo de minha formação.

À minha esposa, Giovanna, por todo o amor, incentivo e compreensão, sendo meu porto seguro e minha maior motivação para seguir em frente.

Ao professor Renan Landau Paiva de Medeiros, por sua orientação valiosa e pela confiança depositada em mim.

À CAPES, pelo suporte financeiro que viabilizou a realização desta pesquisa.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo aplicar técnicas de controle robusto na regulação da tensão de saída de um conversor CC-CC do tipo *buck*, inserido em uma microrrede implementada em uma embarcação voltada à eletromobilidade em comunidades da região amazônica. Essas comunidades, muitas vezes desconectadas da rede elétrica convencional, enfrentam limitações de acesso e dependem do transporte fluvial com embarcações movidas a motores a diesel — uma solução de alto custo e impacto ambiental. Para isso, foi modelada uma microrrede composta por uma fonte fotovoltaica, cargas passivas e ativas (simulando um motor de propulsão) e um conversor buck, sobre o qual foram aplicadas metodologias de controle PID com alocação de polos, tanto robusta quanto clássica. As simulações, realizadas no ambiente *MATLAB/Simulink*, incluíram testes sob variações de *setpoint*, tensão de entrada e carga, e os resultados demonstraram que a alocação de polos robusta apresentou melhor desempenho dinâmico e maior estabilidade frente às incertezas paramétricas, quando comparada à abordagem clássica.

Palavras-chaves: Controle Robusto; Eletromobilidade; Embarcações elétricas; Conversor CC-CC *Buck*; Alocação de pólos.

Abstract

This work aims to apply robust control techniques to regulate the output voltage of a DC-DC buck converter, integrated into a microgrid implemented onboard a vessel designed for electromobility in isolated communities of the Amazon region. These communities, often disconnected from the conventional power grid, face access limitations and rely on river transportation using diesel-powered boats — a costly solution with significant environmental impact. To address this, a microgrid was modeled consisting of a photovoltaic source, passive and active loads (simulating a propulsion motor), and a buck converter, upon which PID control methodologies were applied using both robust and classical pole placement techniques. Simulations conducted in the MATLAB/Simulink environment included tests under variations in setpoint, input voltage, and load, and the results demonstrated that the robust pole placement approach achieved better dynamic performance and greater stability in the presence of parametric uncertainties when compared to the classical method.

Keywords: Robust Control; Electromobility; Electric Vessels; DC-DC Buck converter; Pole Allocation.

Lista de Figuras

1.1	Rodovias da região amazônica.	2
1.2	Hidrovias da região amazônica.	2
1.3	Barco elétrico "Solar Sun".	4
1.4	Barco elétrico "PlanetSolar".	5
2.1	Estrutura típica de uma microrrede.	17
2.2	Topologia radial.	19
2.3	Topologia de barramento múltiplo.	20
2.4	Topologia multiterminal.	21
2.5	Topologia de microrrede CC de barramento em anel.	22
2.6	Topologia de escada.	23
2.7	Topologia zonal.	24
2.8	Representação de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede de ali- mentação.	25
2.9	Representação de um sistema solar fotovoltaico isolado.	26
2.10	Sistema Interligado Nacional (SIN) e Sistemas Isolados (SISOL).	27
2.11	Sinal PWM com razão cíclica fixa	29
2.12	Conversor de potência <i>buck</i> considerando diferentes resistências parasitas .	30
2.13	Circuito equivalente do conversor durante o estado ON	31
2.14	Circuito equivalente do conversor durante o estado OFF	31
2.15	Função linearizada no entorno de um ponto de operação	33
2.16	Modelo CC linearizado para o ponto de operação	35
2.17	Circuito equivalente para pequenos sinais	35
2.18	Motor CC com excitação independente	37
2.19	Diagrama de blocos de um motor CC	39

3.1	Diagrama de blocos de um sistema de controle retroalimentado.	45
3.2	Regiões de estabilidades.	47
3.3	Diagrama de blocos de um sistema de estabilização robusta com controlador de ordem fixa usando LP	51
3.4	Um sistema de realimentação típico	52
4.1	Topologia da microrrede utilizada para o desenvolvimento do estudo	63
4.2	Diagrama de blocos do controle da tensão de saída do conversor de potência <i>buck</i>	66
5.1	Lugar das raízes da equação característica do modelo desenvolvido para a carga passiva.	81
5.2	Lugar das raízes da equação característica do modelo desenvolvido para a carga ativa.	81
5.3	Resultados para a variação no <i>setpoint</i>	83
5.4	Comparação entre os sinais de controle.	83
5.5	Resultado para a variação na tensão de entrada do conversor <i>buck</i>	85
5.6	Comparação entre os sinais de controle.	85
5.7	Desempenho dos controladores para inserção de carga passiva.	87
5.8	Sinal de controle.	87
5.9	Desempenho dos controladores para inserção de carga ativa.	89
5.10	Sinal de controle.	89

Lista de Tabelas

4.1	Critérios intervalares para o desempenho da planta	67
4.2	Dados definidos para o conversor <i>buck</i>	77
5.1	Integral do erro quadrático	90
5.2	Integral do erro absoluto ponderado pelo tempo (10^3)	90

Lista de Abreviaturas e Siglas

THD	Distorção harmônica total
RES	Recursos de energia renovável
PV	Células fotovoltaicas
BESS	Sistema de armazenamento de energia de bateria
CC	Corrente contínua
BESS	Sistema de Armazenamento de Energia de Bateria
EI	Internet de Energia
TIC	Tecnologias de informação e comunicação
HEM	Gerenciamento de energia residencial
IoT	Internet das Coisas
RLS	Simulador de carga residencial
BGD	Binary gradient descent
MG	Microdrig
EMS-in-Bs	Sistemas de gerenciamento de energia em edifícios
GD	Geração distribuída
PAC	Ponto de acoplamento comum
CA	Corrente alternada
BJT	Bipolar Junction Transistors - Transistores Bipolares de Junção
MOSFET	Transistores De Efeito De Campo Metal- Óxido Semicondutor
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
LP	Programação linear
FOMM	Correspondência com Modelo de ordem fixa
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
FT	Função de transferência

MF	Malha fechada
ISE	Integral do Erro Quadrático
ITAE	Integral do Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo

Lista de Símbolos

T_{ac}	torque acelerante
T_m	torque mecânico
T_e	torque elétrico
$\Delta\delta$	desvio angular do rotor do gerador
$\Delta\omega$	desvio de velocidade do rotor do gerador
K_s	coeficiente de torque sincronizante
K_D	coeficiente de amortecimento natural
H	constante de inércia normalizada
ω	velocidade angular do rotor do gerador
ω_0	velocidade síncrona do rotor do gerador
P_m	potência mecânica aplicada ao rotor do gerador
P_e	potência elétrica desenvolvida pela máquina síncrona
E'_q	tensão transitória de eixo em quadratura
T'_{d0}	constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto
T'_{q0}	constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo em quadratura
E_{fd}	tensão de campo
x_d	reatância de eixo direto
x_q	reatância de eixo em quadratura
x'_d	reatância transitória de eixo direto
x'_q	reatância transitória de eixo em quadratura
L_{ii}	indutância própria dos enrolamentos da máquina síncrona
L_{ij}	indutância mútua entre os enrolamentos da máquina síncrona

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Estado da Arte	3
1.2.1	Microrredes	5
1.2.2	Gerenciamento e controle de energia	8
1.3	Justificativa	12
1.4	Objetivos	14
1.4.1	Objetivo Geral	14
1.4.2	Objetivos Específicos	14
1.5	Organização do trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Microrredes	16
2.1.1	Introdução	16
2.1.2	Microrredes de corrente contínua	18
2.1.3	Topologias de Microrredes CC	18
2.1.3.1	Topologia de microrrede CC radial	18
2.1.3.2	Topologia de barramento múltiplo	19
2.1.3.3	Topologia multiterminal	20
2.1.3.4	Topologia de microrrede CC de barramento em anel	21
2.1.3.5	Topologia de escada	22
2.1.3.6	Topologia zonal	23
2.1.4	Fontes de Alimentação em Sistemas Isolados	24
2.1.4.1	Sistema Solar Fotovoltaico	25

2.1.4.2	Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e na Amazônia	26
2.1.4.3	Sistema de Armazenamento de Baterias	27
2.2	Conversores CC-CC	28
2.2.1	Introdução	28
2.2.2	Modelagem do conversor de potência	29
2.2.3	Função de transferência do conversor de potência <i>buck</i>	30
2.2.4	Linearização do modelo para pequenos sinais	32
2.3	Motores CC	36
2.3.1	Modelagem de um motor CC com excitação independente	37
2.4	Tópicos de Controle	39
2.4.1	Controlador PID	40
2.4.2	Alocação de Polos	41
2.4.2.1	Exemplo de Aplicação	41
2.5	Conclusão	43
3	CONTROLE ROBUSTO	45
3.1	Introdução	45
3.2	Projeto de Controlador Robusto com Variação Paramétrica	47
3.2.1	Teorema de Kharitonov	48
3.2.2	Teorema do Mapeamento	49
3.2.3	Estabilização robusta com controladores de ordem fixa via programação linear	50
3.3	Projeto de controlador via alocação de polos	52
3.4	Projeto de controlador via alocação polinomial intervalar de polos considerando incertezas paramétricas	54
3.4.1	Teorema 1	56
3.5	Formulação do Problema de Otimização para Projeto do Controlador	58
3.5.1	Definição do Problema	58
3.5.2	Função Custo	59
3.5.3	Conjunto de Restrições	59
3.5.4	Problema de Minimização	60
3.6	Conclusão	60

4	METODOLOGIA	61
4.1	Introdução	61
4.2	Apresentação da topologia da microrrede selecionada	62
4.2.1	Justificativa para escolha da fonte de geração	63
4.2.2	Escolha e caracterização das cargas	65
4.3	Projeto de controle considerando ação de carga passiva	66
4.3.1	Formulação do problema de otimização robusta	69
4.4	Projeto de controle considerando ação de carga ativa	71
4.4.1	Fonte de corrente controlada: modelagem e aplicação	72
4.4.2	Formulação do problema de otimização robusta	75
4.5	Cálculo dos parâmetros dos controladores para diferentes condições	77
4.5.1	Controlador por alocação de polos robusta	77
4.5.2	Controlador por alocação de polos clássica	78
4.5.3	Controlador PID para ação de carga ativa	78
4.6	Procedimentos de Testes	78
4.7	Conclusão	79
5	RESULTADOS	80
5.1	Desempenho dos controladores por alocação de polos robusta	80
5.2	Resultados para variação de <i>setpoint</i> de tensão da saída do conversor <i>buck</i>	82
5.3	Resultados para variação da tensão de entrada do conversor <i>buck</i>	84
5.4	Resultados para inserção de carga passiva	86
5.5	Resultados para inserção de carga ativa	88
5.6	Análise dos Resultados	90
5.7	Conclusão	91
6	CONCLUSÃO	92
	Referências Bibliográficas	94

Capítulo 1

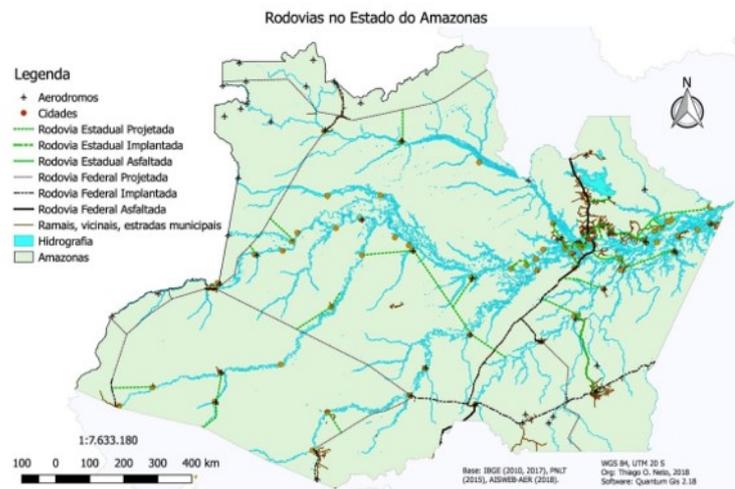
INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Este trabalho propõe uma solução para os desafios de abastecimento energético, mobilidade fluvial e sustentabilidade ambiental enfrentados por comunidades isoladas da região amazônica. Por meio da aplicação de técnicas de controle robusto à regulação da tensão de saída de um conversor CC-CC do tipo buck, inserido em uma microrrede embarcada alimentada por fonte fotovoltaica, busca-se garantir estabilidade e eficiência na operação de embarcações elétricas, oferecendo uma alternativa viável ao uso de motores a diesel em áreas de difícil acesso e infraestrutura limitada.

A região amazônica, especialmente o estado do Amazonas, é caracterizada por vastas áreas isoladas, onde a infraestrutura de transporte e energia é limitada devido à geografia complexa e à dispersão das comunidades. Composto por 61 municípios, o Amazonas tem Manaus como a única cidade com conexão terrestre para apenas 10 outras localidades (vide Figura 1.1) (NETO e NOGUEIRA 2019).

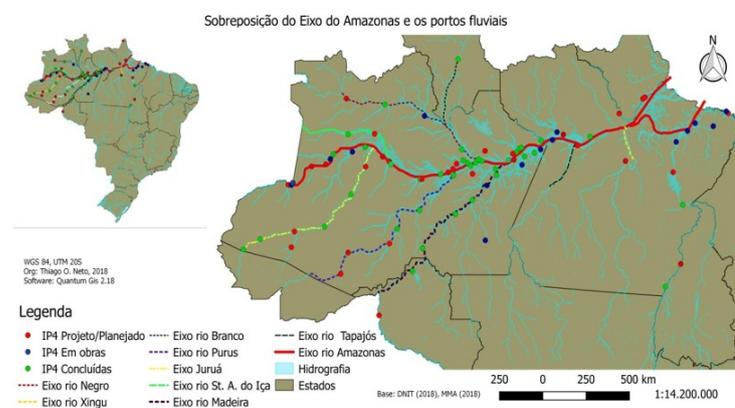
Figura 1.1: Rodovias da região amazônica.



Fonte: Neto e Nogueira (2019).

Assim, a navegação fluvial emerge como o principal meio de transporte, essencial tanto para pessoas quanto para cargas, em viagens que podem durar até 17 dias, vide Figura 1.2 (MATIELLO *et al.* 2018).

Figura 1.2: Hidrovias da região amazônica.



Fonte: Neto e Nogueira (2019).

Essa dependência do transporte fluvial e da geração de energia descentralizada revela um grande desafio: a necessidade de soluções energéticas eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis, especialmente em um contexto de crescente preocupação com a poluição ambiental e o consumo de combustíveis fósseis. A região enfrenta graves problemas ambientais, com a gestão inadequada de resíduos e a poluição das águas, agravados pela intensa atividade de navegação (TOLEDO e SILVA 2020).

Além disso, as mudanças climáticas e a necessidade global de reduzir as emissões

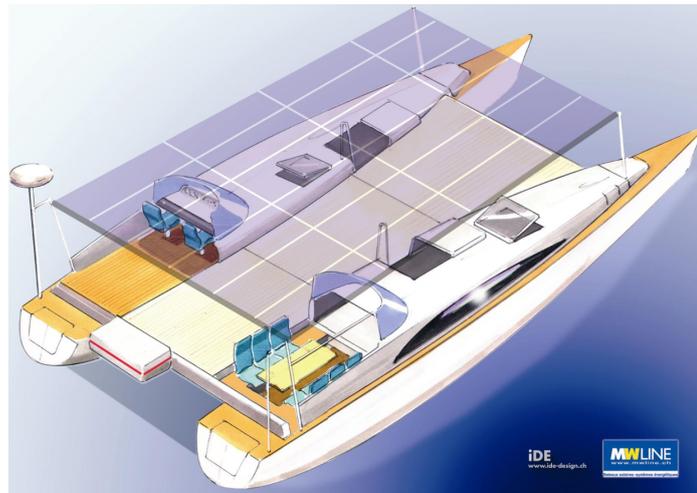
de gases poluentes pressionam por alternativas mais limpas, como a eletromobilidade, que pode proporcionar um meio de transporte mais sustentável. Entretanto, a implementação de sistemas de eletromobilidade em comunidades isoladas na Amazônia exige o desenvolvimento de soluções de controle robusto, capazes de lidar com as peculiaridades da região, como a variação na disponibilidade de recursos naturais, a dificuldade de manutenção de infraestrutura, e a necessidade de sistemas de energia confiáveis e eficientes (NASCIMENTO *et al.* 2019).

Nesse contexto, o presente trabalho busca abordar esses desafios. Com a Amazônia representando uma das últimas fronteiras do desenvolvimento sustentável, onde a integração de novas tecnologias deve ser realizada com cuidado para preservar o meio ambiente, a pesquisa visa contribuir para a melhoria da qualidade de vida das populações ribeirinhas por meio de soluções energéticas inovadoras e ambientalmente responsáveis.

1.2 Estado da Arte

As mudanças climáticas exigem a redução de emissões poluentes, como dióxido de carbono, óxidos de enxofre e nitrogênio, além da diminuição das emissões de carbono em todos os meios de transporte, incluindo o setor marítimo. Nesse sentido, embarcações equipadas com sistemas de propulsão elétrica alimentados por energia solar fotovoltaica representam uma alternativa viável ao uso de derivados de petróleo, especialmente o diesel. Isso é fundamental tanto do ponto de vista estratégico quanto para a soberania nacional. Além de terem um desempenho satisfatório em diversos tipos de embarcações, essas tecnologias oferecem benefícios significativos na redução dos impactos ambientais. Nos últimos anos, surgiram propostas de embarcações elétricas, como o Solar Sun21 da Transatlantic21, vide Figura 1.3 a seguir (FREULER 2007). Este barco foi projetado para demonstrar o potencial da tecnologia de energia solar para a navegação oceânica e foi a primeira embarcação movida a energia solar a atravessar o Oceano Atlântico em 2006/07.

Figura 1.3: Barco elétrico "Solar Sun".



Fonte: Transatlantic 2021.

O Sun21 completou sua jornada de 7 mil milhas náuticas em 29 dias, utilizando exclusivamente energia solar. Com 14 metros de comprimento, está equipado com painéis solares na cobertura, baterias e motores em cada flutuador. O barco atinge uma velocidade média de 5-6 nós (9,26-11,11 km/h) e pode transportar até 6 passageiros.

O maior barco movido a energia solar o MS Tûranor PlanetSolar, vide Figura 1.4 abaixo, foi construído e lançado ao mar em 2010 na Alemanha, tem 35 metros e tornou-se o primeiro barco movido a energia solar a fazer a viagem de circum-navegação em 2012. Projetado por LOMOcean *design* e construído por Kneierim Yachtbau, o trimaran solar tem na sua cobertura 512 m^2 quadrados de painéis solares, permitindo velocidades até 14 nós (26 km./h) de velocidade máxima, 5 nós (9,26 km/h) de velocidade de cruzeiro, com dois motores elétricos colocados nos flutuadores (lateral do casco) que produzem um total de 120 kW. Foi desenvolvido em oito anos e o projeto visou a conscientizar o público sobre a importância das energias renováveis (YONEDA 2015).

Figura 1.4: Barco elétrico "PlanetSolar".



Fonte: Yoneda 2015.

Existem ainda embarcações que misturam o “conceito da vela” e a energia solar. O *design* é baseado num peixe voador que habita no Mediterrâneo. Esta embarcação de 32 metros é movida a energia solar e eólica. Foi concebida como uma solução desafiadora que mescla *design* e inovação tecnológica. Assim, apresenta módulos solares flexíveis nas asas e no casco, que geram energia estimada de 8 a 10 kW, tem dois motores elétricos nas asas laterais e as baterias são colocadas na parte central do casco, abaixo da linha de água, atuando como lastro (VOLITAN 2024).

No Brasil, Moura et al. (2024), propõem avaliar a integridade e o desempenho de módulos fotovoltaicos semi flexíveis, motivados pelas exigências da transição energética e pela aplicação prática desses módulos em uma embarcação elétrica do tipo catamarã. O estudo visa comparar diferentes tipos de painéis — semi flexíveis e rígidos — por meio de ensaios de curva IxV e testes de eletroluminescência, com foco na sua eficiência em competições como o Desafio Solar Brasil. A intenção é não apenas otimizar o desempenho da embarcação nas competições, mas também contribuir para a disseminação de conhecimento técnico sobre tecnologias fotovoltaicas emergentes no cenário nacional (MOURA *et al.* 2024).

1.2.1 Microrredes

A microrrede pode alcançar o equilíbrio de energia do sistema controlando a saída de energia distribuída internamente, e a microrrede é um sistema autônomo que pode

alcançar autocontrole, proteção e gerenciamento (ALI *et al.* 2016).

A microrrede pode se juntar a uma rede de distribuição e operar em conjunto com a rede de distribuição, ou pode operar de forma independente. Quando a falha na linha pode afetar a segurança da rede de distribuição, a microrrede pode desconectar a conexão com a rede de distribuição e funcionar de forma independente, de modo a melhorar a confiabilidade do sistema da rede de distribuição. Ao mesmo tempo, a microrrede possui melhor controlabilidade, podendo ser utilizada como carga controlável de energia na rede de distribuição, reduzindo efetivamente o impacto negativo do acesso de um grande número de fontes de energia distribuídas na rede. E a microrrede melhora a aceitação da energia distribuída pela rede de distribuição, ao mesmo tempo que satisfaz as necessidades de energia dos utilizadores locais (XIE *et al.* 2018).

Tang & Qin (2019) aborda problemas atuais relacionados às microrredes em navios, com foco na eletrônica de potência e questões de qualidade de energia. Discute tanto problemas convencionais, como variações de tensão e frequência, quanto novos desafios, como distorções de formas de onda devido ao uso extensivo de eletrônica de potência. O artigo analisa normas de qualidade de energia, como os Requisitos Unificados da Associação Internacional de Sociedades Classificadoras, e define a Distorção Harmônica Total (THD). Também apresenta uma visão geral dos conversores de potência em aplicações de alta potência em navios e seu impacto nas microrredes marítimas, além de resultados originais sobre fenômenos de qualidade de energia observados nessas redes (TANG e QIN 2019).

Por outro lado, Tarasiuk *et al.* (2021) busca resolver o problema de programação ótima resultante da operação coordenada de multimicrorredes e redes de distribuição, utilizando um método cooperativo de otimização que inclui a participação de veículos elétricos. Este método maximiza o uso da energia distribuída nas microrredes, melhora a qualidade da energia na rede de distribuição e aumenta os benefícios econômicos das microrredes, considerando também a satisfação dos usuários de veículos elétricos. A coordenação é realizada por meio de um modelo hierárquico de duas camadas: a camada superior representa o sistema de rede de distribuição e a inferior, o sistema de multimicrorredes. A eficácia deste modelo é comprovada através de simulações, mostrando vantagens econômicas e de estabilidade (TARASIUK *et al.* 2021).

Ali *et al.* (2024) explora soluções práticas e acessíveis de microrredes para mitigar a pobreza energética nas nações insulares, com foco na Indonésia. A principal ideia

do autor é que microrredes baseadas em recursos de energia renovável (RES) podem fornecer uma alternativa sustentável e econômica à eletricidade cara e poluente gerada a partir de combustíveis fósseis. O estudo analisa e avalia seis opções de microrrede para ilhas isoladas, usando o software Homer Pro. Dentre essas opções, dois sistemas se destacam como os mais viáveis: um que combina células fotovoltaicas (PV), um sistema de armazenamento de energia de bateria (BESS) e um gerador a diesel, e outro que utiliza apenas células fotovoltaicas e um sistema de armazenamento de energia de bateria (ALI *et al.* 2024).

Cruz *et al.* (2024) aborda os desafios e avanços na proteção de microrredes interconectadas, enfatizando que o desenvolvimento de esquemas de proteção eficazes é crucial para garantir a operação segura e confiável dessas redes. O autor destaca que, enquanto esquemas para microrredes individuais têm sido amplamente discutidos, a proteção para microrredes em rede ainda está em fase de desenvolvimento e requer mais pesquisa. A interconexão de microrredes em diferentes nós e com diversas tecnologias aumenta a complexidade e a probabilidade de falhas, tornando a proteção mais desafiadora. O conceito de microrredes é explorado no artigo através da análise sistemática de *clusters* propostos desde 2016, incluindo arquiteturas, modos de operação e uso de fontes renováveis. Além disso, o artigo discute os sistemas de proteção disponíveis, os desafios enfrentados e as soluções propostas, oferecendo uma visão sobre as tendências e necessidades futuras na implementação de proteção para microrredes em rede (CRUZ *et al.* 2024).

Tan *et al.* (2024) propõe um método de controle cooperativo resiliente para *clusters* de microrredes de corrente contínua (CC) em resposta aos desafios impostos pela alta penetração de fontes renováveis e pela vulnerabilidade a ataques cibernéticos. A ideia principal do autor é que um controle robusto é essencial para garantir a regulação de tensão e o compartilhamento de energia, mesmo na presença de ameaças cibernéticas. O método desenvolvido é baseado em um modelo abrangente que inclui diversos componentes das microrredes e utiliza a análise de estabilidade de Lyapunov para criar um controlador que depende apenas dos parâmetros locais da microrrede. A análise mostra que o controlador pode mitigar os impactos de ataques cibernéticos e os resultados experimentais confirmam a eficácia da abordagem proposta na manutenção da resiliência do sistema (TAN *et al.* 2024).

Por fim, Clairand *et al.* (2022) realiza uma avaliação tecnoeconômica de uma micror-

rede composta por painéis fotovoltaicos, turbina micro-hidrelétrica e gerador a diesel em comunidades remotas do Equador. Utilizando o software *HOMER*, os autores concluem que a combinação de fontes renováveis com backup a diesel é economicamente viável, apresentando um custo de energia competitivo (CLAIRAND *et al.* 2022).

1.2.2 Gerenciamento e controle de energia

Chen & Zhang (2020) tem como objetivo aprimorar o uso de energia renovável e minimizar erros de simulação decorrentes da previsão do modelo, especialmente no contexto de redes de energia local que integram veículos elétricos e redes fotovoltaicas de alta penetração. Para abordar o desafio da utilização sinérgica dessas redes, o autor propõe uma fila de armazenamento de energia virtual baseada na tecnologia de otimização de Lyapunov. O gerenciamento de energia, especialmente considerando a carga de veículos elétricos, é simplificado ao transformar a restrição de acoplamento de tempo em um problema de estabilidade de fila para cargas flexíveis. A função de penalidade de Lyapunov é utilizada para simplificar o problema e determinar as decisões de controle com base na operação em tempo real, visando reduzir os custos operacionais. Os resultados obtidos confirmam que o método melhora a utilização de energia renovável e demonstra a eficácia do algoritmo na redução dos custos operacionais (CHEN e ZHANG 2020).

Chi *et al.* (2020) aborda o crescente interesse na Internet de Energia (EI) e sua implementação, destacando-a como um marco crucial no caminho para promover uma revolução na produção e no consumo de energia, o que é vital para alcançar um desenvolvimento energético sustentável. A pesquisa explora a viabilidade de estabelecer a EI através da integração de sistemas de gerenciamento inteligente em nível de aplicação com a rede de energia tradicional, aplicada em escala de bairro. A EI, como um novo modelo de utilização de energia, promove uma integração aprofundada entre a indústria energética e as tecnologias de informação e comunicação (TIC) para otimizar tanto o gerenciamento regional de energia quanto o despacho ideal. Com o suporte da Internet das Coisas e da tecnologia de *big data*, a EI desempenha um papel essencial na coordenação do gerenciamento e agendamento, enquanto facilita a interação entre as entidades de mercado e os usuários finais. O artigo também analisa o contexto, o conceito e o modelo técnico da EI, além de discutir sua implementação em parques industriais práticos (CHI *et al.* 2020).

Rashid *et al.* (2020) explora a importância do gerenciamento de energia residencial

(HEM) no cenário energético atual, destacando a necessidade crítica para consumidores devido ao uso excessivo de energia por eletrodomésticos. O trabalho propõe um esquema aprimorado para minimizar o consumo de energia e os custos, focando em ajustar as tarifas de pico de carga e otimizar o uso de serviços públicos. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo de gerenciamento de energia eficiente (PMA), que integra fontes de energia renováveis (RESs) e sistemas de armazenamento de energia (ESS), sendo implementado em C++. O artigo analisa os benefícios das RESs e ESS no contexto das técnicas de PMA propostas, considerando três cenários diferentes. Estudos de caso extensivos validam a eficácia do esquema proposto, demonstrando que ele pode resultar em economias de energia e custos de até 34% e 45%, respectivamente, quando comparado a métodos existentes (RASHID *et al.* 2020).

Zhang et al. (2020) apresenta uma proposta e implementação de um sistema integrado de gerenciamento regional de energia e serviços, visando atender às demandas reais de gerenciamento abrangente de diversos tipos de recursos, como eletricidade, calor, gás e água. A abordagem combina tecnologias emergentes, como *big data*, plataformas de nuvem, Internet das Coisas (IoT), internet móvel e conceitos de cidade inteligente. O sistema é projetado para seis aplicações funcionais principais: monitoramento de energia, análise de energia, gerenciamento de energia, operação e manutenção, liquidação de transações e serviços de valor agregado. Casos de aplicação demonstram que o sistema é capaz de satisfazer os requisitos de gerenciamento de energia e serviços para diferentes cenários, incluindo nível empresarial, nível de parque e nível regional. O sistema não só apoia o gerenciamento regional integrado de energia e serviços, mas também tem o potencial de explorar a conservação de energia, melhorar a eficiência energética, elevar o nível de gerenciamento de energia e contribuir para um meio ambiente mais sustentável (ZHANG *et al.* 2020).

Yan et al. (2020) aborda o desafio de melhorar a segurança, confiabilidade e estabilidade das operações de estações de energia de armazenamento de energia conectadas à rede elétrica, em um cenário onde a tecnologia de armazenamento de energia está em rápido avanço. O objetivo principal é desenvolver métodos eficazes de gerenciamento e controle para essas estações em larga escala. Inicialmente, a criação de um modelo de custo operacional que leve em conta as características de operação ao longo do ciclo de vida do sistema de armazenamento de energia. Em seguida, é apresentada uma tecnologia

de regulação de armazenamento de energia baseada na margem de segurança dinâmica, que considera as características espaciais e temporais da distribuição de fornecimento de energia e carga. Por fim, o método de gerenciamento de energia proposto inclui um controle de correção de risco, fundamentado na margem de segurança dinâmica do sistema de armazenamento (YAN *et al.* 2020).

Amer *et al.* (2024) aborda a crescente importância do consumo e gerenciamento de energia residencial no contexto das redes elétricas modernas, apresentando um Simulador de Carga Residencial (RLS) projetado para modelar a carga dinâmica de forma detalhada. O simulador oferece uma interface de usuário intuitiva, integra diferentes tipos de eletrodomésticos e inclui a modelagem de fontes de energia renovável. Um dos principais diferenciais do RLS é sua capacidade de ser customizado para diversas configurações residenciais e localizações geográficas, como diferentes tamanhos de moradias, condições climáticas e padrões de consumo de energia. Além disso, o RLS se destaca como uma ferramenta educacional versátil, útil para estudantes, proprietários de residências e profissionais do setor energético. Ele proporciona uma plataforma prática para testar e aperfeiçoar estratégias de gerenciamento de energia doméstica, servindo como um elo entre o conhecimento teórico e as aplicações práticas no mundo real. Esse conjunto de funcionalidades faz do RLS um recurso valioso tanto para o aprendizado acadêmico quanto para o uso prático (AMER *et al.* 2024).

Abdolrasol *et al.* (2023) propõe um novo controlador ótimo baseado no algoritmo Binary Gradient Descent (BGD) para otimizar a gestão de gerações distribuídas em uma rede elétrica. O objetivo principal do algoritmo é reduzir o consumo de energia da rede principal, priorizando o uso de recursos sustentáveis em vez de depender da compra de eletricidade da rede local. A eficácia do método é testada no sistema de quatorze barramentos IEEE, com Microgrids (MGs) integradas e gerações distribuídas, utilizando dados reais de demanda de carga de Perlis, na Malásia, em estudos de caso de 24 horas. O algoritmo BGD incorpora dados meteorológicos, como vento, energia solar, combustível e *status* da bateria, para otimizar os horários de ativação e desativação dos recursos. Os resultados mostram que o algoritmo BGD alcança uma redução significativa de 46,3% no consumo de energia, demonstrando seu potencial para aprimorar os algoritmos de otimização em termos de gerenciamento de energia sustentável. A eficácia do BGD é validada por meio de uma análise comparativa com métodos convencionais, confirmando sua relevância para

a gestão de energia em redes elétricas modernas (ABDOLRASOL *et al.* 2023).

Liu *et al.* (2022) faz uma revisão abrangente das pesquisas publicadas sobre microrredes e as técnicas de modelagem e solução de gerenciamento de energia associadas. Inicialmente, são classificadas as microrredes e os sistemas de armazenamento de energia em várias categorias e combinações típicas, destacando seu papel fundamental no gerenciamento de energia. Em seguida, o artigo explora modelos de gerenciamento de energia que lidam com incertezas exógenas e endógenas, expandindo esses conceitos para o gerenciamento transativo de energia. Métodos de solução, como programação matemática, programação dinâmica adaptativa e técnicas baseadas em aprendizado por reforço profundo, são analisados, juntamente com suas implementações. Finalmente, o artigo discute os desafios futuros para sistemas de gerenciamento de energia, abordando questões como a dinâmica dos componentes críticos, restrições de estabilidade, resiliência, operação de mercado e o uso de técnicas computacionais emergentes (LIU *et al.* 2022).

Al-Ghaili *et al.* (2021) propõe uma análise abrangente dos Sistemas de Gerenciamento de Energia em Edifícios (EMSs-in-Bs), focando na eficiência e na execução de múltiplas funções, como monitoramento, estimativa e controle do uso de energia. O artigo revisa diferentes projetos de EMSs-in-Bs e classifica-os com base no escopo e na função para os quais foram desenvolvidos. Através dessa classificação, o estudo evidencia que sistemas projetados para "controlar e otimizar" oferecem as maiores taxas de economia de energia, enquanto aqueles focados em "estimativa e previsão" apresentam economias menores. A aplicação do gerenciamento de energia é abordada ao destacar como esses sistemas podem ser ajustados para realizar múltiplas funções sequenciais e melhorar a eficiência energética, recomendando um aprimoramento específico para funções de estimativa e previsão para alcançar taxas de economia mais elevadas (AL-GHAILI *et al.* 2021).

Hasan & Trianni (2020) explora a integração da Indústria 4.0 com o gerenciamento de energia industrial, abordando a crescente necessidade de eficiência energética em processos industriais digitais. Embora a Indústria 4.0 ofereça um potencial significativo para melhorar a eficiência energética, muitas indústrias ainda não aproveitam essas oportunidades. O artigo oferece uma visão geral das práticas de gerenciamento de energia e ferramentas relacionadas, assim como dos conceitos da Indústria 4.0, discutindo as possíveis sinergias e oportunidades de otimização energética que podem ser alcançadas através da implementação de tecnologias avançadas e estratégias de gerenciamento de energia

(HASAN e TRIANNI 2020).

1.3 Justificativa

A capital do Amazonas, Manaus, tem conexão terrestre com apenas 10 municípios do estado, a navegação fluvial se destaca como o principal meio de transporte para pessoas e mercadorias na região. Alguns trajetos podem durar até 17 dias. Em geral, são utilizadas embarcações de pequeno ou médio porte, feitas de madeira ou ferro, que atracam em portos, terminais hidroviários e até em margens sem infraestrutura para acostamento (MELO e ROMANEL 2015).

Na prática, o transporte fluvial gera uma grande quantidade de resíduos e poluentes que não são gerenciados adequadamente, faltando controle, fiscalização e orientação tanto para os usuários quanto para os proprietários das embarcações.

Segundo Neto & Nogueira (1999), apesar dos esforços dos governos federal, estadual e municipal para a construção de rodovias e aeródromos no Amazonas, uma parte significativa da população local ainda segue o “padrão rio-várzea”, onde o transporte fluvial é a única opção. Essas áreas são habitadas por comunidades caboclas que dependem dos rios para subsistência, lazer e transporte (NETO e NOGUEIRA 1999).

A principal característica do transporte fluvial é a mistura de cargas e passageiros. Assim, cada rota tem períodos específicos durante o ano, nos quais a dinâmica de carregamento varia bastante. As embarcações transportam uma variedade de cargas, como estivas, frutas, hortaliças, bebidas, caixas, mudanças, veículos (motos e carros), eletrodomésticos e animais, entre outros. Os barcos regionais navegam por diversos rios e operam em condições peculiares, como a dispersão dos passageiros, o baixo poder aquisitivo e as longas distâncias a serem percorridas.

Em 2017, aproximadamente 1,7 milhões de passageiros circularam pelas linhas estaduais do transporte fluvial amazonense. Manaus é o centro de gerenciamento, organização e dispersão desse complexo sistema. No interior, geralmente há pequenas estações de embarque e desembarque, enquanto na capital existem 13 grandes plataformas portuárias que, entre 2010 e 2018, movimentaram quase 200 milhões de toneladas de cargas (STACCIARINI e FELDMANN 2020). Nos períodos de vazante dos rios, as embarcações reduzem o volume transportado para evitar encalhamentos (DAVID 2010) ou

trocam de embarcação, realizando o transbordo para uma com calado menor, permitindo a navegabilidade. Outro fator relevante são os eventos locais, como festas regionais, que atraem centenas de pessoas, causando um acúmulo de embarcações nas margens dos rios, muitas vezes sem infraestrutura de apoio portuário.

Embora o estado do Amazonas possua a maior reserva de água doce do mundo, enfrenta problemas significativos devido ao uso irracional e aos impactos nos recursos hídricos (MELO e ROMANEL 2015). O setor de navegação se destaca como um dos principais causadores desses problemas, tanto pelo número de embarcações quanto pelos impactos gerados.

As atividades de transporte fluvial produzem resíduos orgânicos e inorgânicos, além de efluentes provenientes de ações de higiene pessoal, preparo de alimentos, manutenção e limpeza das embarcações. Frequentemente, esses resíduos são despejados nos leitos ou margens dos rios. Como resultado, as margens de rios, furos e igarapés ficam densamente ocupadas por resíduos, principalmente plásticos, vidros, metais e papelões. Esses detritos se acumulam ao redor das embarcações ancoradas, criando um ambiente poluído que favorece a proliferação de insetos e vetores de doenças.

O presente trabalho está diretamente alinhado ao conceito de desenvolvimento sustentável e à busca por soluções práticas para os desafios enfrentados por comunidades que dependem de sistemas isolados e autossuficientes de geração de energia. Em particular, as microrredes de corrente contínua apresentam-se como uma alternativa promissora para atender às demandas de eletrificação de embarcações e regiões remotas, onde a estabilidade, a eficiência energética e a capacidade de adaptação às condições variáveis são indispensáveis. Nesse contexto, este estudo justifica-se pela necessidade de desenvolver metodologias de controle robusto que garantam a operação confiável de conversores de potência, essenciais para o funcionamento dessas microrredes. A pesquisa contribui para a solução desses problemas ao propor estratégias que aumentam a resiliência do sistema frente a perturbações e incertezas, promovendo maior eficiência energética e sustentabilidade para as comunidades atendidas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Propor uma solução baseada em estabilidade e otimização robusta para o controle de um conversor CC-CC *buck*, inserido em uma microrrede aplicada a uma embarcação.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver a topologia da microrrede.
2. Implementar um controlador de ordem fixa para a microrrede selecionada.
3. Avaliar a robustez e desempenho do sistema em malha fechada na presença de incertezas/distúrbios.

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, cada um dedicado a uma parte específica do estudo realizado. No presente Capítulo 1, é apresentada uma contextualização e justificativa do tema, proporcionando uma visão geral dos conceitos abordados e da importância do estudo no contexto atual.

O Capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, na qual serão explorados os conceitos centrais deste trabalho: microrredes, conversores CC-CC (*buck*) e motores CC. Essa revisão fornecerá a base teórica necessária para a compreensão dos desafios e soluções propostas ao longo do estudo.

No Capítulo 3, será realizada uma abordagem sobre as principais ideias que compõem a teoria do controle robusto aplicada.

O Capítulo 4 detalhará a metodologia utilizada, incluindo a definição da topologia da microrrede utilizada, além da apresentação do ambiente experimental. Não obstante, serão apresentadas as principais informações da rede, bem como da obtenção dos parâmetros dos controladores da microrrede com base na metodologia de controle investigada e das especificações de desempenho definidas, além da apresentação dos parâmetros do controlador projetados. Por fim, será apresentado um descritivo de todos os testes que serão conduzidos ao longo deste trabalho.

No Capítulo 5, serão discutidos e apresentados os principais resultados deste estudo.

Este capítulo fornecerá uma análise crítica dos dados, discutindo o desempenho dos modelos e as implicações dos resultados encontrados.

Por fim, o Capítulo 6 trará uma conclusão sobre o trabalho, onde serão discutidas as principais conclusões do trabalho.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Microrredes

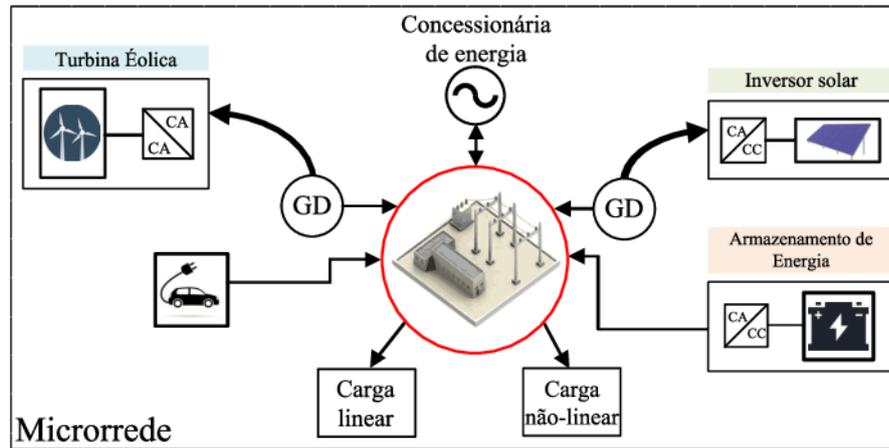
2.1.1 Introdução

Os sistemas de potência estão passando por uma transformação estrutural. Tradicionalmente, esses sistemas operavam e transferiam potência de maneira unidirecional e radial, com fontes de energia centralizadas em grandes usinas distantes dos centros de consumo. Com os avanços em novas tecnologias nas áreas de eletrônica de potência, controle e sistemas de geração, está se testemunhando uma transição de sistemas centralizados para sistemas distribuídos (CONRADO *et al.* 2020). Nestes novos sistemas, os usuários finais e os novos geradores de pequeno porte se conectam aos sistemas de distribuição locais. A transferência de potência deixa de ser radial e unidirecional, passando a ter fluxos de potência bidirecionais, frequentemente integrados com sistemas de armazenamento de energia (ABBASI e BALEANU 2023).

Nesse contexto, surgiu a definição de Microrredes de Energia Elétrica, que podem ser descritas como um conjunto de cargas, unidades de geração distribuída (GDs) e sistemas de armazenamento de energia, operando de forma coordenada para fornecer eletricidade de maneira confiável, conectando-se ao sistema interligado no nível de distribuição por meio de um único ponto de conexão chamado ponto de acoplamento comum (PAC) (UDDIN *et al.* 2023). A topologia que sustentará o funcionamento da microrrede depende da sua aplicação, portanto, deve ser analisado conforme cada necessidade. As microrredes têm a capacidade de fornecer ou absorver energia da rede principal conforme suas neces-

sidades, utilizando um sistema de gerenciamento da potência gerada e consumida, vide Figura 2.1 (BRANDAO *et al.* 2018).

Figura 2.1: Estrutura típica de uma microrrede.



Fonte: Conrado *et al.* 2020.

Um dos principais componentes de uma microrrede são os conversores estáticos, que possibilitam o processamento eletrônico da energia e viabilizam diversas funcionalidades, como despacho de energia, regulação, melhora da qualidade da tensão, compensação de reativos e correção de qualidade da tensão, incluindo a mitigação de harmônicos. As técnicas de controle empregadas para operar esses conversores permitem que eles sejam classificados como formadores de rede, auxiliares de rede ou alimentadores de rede, dependendo da função que desempenham dentro da microrrede (COELHO *et al.* 2015).

Os conversores auxiliares de rede se destacam por sua flexibilidade, podendo operar tanto como formadores de rede quanto como alimentadores de rede. Para desempenharem essas funções, esses conversores geralmente têm saída controlada em tensão e utilizam técnicas de controle que permitem o despacho de potência ativa e reativa, bem como a regulação e melhora da qualidade da tensão. Uma das técnicas mais importantes e difundidas é o controle por decaimento, que tem a vantagem de ser de implementação simples e bem adaptada para aplicações em microrredes. No entanto, sua aplicação na forma clássica pode causar problemas de instabilidade devido à sua rápida atuação transitória, cuja resposta dinâmica é muito superior à dos reguladores utilizados nos sistemas de controle de sistemas de distribuição (ALLWYN 2023).

2.1.2 Microrredes de corrente contínua

Mais de um século após a disputa entre corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), a corrente alternada continua a ser a forma predominante de transmissão de energia elétrica, e não se espera que isso mude em um futuro próximo. No entanto, com as discussões em andamento sobre mudanças estruturais no sistema para aumentar a eficiência e a confiabilidade, a corrente contínua tem se mostrado uma solução mais eficiente em certas aplicações específicas (Ferahtia *et al.* 2024). O sistema de distribuição em corrente contínua pode integrar mais diretamente as fontes de energia distribuídas em um barramento CC, como células a combustível, painéis fotovoltaicos e dispositivos de armazenamento, eliminando perdas de conversão que variam entre 2,5% e 10% da energia gerada (ABBASI e BALEANU 2023). Além disso, a confiabilidade e a qualidade da energia podem ser aprimoradas com a adição de fontes renováveis e dispositivos de armazenamento, que operam de forma mais eficiente em sistemas de corrente contínua em comparação com os de corrente alternada.

As redes de corrente alternada (CA) oferecem várias vantagens, incluindo a facilidade de elevar e reduzir a tensão, a maturidade dos sistemas de proteção, regulamentação e padronização, além da capacidade de controlar a tensão do barramento utilizando apenas a potência reativa. No entanto, a intenção não é substituir o modelo CA atual, mas sim integrar os sistemas de corrente contínua (CC) localmente, visando melhorar a qualidade da energia, a confiabilidade e a eficiência.

2.1.3 Topologias de Microrredes CC

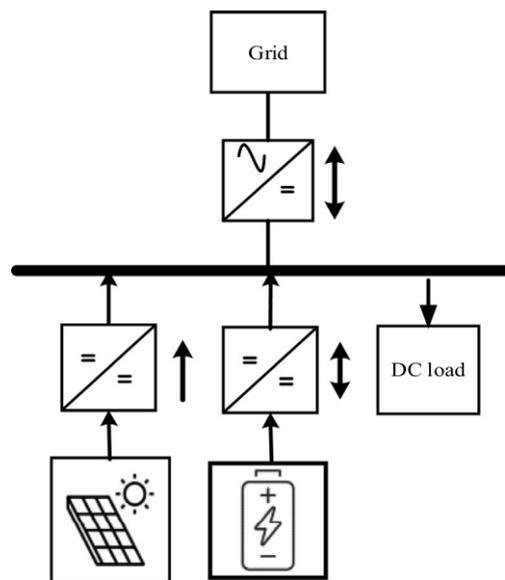
A escolha de uma topologia de microrrede CC apropriada é crítica porque tem impacto em aspectos críticos de um sistema de energia, como flexibilidade, custo, confiabilidade, controlabilidade, robustez, resiliência e escalabilidade. O nível de tensão é uma consideração importante ao projetar a topologia de uma microrrede CC. As topologias de sistemas de microrrede disponíveis podem ser classificadas em seis tipos diferentes.

2.1.3.1 Topologia de microrrede CC radial

O conceito de topologia de microrrede CC radial é descrito na Figura 2.2. Este tipo de topologia é igualmente conhecido como estrutura de barramento único ou topologia de alimentador. É caracterizado por um único barramento CC e um único ponto de conexão

para geração, armazenamento e carga no sistema. Neste tipo de configuração, a carga só pode receber energia se todas as suas interfaces estiverem operacionais. Como o sistema contém outras fontes e dispositivos de armazenamento de energia, a incapacidade de uma interface de geração funcionar nem sempre resulta em uma queda total de energia. Dependendo da finalidade e dos requisitos, o barramento de microrrede CC radial pode ser unipolar ou bipolar. Esta configuração é comum em edifícios residenciais porque a maioria dos aparelhos usa baixa tensão, portanto, a baixa tensão do barramento CC é preferida, evitando estágios adicionais de conversão do *chopper*. Nesta configuração, cargas e conversores de energia CA podem ser colocados próximos uns dos outros para diminuir as perdas de distribuição. A confiabilidade do sistema pode ser melhorada empregando várias pilhas de baterias (BHARGAVI *et al.* 2021).

Figura 2.2: Topologia radial.



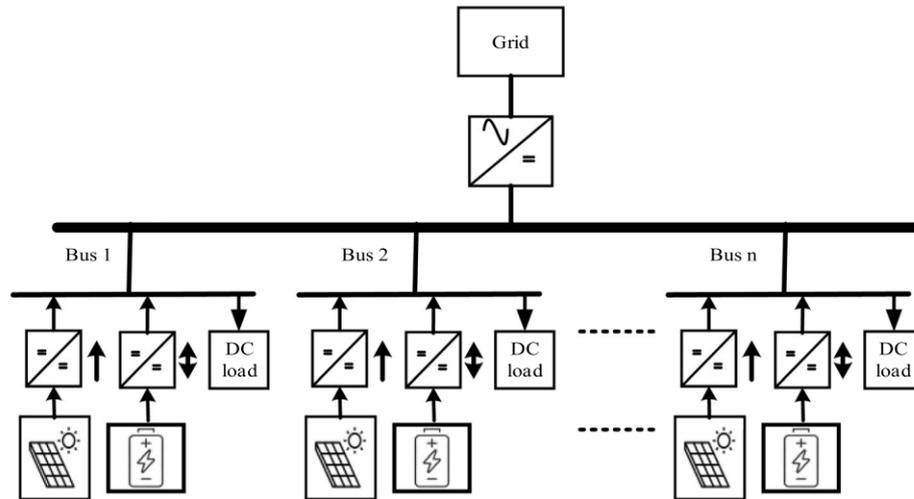
Fonte: MODU *et al.*, 2023.

2.1.3.2 Topologia de barramento múltiplo

O diagrama de linha única de uma topologia de barramento múltiplo é representado na Figura 2.3, é uma versão expandida da topologia de sistema radial que fornece maior confiabilidade, eficiência e densidade de energia a um custo talvez menor de instalação e operação em comparação com a topologia de sistema radial. É caracterizada por um recurso redundante, como tal, é usada em aplicações de navios de guerra. A energia pode ser trocada entre dois grupos vizinhos de microrredes conhecidos como clusters de microrredes

sempre que houver um déficit ou excesso de energia. Além disso, dependendo da topologia na qual a microrrede foi conectada, barramentos defeituosos podem ser isolados automaticamente do sistema em caso de falha. A troca de energia entre barramentos CC múltiplos é controlada pela aplicação de desvios de tensão adequados (UDDIN *et al.* 2023).

Figura 2.3: Topologia de barramento múltiplo.

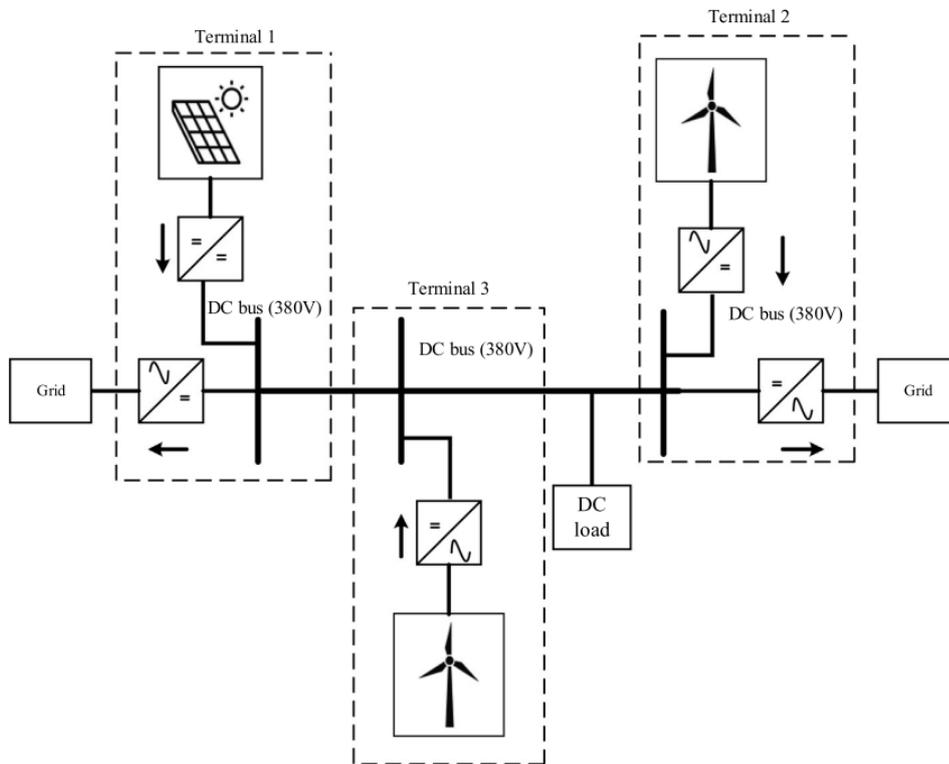


Fonte: MODU *et al.*, 2023.

2.1.3.3 Topologia multiterminal

Inicialmente, a topologia multiterminal foi proposta para uso em sistemas de corrente contínua em alta tensão (CC), como na geração de energia eólica offshore. A Figura 2.4 mostra a estrutura do sistema CC multiterminal. Vários terminais de entrada alimentam o sistema de alimentação CC. Um conversor CA-CC conecta duas ou mais interfaces de rede CA à rede CC. O fluxo de energia na topologia de microrrede CC multiterminal é mais complicado em comparação com a configuração convencional do sistema radial. No entanto, como a conexão do sistema permite vários caminhos de transmissão de energia, ela também pode ser flexível. O sistema visa atingir o equilíbrio do compartilhamento de energia entre as unidades do sistema, bem como reduzir a tensão do esquema e o desvio de frequência. Os conversores de fonte de tensão são empregados para equilibrar automaticamente a incompatibilidade de energia se a energia disponível do sistema for menor. O principal aspecto que deve ser considerado ao projetar o sistema CC multiterminal é a proteção dos sistemas, pois se torna ainda mais difícil quando várias fontes são integradas ao sistema (WANG *et al.* 2020).

Figura 2.4: Topologia multiterminal.



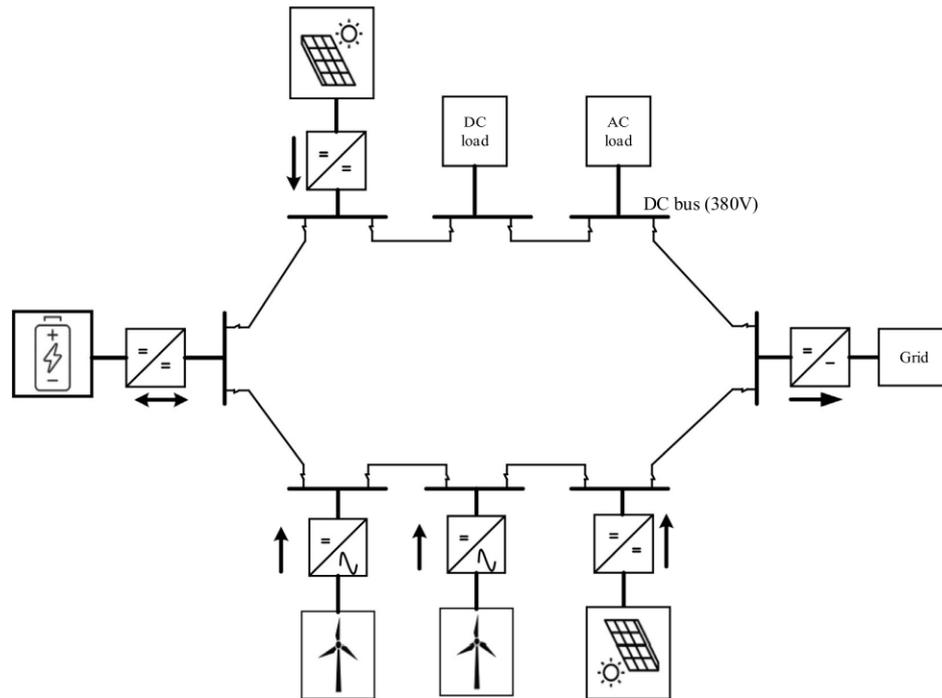
Fonte: MODU *et al.*, 2023.

2.1.3.4 Topologia de microrrede CC de barramento em anel

Para superar as restrições da topologia de barramento radial em termos de flexibilidade e gerenciamento de falhas, um sistema de distribuição do tipo loop ou anel pode ser usado. A ideia principal da topologia do tipo anel é representada na Figura 2.5. A solução sugerida consiste em conectar gerações, armazenamento e unidades de carga, tudo em um único anel. Os interruptores de proteção são colocados antes e depois de cada barramento no anel por motivos de segurança. Isso implica que cada componente do sistema tem duas maneiras possíveis de se conectar ou desconectar do anel ao longo da linha nos lados esquerdo e direito de cada barramento. O dispositivo eletrônico inteligente (IED) é empregado como um controlador para cada barramento, bem como sua interface com barramentos vizinhos adicionais. Sempre que houver um problema com qualquer barramento, o dispositivo eletrônico inteligente primeiro detectará a falha e, em seguida, isolará o barramento com defeito e fornecerá uma rota alternativa para fornecer energia aos consumidores. Esse tipo de sistema de fornecimento foi usado em cidades e ambientes industriais. Esta topologia é mais confiável do que a topologia radial porque oferece

flexibilidade à microrrede CC de tal forma que, quando ocorre uma falha, os interruptores correspondentes a separam, permitindo que cada unidade, exceto a defeituosa, continue a funcionar. Devido à sua flexibilidade, a topologia em anel fornece alta resiliência, confiabilidade, bem como operação redundante do sistema (PARK *et al.* 2013).

Figura 2.5: Topologia de microrrede CC de barramento em anel.

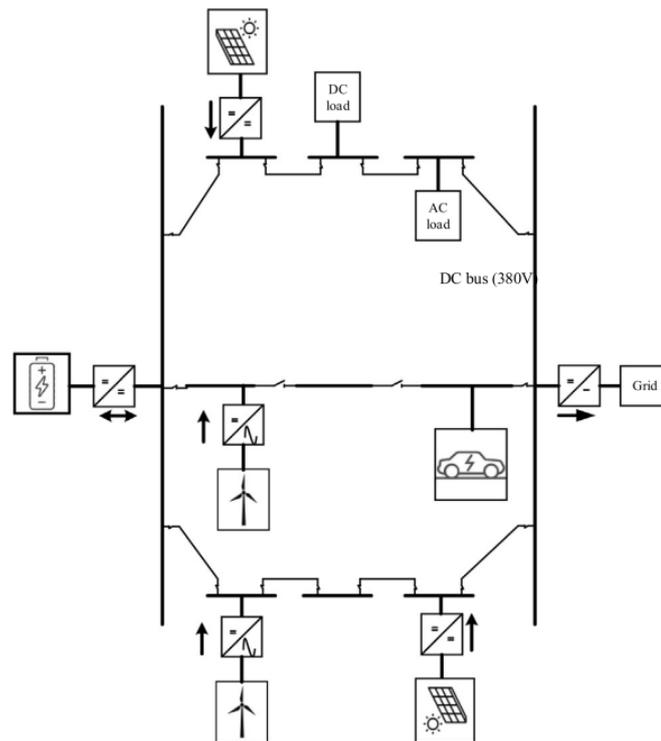


Fonte: MODU *et al.*, 2023.

2.1.3.5 Topologia de escada

Uma topologia de escada é projetada na forma de um anel, com fontes de energia distribuídas, unidades de armazenamento de energia e cargas conectadas em relação ao anel da topologia em escada. Dois barramentos são conectados ao anel da escada, conforme mostrado na Figura 2.6, qualquer um que possa fornecer energia CC para os outros anéis da escada. Dessa forma, a estabilidade da rede é significativamente melhorada. Esse tipo de topologia de sistema tem a maior redundância em comparação com outros tipos de topologia de sistema e isso tornou o sistema capaz de eliminar falhas de circuito aberto, bem como falhas de ponto único e atingir alta disponibilidade. A topologia também oferece melhor gerenciamento de falhas porque sempre que ocorre uma falha, a parte defeituosa sozinha pode ser isolada com a ajuda do switch e o sistema restante continua a funcionar normalmente (MOHAN e SASIDHARAN 2020).

Figura 2.6: Topologia de escada.

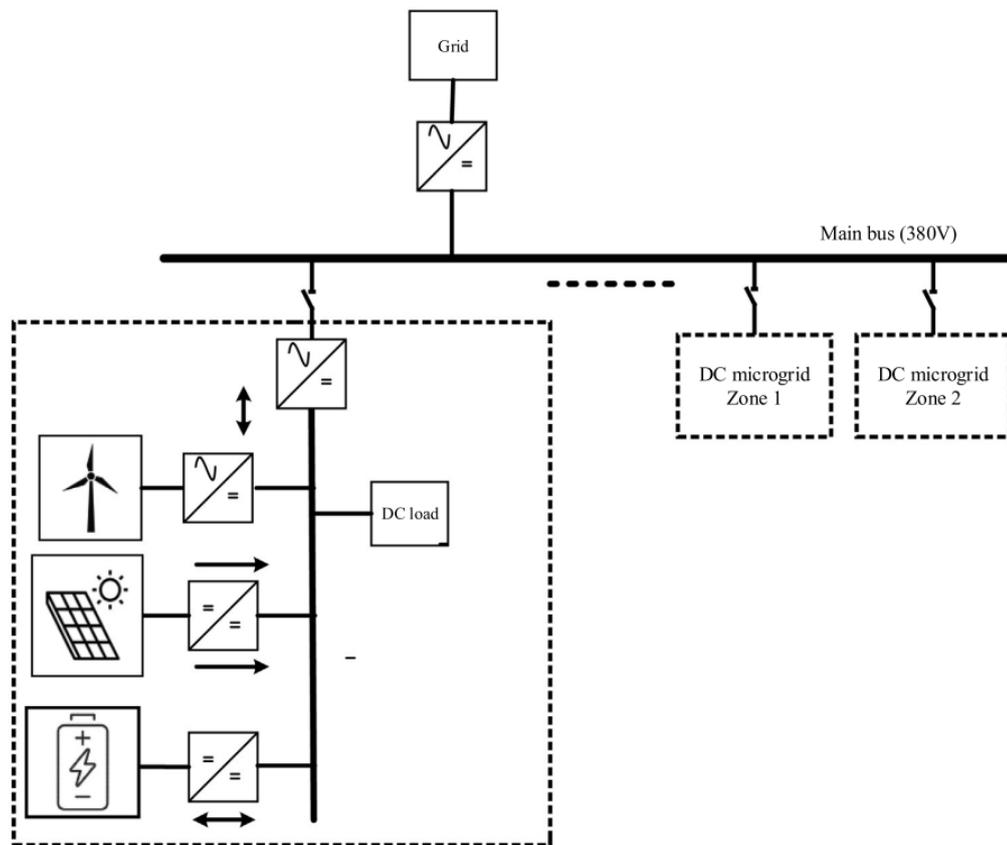


Fonte: MODU *et al.*, 2023.

2.1.3.6 Topologia zonal

Na topologia zonal, zonas são criadas dentro do sistema de microrrede, cada uma com sua proteção e centro de carga. Para melhorar a confiabilidade do sistema. A ideia por trás da topologia de microrrede zonal é descrita na Figura 2.7. Vários elementos do sistema, como gerações, unidades de armazenamento de energia, conversores eletrônicos de potência e aparelhagens de manobra, estão contidos na configuração de microrrede CC zonal com o objetivo de fornecer energia a uma coleção de cargas. Dois barramentos CC redundantes atendem a cada zona, que são alimentados pela concessionária de rede, bem como por fontes de CC e CA distribuídas. A topologia zonal fornece inúmeras opções para fornecer energia ao consumidor. A energia elétrica pode ser fornecida simultaneamente de vários barramentos, consecutivamente ou completamente de um único barramento. Mesmo assim, a energia drenada de vários barramentos dificulta o projeto e a operação do sistema de distribuição (BALOG e KREIN 2010).

Figura 2.7: Topologia zonal.



Fonte: MODU *et al.*, 2023.

2.1.4 Fontes de Alimentação em Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, também conhecidos como *off-grid*, representam soluções energéticas que não estão conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Esses sistemas são amplamente utilizados em áreas remotas, como comunidades rurais ou ribeirinhas na Amazônia, onde a expansão da rede elétrica convencional é inviável técnica ou economicamente. Para suprir as necessidades energéticas dessas regiões, diversas fontes de energia podem ser utilizadas, incluindo geradores a diesel, energia solar fotovoltaica, turbinas eólicas, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), e sistemas híbridos que combinam duas ou mais dessas tecnologias (LEITE e SOUSA 2020).

Cada uma dessas fontes apresenta vantagens e desvantagens, dependendo das condições geográficas e climáticas locais. Por exemplo, os geradores a diesel, embora amplamente utilizados, apresentam altos custos operacionais e impactos ambientais negativos. Já as fontes renováveis, como solar e eólica, oferecem uma alternativa sustentável e de menor

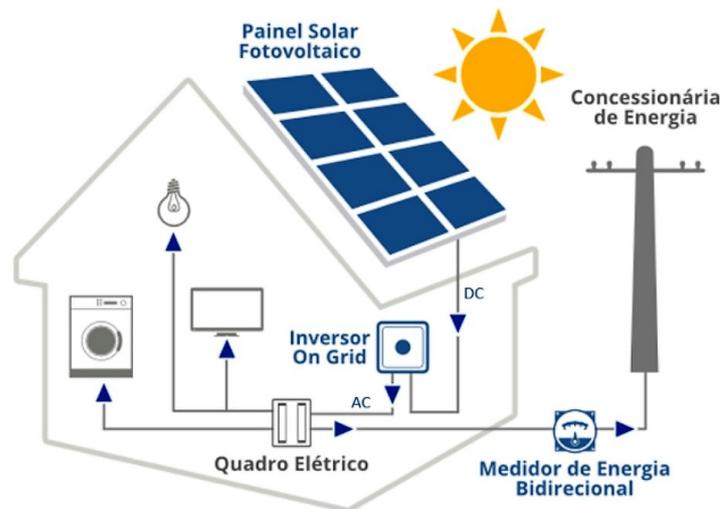
custo a longo prazo, especialmente quando associadas a sistemas de armazenamento de energia.

2.1.4.1 Sistema Solar Fotovoltaico

A energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das principais alternativas energéticas para sistemas isolados, devido à sua sustentabilidade, modularidade e alta disponibilidade em regiões tropicais, como a Amazônia.

Os sistemas fotovoltaicos convertem a luz solar diretamente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, um fenômeno físico no qual materiais semicondutores, como o silício, geram corrente elétrica quando expostos à luz. Esses sistemas são compostos, principalmente, por painéis solares, inversores, controladores de carga, e, em muitos casos, baterias para armazenamento de energia, vide Figura 2.8 abaixo.

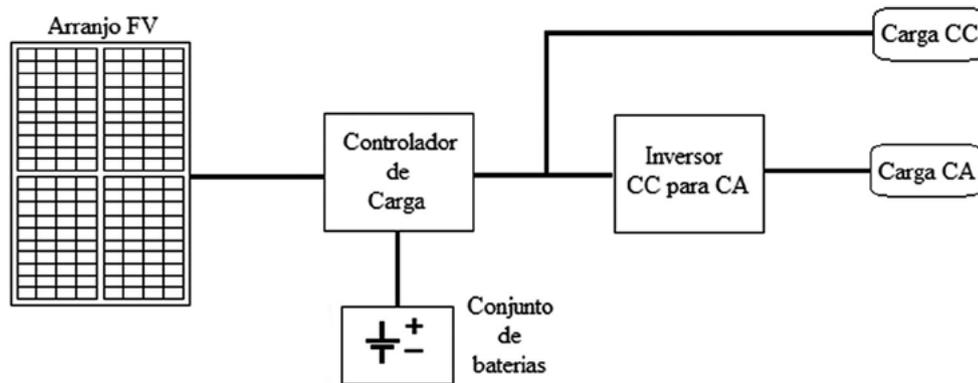
Figura 2.8: Representação de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede de alimentação.



Fonte: (JJEngenharia 2023).

A principal vantagem dos sistemas solares fotovoltaicos é sua capacidade de gerar energia de forma limpa e silenciosa, utilizando uma fonte abundante e gratuita: o sol. Além disso, a modularidade dos sistemas fotovoltaicos permite que sejam dimensionados para atender desde pequenas cargas residenciais até sistemas mais complexos, como microrredes para comunidades isoladas ou embarcações elétricas, vide Figura 2.9.

Figura 2.9: Representação de um sistema solar fotovoltaico isolado.



Fonte: Andrade, 2016.

2.1.4.2 Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e na Amazônia

No Brasil, a energia solar fotovoltaica tem experimentado um crescimento acelerado nos últimos anos. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a capacidade instalada de sistemas solares conectados à rede e isolados ultrapassou 15 GW em 2023. Esse crescimento é impulsionado por políticas de incentivo, como a isenção de impostos para equipamentos e o programa de geração distribuída.

Na região amazônica, a energia solar fotovoltaica desempenha um papel crucial na eletrificação de comunidades remotas, vide a Figura 2.10. A alta incidência de irradiação solar, combinada com as dificuldades logísticas de expandir o Sistema Interligado Nacional (SIN) para áreas isoladas, torna os sistemas fotovoltaicos uma solução viável e sustentável. Projetos de microrredes solares já têm sido implementados com sucesso em várias comunidades ribeirinhas, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e a redução da dependência de geradores a diesel (LEITE e SOUSA 2020).

A integração de sistemas solares fotovoltaicos com microrredes permite uma operação eficiente e autônoma em comunidades isoladas. Nessas configurações, o barramento de corrente contínua facilita a conexão dos painéis solares, dispositivos de armazenamento, e cargas de forma simplificada. A modularidade dos sistemas solares também possibilita futuras expansões, adaptando-se às necessidades crescentes das comunidades ou embarcações elétricas (LEITE e SOUSA 2020).

Figura 2.10: Sistema Interligado Nacional (SIN) e Sistemas Isolados (SISOL).



Fonte: Leite e Sousa, 2020.

2.1.4.3 Sistema de Armazenamento de Baterias

Para garantir o fornecimento contínuo de energia em sistemas isolados, é essencial o uso de sistemas de armazenamento. As baterias desempenham um papel fundamental ao armazenar o excedente de energia gerado durante o dia para ser utilizado à noite ou em períodos de baixa irradiação solar.

Os sistemas de armazenamento modernos utilizam, principalmente, baterias de íons de lítio, que apresentam alta densidade de energia, longa vida útil e eficiência superior em comparação às baterias de chumbo-ácido, tradicionalmente empregadas em sistemas fotovoltaicos. Além disso, a integração de baterias com controladores de carga inteligentes permite otimizar o desempenho do sistema, garantindo maior confiabilidade e reduzindo perdas.

Entretanto, tendo em vista a necessidade de aplicação em embarcações, as baterias de chumbo ácido são as mais utilizadas. O aspecto custo é o fator determinante, associado à capacidade de entregar altas potências (CHAN 2002).

2.2 Conversores CC-CC

2.2.1 Introdução

Em muitas aplicações industriais, é necessário converter uma fonte de tensão CC (Corrente Contínua) fixa em um fonte de tensão CC variável. Para isso, pode ser utilizado um conversor CC-CC, ou *chopper*, que converte diretamente de CC para CC. Da mesma forma que um transformador, ele pode ser utilizado para abaixar ou elevar a tensão de uma fonte CC (RASHID 1999).

Os *choppers* são largamente utilizados no controle de tração de motores em automóveis elétricos, empilhadeiras e transportadores em minas. Eles oferecem controle de aceleração suave, alta eficiência e resposta dinâmica rápida. Além disso, os *choppers* são utilizados como conversores de potência que podem ser utilizados para a variação do nível de tensão CC de saída destes dispositivos, como o conversor de potência tipo *buck*, a regulação normalmente é conseguida por modulação em largura de pulsos a uma frequência fixa, sendo o dispositivo de chaveamento na maioria das vezes um BJT (*Bipolar Junction Transistors* – Transistores Bipolares De Junção), MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor* – Transistores De Efeito De Campo Metal-Óxido Semicondutor) ou IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* – Transistor Bipolar de Porta Isolada) (RASHID 1999).

Tendo em vista a necessidade de reduzir a tensão do barramento de corrente contínua para níveis adequados às cargas conectadas, como motores elétricos e dispositivos auxiliares, o uso de um conversor de potência *buck* nesta microrrede se mostrou o mais recomendado. Sobretudo, pois o conversor de potência *buck* apresenta alta eficiência energética, o que é essencial em sistemas isolados que buscam maximizar o aproveitamento da energia disponível. Sua simplicidade de design, baixo custo e capacidade de responder rapidamente a variações de carga tornam-no particularmente adequado para a aplicação em embarcações elétricas, onde a estabilidade e a confiabilidade da tensão são indispensáveis para o desempenho do sistema. Nesta seção será realizado o estudo da dinâmica não linear envolvida no processo de conversão de potência do conversor designado para a ação conjunta na microrrede.

2.2.2 Modelagem do conversor de potência

Como fora dito, o conversor de potência proposto para atuar na microrrede em estudo é um conversor de potência *buck*. A ideia central deste conversor é abaixar o nível de tensão de entrada para um valor igual ou inferior V_i . Entretanto, haja vista que o conversor é realizado com o auxílio de um componente ativo, se torna possível controlar a razão cíclica deste, dada por.

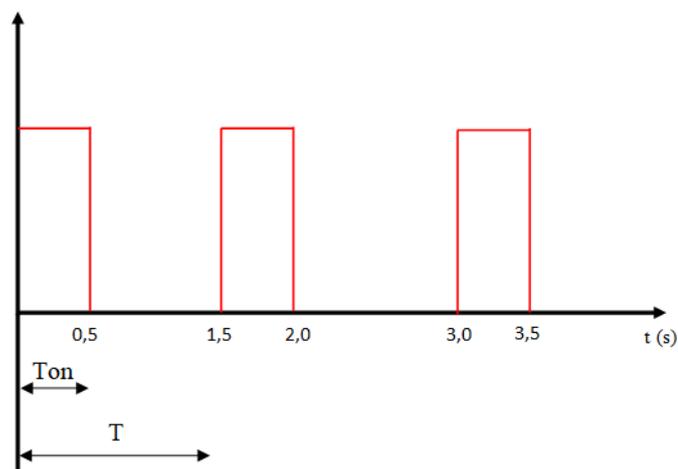
$$d = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.1)$$

Em que,

- T_{on} : tempo em que o componente ativo permite a passagem de corrente
- T : tempo total do ciclo de operação.

Como exemplo, considere o sinal PWM (*Pulse Width Modulation*, Modulação por Largura de Pulso) de razão cíclica fixa na Figura 2.11 a seguir,

Figura 2.11: Sinal PWM com razão cíclica fixa



Fonte: Autoria própria.

Daí, é possível perceber que a razão cíclica do sinal é dada por:

$$d = \frac{T_{on}}{T} = \frac{0,5}{1,5} \approx 0,333 \quad (2.2)$$

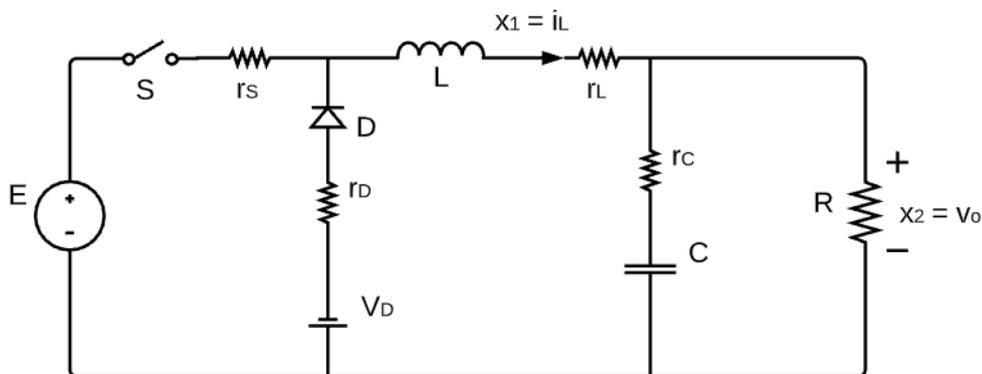
Dessa forma, como será visto adiante, o circuito proposto realiza o controle da corrente

média de saída I_0 , a partir do controle da razão cíclica, que rege o funcionamento do componente ativo empregado.

2.2.3 Função de transferência do conversor de potência *buck*

A topologia proposta para o conversor de potência *buck*, é exibida na Figura 2.12. Conforme Salimi (2015), através da descrição matemática por espaço de estados, o conversor pode ser modelado no modo de condução contínua (que é uma condição de operação em que a corrente através do indutor nunca atinge zero durante o ciclo de chaveamento. Isso significa que, tanto na fase em que o transistor está ligado quanto na fase em que está desligado, há uma corrente contínua fluindo pelo indutor). Para o circuito, a corrente através do indutor (x_1) e a tensão de saída (x_2) serão as variáveis de estado. Ademais, u será a razão cíclica de chaveamento do circuito, de tal forma que, $0 < u < 1$. Além disso, E é a tensão de entrada, S dispositivo chaveador, r_s, r_d, r_L são as resistências parasitas, V_D é a representação da tensão sobre o diodo, e D, L, C e R representam o diodo, indutor, capacitor e resistor, respectivamente.

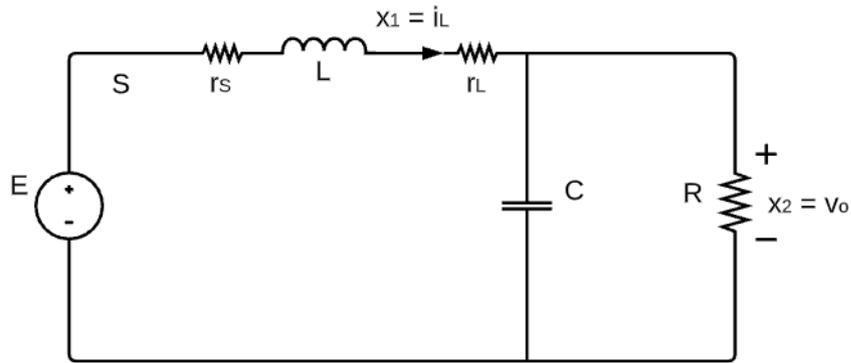
Figura 2.12: Conversor de potência *buck* considerando diferentes resistências parasitas



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, com a chave fechada (durante $0 < t < uT_s$, sendo T_s o período do sinal de chaveamento) o diodo não conduzirá corrente, portanto, pode ser omitido das análises, conforme exibe a Figura 2.13.

Figura 2.13: Circuito equivalente do conversor durante o estado ON



Fonte: Autoria própria.

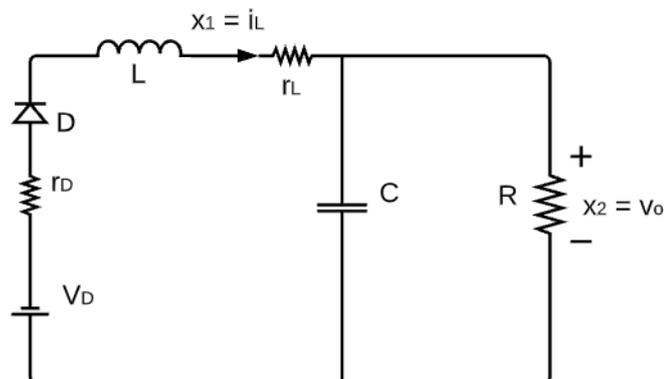
Desta forma, a equação de espaço de estados para esse período pode ser obtida através das Leis de Kirchhoff dos nós e das malhas, de tal forma que

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L}(-(r_s + r_L)x_1 - x_2 + E) \quad (2.3)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad (2.4)$$

Igualmente, com a chave aberta (durante $uT_s < t < T_s$), a corrente remanescente no indutor percorre o diodo e mantém a tensão de saída no nível constante, conforme a figura 2.14, que apresenta o circuito nesse estado,

Figura 2.14: Circuito equivalente do conversor durante o estado OFF



Fonte: Autoria própria.

Para esse instante, aplicando novamente as considerações de Kirchhoff para os nós e as malhas, tem-se que

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{L}((r_D + r_L)x_1 + x_2 + V_D) \quad (2.5)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad (2.6)$$

Combinando as equações 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6, o modelo de espaço de estado médio do conversor de tensão pode ser escrito como segue:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{L}[((r_s - r_D)u + r_D + r_L)x_1 + x_2 - (E + V_D)u + V_D] \quad (2.7)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad (2.8)$$

Definindo U_{ref} como a tensão de saída de referência, o modelo do conversor de potência *buck* pode ser reescrito de forma geral como a matriz:

$$x_1 = f(x) + g(x)u \quad (2.9)$$

$$x_2 = h(x) = x_2 - U_{ref} \quad (2.10)$$

Em que

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}((r_D + r_L)x_1 + x_2 + V_D) \\ \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}((r_s - r_D)x_1 - E - V_D) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Em que $x = [x_1, x_2] = [i_L, v_0]$ é o vetor de estado do modelo.

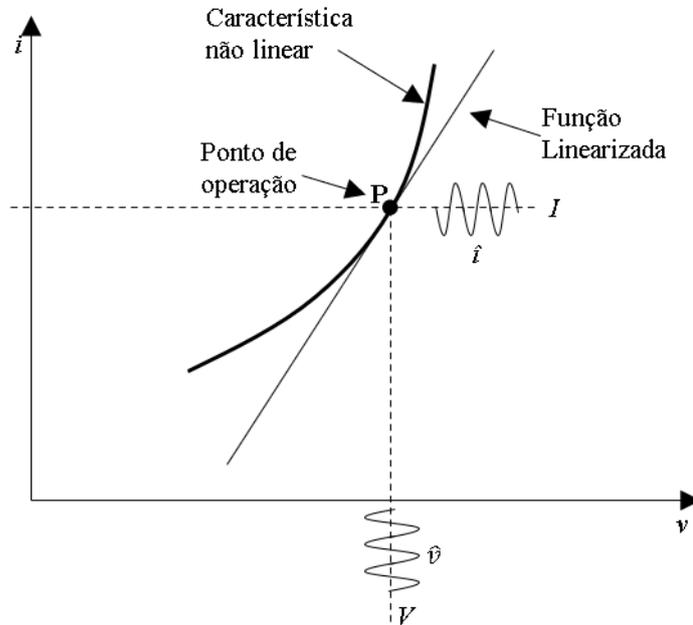
2.2.4 Linearização do modelo para pequenos sinais

Nesta seção, o modelo matemático do conversor de potência *buck* definido em 2.11 e 2.12 será linearizado, haja vista que os componentes não lineares presentes no circuito introduzem um comportamento anômalo quando operado, sobretudo, em malha aberta.

Como já fora visto, a linearização é feita escolhendo-se um ponto de operação de modo

que o sistema se torne linear para pequenas variações em torno desse ponto (vide a Figura 2.15). Por isso, o modelo resultante é dito para pequenos sinais (KAZIMIERCZUK 2015).

Figura 2.15: Função linearizada no entorno de um ponto de operação



Fonte: (AHMED 2000).

Uma opção para a linearização do sistema consiste na expansão das funções não lineares por meio da série de Taylor. Alternativamente, é possível considerar que o conversor tem comportamento linear em torno de um ponto de operação qualquer X (valor CC), desde que as perturbações (parcela CA) em torno desse ponto sejam suficientemente pequenas (ERICKSON e MAKSIMOVIC 2007). Assim sendo, todas as variáveis dinâmicas do sistema podem ser definidas pela soma das duas parcelas, conforme

$$i_s = I_s + \hat{i}_s \quad (2.13)$$

$$v_D = V_D + \hat{v}_D \quad (2.14)$$

$$i_L = I_L + \hat{i}_L \quad (2.15)$$

$$v_i = V_i + \hat{v}_i \quad (2.16)$$

$$d = D + \hat{d} \quad (2.17)$$

Sendo:

i_s : Corrente sobre a chave (no caso prático, um componente ativo: MOSFET, IGBT ou outro);

v_D : Tensão sobre o diodo;
 i_L : Corrente sobre o diodo;
 v_i : Tensão de entrada;
 d : razão cíclica.

Das definições do circuito conversor de potência *buck*, é sabido que

$$i_s = I_L d = i_L d \quad (2.18)$$

$$v_D = V_i d = v_i d \quad (2.19)$$

Portanto,

$$I_s + \hat{i}_s = (I_L + \hat{i}_L)(D + \hat{d}) = I_L D + I_L \hat{d} + \hat{i}_L D + \hat{i}_L \hat{d} \quad (2.20)$$

$$V_D + \hat{v}_D = (V_i + \hat{v}_i)(D + \hat{d}) = V_i D + V_i \hat{d} + \hat{v}_i D + \hat{v}_i \hat{d} \quad (2.21)$$

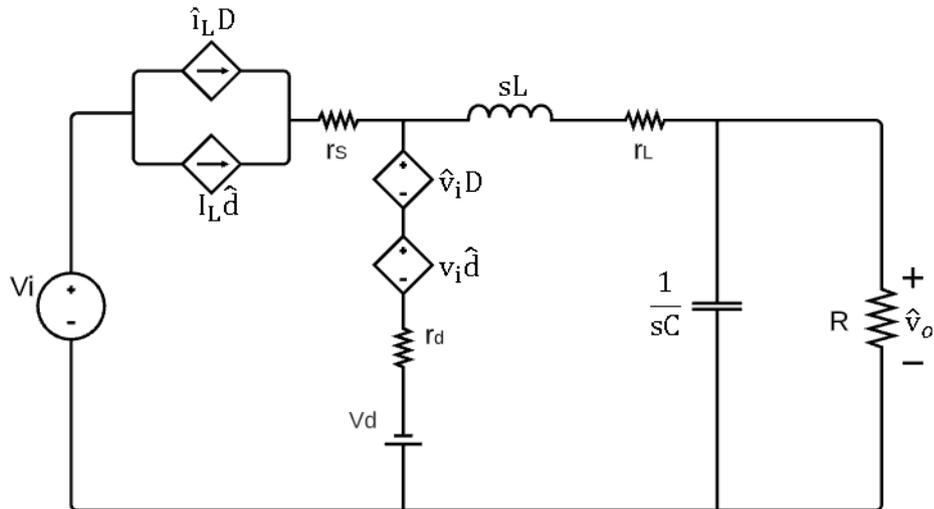
Das equações acima, é possível perceber que surge o produto entre duas variáveis CA, como é o caso de $i_L \hat{d}$. Esse termo não é linear, no entanto, seguindo as premissas estabelecidas de que as perturbações são muito menores em magnitudes comparadas aos valores no ponto de operação, é possível desconsiderar suas ações, visto que seu valor é desprezível em relação as componentes CC. Assim sendo, tem-se que:

$$I_s + \hat{i}_s = I_L D + I_L \hat{d} + \hat{i}_L D \quad (2.22)$$

$$V_D + \hat{v}_D = V_i D + V_i \hat{d} + \hat{v}_i D \quad (2.23)$$

Fazendo isso, é possível substituir tais termos no circuito equivalente (vide Figura 2.16), de tal forma a obter o modelo linear do conversor de potência *buck* para pequenos sinais. Com o intuito de adiantar os cálculos de transformação, já foi aplicada a transformada de Laplace no circuito.

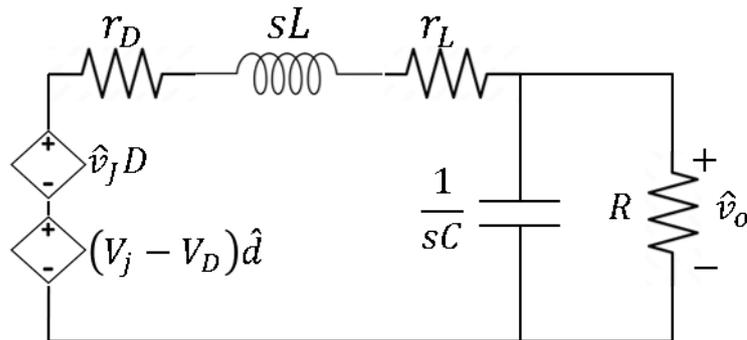
Figura 2.16: Modelo CC linearizado para o ponto de operação



Fonte: Autoria própria.

A fim de determinar a função de transferência do circuito acima, é necessário levar em consideração que para o circuito em questão o resistor r_s não provoca maiores variações na corrente enviada para o circuito, haja vista o modelo linearizado do componente chaveado. Portanto, a resistência r_s pode ser substituída por um circuito aberto e o circuito equivalente pode ser simplificado como.

Figura 2.17: Circuito equivalente para pequenos sinais



Fonte: Autoria própria.

A função de transferência é do circuito acima é dada por:

$$\hat{v}_o(s) = \frac{\left(\frac{1}{LC}\right)(V_i - V_D)}{s^2 + \left[\frac{(r_D + r_L)}{L} + \frac{1}{RC}\right]s + \frac{(r_D + r_L) + R}{RLC}} \hat{d}(s) + \frac{\left(\frac{1}{LC}\right)D}{s^2 + \left[\frac{(r_D + r_L)}{L} + \frac{1}{RC}\right]s + \frac{(r_D + r_L) + R}{RLC}} \hat{v}_i(s) \quad (2.24)$$

Considerando a tensão de entrada v_i constante, tem-se a função de transferência que relaciona a tensão de saída com a razão cíclica dada por:

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\left(\frac{1}{LC}\right)D}{s^2 + \left[\frac{(r_D + r_L)}{L} + \frac{1}{RC}\right]s + \frac{(r_D + r_L) + R}{RLC}} \quad (2.25)$$

Para esse trabalho, serão desconsiderados os fatores parasitas do conversor, portanto, adotando $G(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)}$, tem-se que a função de transferência que representa o modelo linearizado do conversor é dada por:

$$G(s) = \frac{\frac{V_i}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (2.26)$$

2.3 Motores CC

Os motores de corrente contínua (CC) são amplamente utilizados em aplicações que exigem controle preciso de velocidade e torque, cobrindo uma ampla gama de variações. Um método comum para alcançar esse controle envolve o uso de motores CC com excitação independente, onde a excitação do campo é mantida constante. A velocidade do motor é então controlada pela variação da tensão aplicada nos seus terminais. Este estudo investiga como a velocidade do motor responde às mudanças na tensão aplicada nos terminais da armadura, bem como os transitórios mecânicos nos sistemas de acionamento do motor (SEN 2021). Para uma análise mais simples na modelagem de uma máquina CC, são usadas as seguintes considerações:

- A saturação magnética é desconsiderada, implicando que os valores de indutância

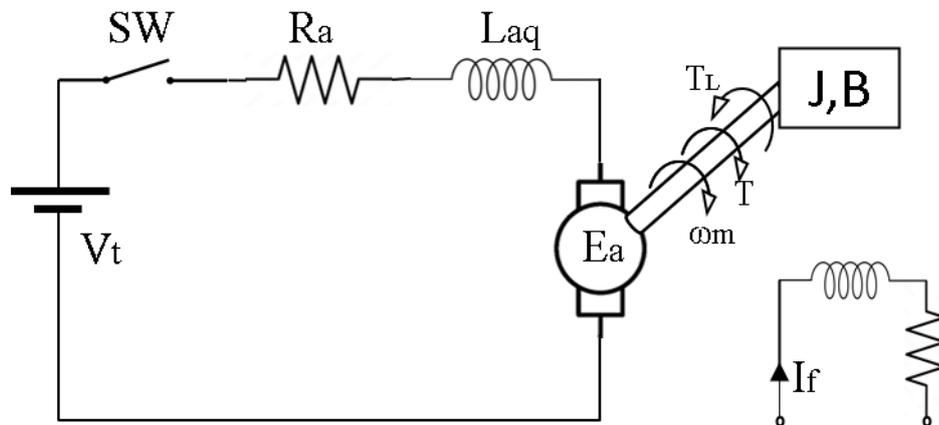
são independentes das correntes.

- Não há indutância mútua entre o circuito de campo e o circuito de armadura e, conseqüentemente, não há efeito desmagnetizante por reação de armadura.

2.3.1 Modelagem de um motor CC com excitação independente

Um motor CC com excitação independente separado é mostrado na Figura 2.18.

Figura 2.18: Motor CC com excitação independente



Fonte: Autoria própria.

Assumindo a linearidade magnética da máquina, isto é, assumindo que o fluxo magnético é proporcional a corrente de excitação da máquina, as equações básicas de uma máquina CC são:

$$T = k_m i_a \quad (2.27)$$

$$e_a = k_m \omega_m \quad (2.28)$$

Onde,

- e_a : tensão gerada na armadura (V);
- k_m : constante da máquina;
- ω_m : velocidade angular do rotor (rad/s);
- T : torque (Nm);

- i_a : corrente de armadura (A).

Aplicando a transformada de Laplace nas equações 2.27 e 2.28, tem-se:

$$T(s) = k_m I_a(s) \quad (2.29)$$

$$E_a(s) = k_m \omega_m(s) \quad (2.30)$$

O transitório é obtido com o fechamento da chave SW, vista na Figura 2.18, onde, após seu fechamento, tem-se:

$$V_t = e_a + R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} \quad (2.31)$$

Das equações 2.28 e 2.31, obtém-se:

$$V_t = k_m \omega_m + R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} \quad (2.32)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação 2.32, admitindo-se condições iniciais nulas, obtém-se:

$$V_t(s) = k_m \omega_m(s) + R_a I_a(s) + L_{aq} s I_a(s) \quad (2.33)$$

Simplificando a equação 2.33, tem-se:

$$V_t = k_m \omega_m(s) + I_a(s)(1 + s\tau_a) \quad (2.34)$$

Onde,

$\tau_a = L_{aq}/R_a$: constante elétrica de tempo da armadura.

Por outro lado, a equação mecânica para qualquer motor é:

$$T = k_m i_a \approx J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (2.35)$$

Onde,

- J : momento polar de inércia combinado entre a carga e o rotor do motor, (kg.m^2);
- B : viscosidade de fricção equivalente de carga e do motor, (N.s/m^2);
- T_L : torque mecânica da carga, (N.m).

O termo $B\omega_m$ representa o torque da perda rotacional do sistema. Da transformada de Laplace da equação 2.35, resulta em:

$$T = k_m I_a \approx J\omega_m(s) + B\omega_m(s) + T_L(s) \quad (2.36)$$

Das equações 2.36 e 2.29,

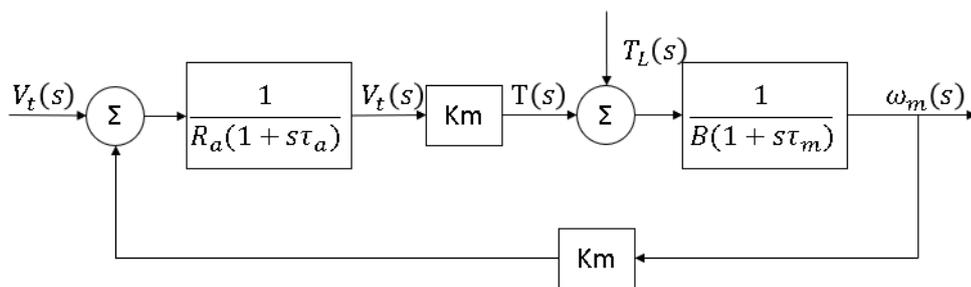
$$\omega_m(s) = \frac{T(s) - T_L(s)}{B(1 + s\frac{J}{B})} = \frac{k_m I_a(s) - T_L(s)}{R_a(1 - s\tau_m)} \quad (2.37)$$

Onde, $\tau_m = J/B$: constante mecânica de tempo do sistema. Das equações ?? e 2.34

$$I_a(s) = \frac{V_t(s) - E_a(s)}{R_a(1 + s\tau_a)} = \frac{V_t(s) - K_m\omega_m(s)}{R_a(1 + s\tau_a)} \quad (2.38)$$

O diagrama de blocos representando as equações 2.37 e 2.38 é mostrado na Figura 2.19

Figura 2.19: Diagrama de blocos de um motor CC



Fonte: Autoria própria.

2.4 Tópicos de Controle

Nesta seção, serão apresentados conceitos fundamentais sobre sistemas de controle, com ênfase no controlador PID e na técnica de alocação de polos. Essas abordagens são

amplamente utilizadas no projeto de sistemas devido à sua eficácia e versatilidade. Sistemas de controle têm como objetivo regular o comportamento de sistemas dinâmicos, garantindo que eles sigam um determinado objetivo ou se mantenham em condições desejadas, mesmo sob perturbações e variações nos parâmetros.

2.4.1 Controlador PID

O controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é uma das estratégias de controle mais utilizadas na engenharia, devido à sua simplicidade e eficiência (NISE 2020). Ele baseia-se em três ações de controle:

- Proporcional (P): Reduz o erro do sistema em relação ao valor de referência. Sua ação é proporcional à magnitude do erro.
- Integral (I): Elimina o erro em regime permanente acumulando o erro ao longo do tempo.
- Derivativo (D): Melhora a resposta transitória, antecipando mudanças no erro com base em sua taxa de variação.

A lei de controle do PID pode ser escrita como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.39)$$

onde:

- $u(t)$ é o sinal de controle.
- $e(t)$ é o erro entre o valor desejado e o valor medido.
- K_p , K_i e K_d são os ganhos proporcional, integral e derivativo, respectivamente.

A principal vantagem do controlador PID é sua capacidade de ajustar-se a diferentes requisitos de desempenho, como resposta rápida, eliminação de erro em regime e minimização de oscilações. No entanto, sua sintonia pode ser desafiadora, especialmente em sistemas com dinâmica complexa (NISE 2020).

2.4.2 Alocação de Polos

Existem diferentes técnicas para o ajuste dos parâmetros de um controlador PID, como o método de Ziegler-Nichols, por exemplo. Neste trabalho, será apresentada a técnica de alocação de polos, que é uma metodologia usada para determinar a posição desejada dos polos de um sistema de controle, garantindo que ele atenda a critérios de estabilidade e desempenho especificados. Para sistemas descritos no espaço de estados, a alocação de polos pode ser realizada utilizando o método de Ackermann (NISE 2020).

Seja um sistema no espaço de estados representado por:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (2.40)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (2.41)$$

onde A , B , C e D são matrizes que descrevem a dinâmica do sistema. O objetivo da alocação de polos é projetar uma matriz de ganho K tal que a realimentação de estados $u(t) = -Kx(t)$ posicione os polos do sistema em localizações desejadas.

A matriz de ganhos K é calculada utilizando a fórmula de Ackermann:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \Phi^{-1} P(A), \quad (2.42)$$

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 .

2.4.2.1 Exemplo de Aplicação

Considere um sistema representado pelas matrizes:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

Deseja-se posicionar os polos do sistema em $-2 \pm j2$. O polinômio característico desejado é dado por:

$$P(s) = (s + 2 - j2)(s + 2 + j2) = s^2 + 4s + 8. \quad (2.44)$$

Dessa forma, a matriz de controlabilidade do sistema é calculada como:

$$\Phi = \begin{bmatrix} B & AB \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}. \quad (2.45)$$

Para encontrar o vetor de ganhos K , aplica-se a fórmula de Ackermann:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \Phi^{-1} P(A), \quad (2.46)$$

onde $P(A)$ é o polinômio característico desejado avaliado na matriz A . Será calculado $P(A)$:

$$P(A) = A^2 + 4A + 8I, \quad (2.47)$$

em que I é a matriz identidade de mesma dimensão que A . Inicialmente, calcula-se A^2 :

$$A^2 = A \cdot A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & -3 \\ 6 & 11 \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

Agora, soma-se os termos para obter $P(A)$:

$$P(A) = A^2 + 4A + 8I, \quad (2.49)$$

$$P(A) = \begin{bmatrix} -2 & -3 \\ 6 & 11 \end{bmatrix} + 4 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} + 8 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.50)$$

$$P(A) = \begin{bmatrix} -2 & -3 \\ 6 & 11 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 4 \\ -8 & -12 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{bmatrix}, \quad (2.51)$$

$$P(A) = \begin{bmatrix} 6 & 1 \\ -2 & 7 \end{bmatrix}. \quad (2.52)$$

Em seguida, calcula-se Φ^{-1} . A matriz de controlabilidade é:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}. \quad (2.53)$$

O determinante de Φ é:

$$\det(\Phi) = (0)(-3) - (1)(1) = -1. \quad (2.54)$$

Assim, a inversa de Φ é:

$$\Phi^{-1} = \frac{1}{\det(\Phi)} \begin{bmatrix} -3 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.55)$$

Agora, calcula-se K :

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \Phi^{-1} P(A), \quad (2.56)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 & 1 \\ -2 & 7 \end{bmatrix}, \quad (2.57)$$

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 & 1 \\ -2 & 7 \end{bmatrix}, \quad (2.58)$$

$$K = \begin{bmatrix} -2 & 7 \end{bmatrix}. \quad (2.59)$$

Portanto, o vetor de ganhos K é:

$$K = \begin{bmatrix} -2 & 7 \end{bmatrix}. \quad (2.60)$$

Com o vetor de ganhos K calculado, o sistema realimentado apresentará polos nas posições especificadas $-2 \pm j2$. Isso garante que o comportamento dinâmico do sistema satisfaça os requisitos de desempenho definidos.

2.5 Conclusão

Neste capítulo, foi apresentada a modelagem do sistema, que serve de base para o desenvolvimento e análise do controle robusto abordado posteriormente. Inicialmente, foram explorados os conceitos fundamentais de microrredes, destacando sua estrutura e as características específicas das microrredes de corrente contínua. Em seguida, foi abordado o papel dos conversores CC-CC, com ênfase no conversor de potência *buck*, incluindo sua modelagem matemática, função de transferência e linearização para pequenos sinais. Por

fim, analisou-se a modelagem dinâmica de motores de corrente contínua com excitação independente, considerando sua interação com o sistema.

Por fim, a escolha entre o controlador PID e a alocação de polos depende das características do sistema e dos requisitos de projeto. Enquanto o controlador PID é amplamente utilizado em aplicações práticas devido à sua simplicidade, a alocação de polos é uma ferramenta poderosa para sistemas complexos, onde a estabilidade e o desempenho precisam ser garantidos com precisão.

Essas fundamentações fornecem uma visão completa do comportamento dinâmico do sistema, servindo como ponto de partida para o projeto de um controle robusto eficiente. No próximo capítulo, serão exploradas as técnicas de controle robusto, com foco na aplicação dos modelos desenvolvidos para garantir a estabilidade e o desempenho do sistema mesmo diante de incertezas e perturbações.

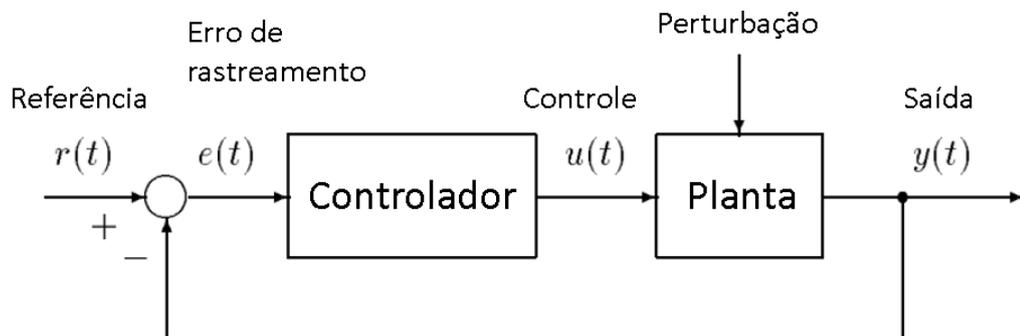
Capítulo 3

CONTROLE ROBUSTO

3.1 Introdução

Um sistema de controle é um mecanismo que faz com que certas variáveis físicas de um sistema, denominado planta, se comportem de maneira prescrita, apesar da presença de incertezas e perturbações.

Figura 3.1: Diagrama de blocos de um sistema de controle retroalimentado.



Fonte: Autoria própria.

A planta ou sistema a ser controlado é um sistema dinâmico, como uma aeronave, processo químico, máquina-ferramenta, motor elétrico ou robô, e o objetivo do controle é fazer com que a saída do sistema $y(t)$ siga uma entrada de referência $r(t)$ tão próximo quanto possível, apesar dos distúrbios que afetam o sistema. O controle automático é obtido através do emprego de *feedback* (BHATTACHARYYA e KEEL 1995). Em um sistema de realimentação unitária ou de malha fechada (ver Figura 3.1), a ação de controle é tomada aplicando-se $u(t)$ à planta, e isso é baseado na diferença, em cada instante de

tempo t , entre o valor real da saída da planta a ser controlada $y(t)$ e a referência prescrita ou saída desejada $r(t)$. O controlador é projetado para levar essa diferença, o erro de rastreamento $e(t)$ a zero. Esses sistemas de controle também são chamados de reguladores ou servomecanismos (CHAPELLAT *et al.* 1994).

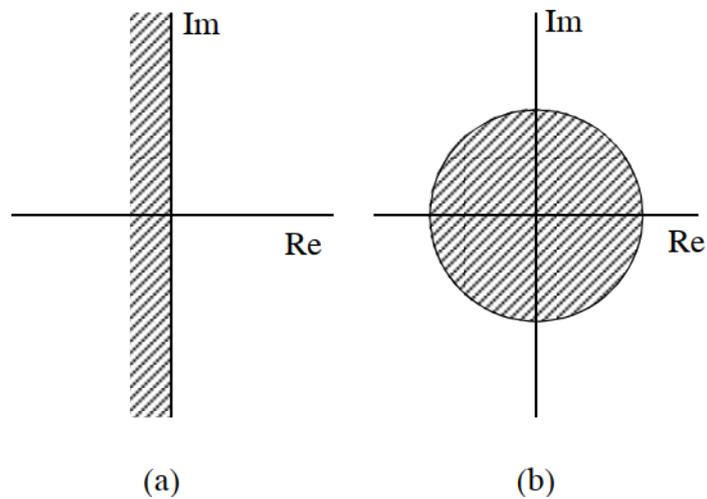
Estabilidade e desempenho são duas das questões fundamentais no projeto, análise e avaliação de sistemas de controle. A estabilidade do sistema de circuito fechado é um requisito absoluto, uma vez que a sua ausência faz com que os sinais cresçam sem limites, eventualmente destruindo e quebrando a planta. Isto é o que acontece quando uma aeronave cai, ou um satélite gira fora de controle ou o núcleo de um reator nuclear aquece incontrolavelmente e derrete. Em sistemas de engenharia é de fundamental importância que os sistemas de controle sejam projetados de modo que a estabilidade seja preservada diante de diversas classes de incerteza. Esta propriedade é conhecida como estabilidade robusta (BHATTACHARYYA e KEEL 1995).

A estabilidade robusta, segundo Bhattacharyya e Keel (1995), refere-se à capacidade de um sistema controlado permanecer estável frente a incertezas presentes em seus modelos ou parâmetros. Um sistema é considerado robustamente estável se todas as plantas pertencentes a uma família de modelos incertos \mathcal{P} permanecerem estáveis para o controlador projetado.

Matematicamente, dado um conjunto de plantas \mathcal{P} , o sistema é robustamente estável se, para todas as $P(s) \in \mathcal{P}$, os polos da função de transferência em malha fechada residirem em regiões específicas do plano complexo:

- No plano s (sistemas contínuos): os polos devem estar no lado esquerdo do plano complexo (vide Figura 3.2.(a)).
- No plano z (sistemas discretos): os polos devem estar dentro do círculo unitário (vide Figura 3.2.(b)).

Figura 3.2: Regiões de estabilidades.



Fonte: Bhattacharyya e Keel (1995).

Além disso, a estabilidade robusta exige que o sistema tolere incertezas dentro de um limite predefinido, garantindo que as condições de estabilidade sejam satisfeitas para todas as possíveis instâncias de modelos na família considerada. Essa abordagem é essencial em sistemas reais, onde variações paramétricas, ruídos e perturbações externas são inevitáveis (CHAPELLAT *et al.* 1994).

3.2 Projeto de Controlador Robusto com Variação Paramétrica

No contexto de sistemas com incertezas estruturadas, estas podem ser descritas por variações em parâmetros representativos do modelo matemático que define o sistema. Diversas ferramentas podem ser utilizadas para projetar um controlador capaz de lidar com tais variações no modelo, garantindo a estabilidade e o desempenho do sistema mesmo diante dessas incertezas. Ao considerar variações paramétricas dentro de uma família de incertezas do tipo politópica (ou *hiperbox*), uma das principais ferramentas é o **Teorema de Kharitonov**, que tem como objetivo verificar a estabilidade de um polinômio em relação a uma família de incertezas previamente especificada.

3.2.1 Teorema de Kharitonov

O **Teorema de Kharitonov** é um marco no desenvolvimento da teoria de controle robusto paramétrico, utilizando a abordagem baseada na função de transferência. As incertezas nos parâmetros do sistema são representadas por uma família de incertezas:

$$\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \in \mathbb{R}^n, \quad (3.1)$$

onde cada parâmetro incerto é independente dos demais e é limitado por valores previamente conhecidos:

$$\delta_i^- \leq \delta_i \leq \delta_i^+, \quad \forall i = 0, 1, \dots, n. \quad (3.2)$$

Considerando um polinômio intervalar descrito como:

$$p(s, \delta) = \delta_0 + \delta_1 s + \delta_2 s^2 + \dots + \delta_n s^n \quad (3.3)$$

o desafio reside em verificar a estabilidade de todos os polinômios possíveis dentro dessa família de incertezas, tarefa que se torna inviável devido à infinidade de combinações possíveis. O Teorema de Kharitonov permite simplificar essa análise testando apenas quatro polinômios específicos, desde que algumas condições sejam satisfeitas, como descrito a seguir:

1. O polinômio intervalar deve manter o mesmo grau para qualquer variação dos coeficientes, ou seja, o coeficiente do termo de maior grau nunca pode ser zero.
2. As incertezas devem ser do tipo intervalar politópica, onde os coeficientes incertos variam de forma independente dentro de limites previamente estabelecidos:

$$\Delta = [\delta_0^-, \delta_0^+] \times [\delta_1^-, \delta_1^+] \times \dots \times [\delta_n^-, \delta_n^+].$$

Sob essas condições, os quatro **polinômios de Kharitonov**, correspondentes aos vértices do retângulo de Kharitonov, são definidos como:

$$Kh_1(s) = \delta_0^- + \delta_1^- s + \delta_2^+ s^2 + \delta_3^+ s^3 + \delta_4^- s^4 + \delta_5^- s^5 + \dots \quad (3.4)$$

$$Kh_2(s) = \delta_0^+ + \delta_1^+ s + \delta_2^- s^2 + \delta_3^- s^3 + \delta_4^+ s^4 + \delta_5^+ s^5 + \dots \quad (3.5)$$

$$Kh_3(s) = \delta_0^+ + \delta_1^- s + \delta_2^- s^2 + \delta_3^+ s^3 + \delta_4^+ s^4 + \delta_5^- s^5 + \dots \quad (3.6)$$

$$Kh_4(s) = \delta_0^- + \delta_1^+ s + \delta_2^+ s^2 + \delta_3^- s^3 + \delta_4^+ s^4 + \delta_5^+ s^5 + \dots \quad (3.7)$$

De acordo com o **Teorema de Kharitonov**: Seja $p(s, \delta)$ uma família de polinômios intervalares que preserva o grau do polinômio e apresenta incertezas do tipo *hiperbox*. Essa família será robustamente estável se, e somente se, todos os quatro polinômios de Kharitonov forem Hurwitz-estáveis, ou seja, todas as suas raízes estiverem no semiplano esquerdo do plano complexo (BHATTACHARYYA e KEEL 1995).

3.2.2 Teorema do Mapeamento

Generalizando o Teorema de Kharitonov para funções multilineares, o Teorema do Mapeamento afirma que, se uma função é multilinear em relação a um conjunto de parâmetros, e esses parâmetros pertencem a um conjunto politópico definido por seus vértices, então os valores da função em qualquer ponto dentro do politopo podem ser expressos como combinações convexas dos valores da função nos vértices do politopo (BHATTACHARYYA e KEEL 1995).

Formalmente, seja uma função $f(p)$ multilinear em relação a $p \in P$, onde P é um politopo descrito pelos vértices $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$. Então, para qualquer $p \in P$, $f(p)$ pode ser escrito como:

$$f(p) = \sum_{j=1}^n \lambda_j f(v_j), \quad \text{com} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad \lambda_j \geq 0, \quad (3.8)$$

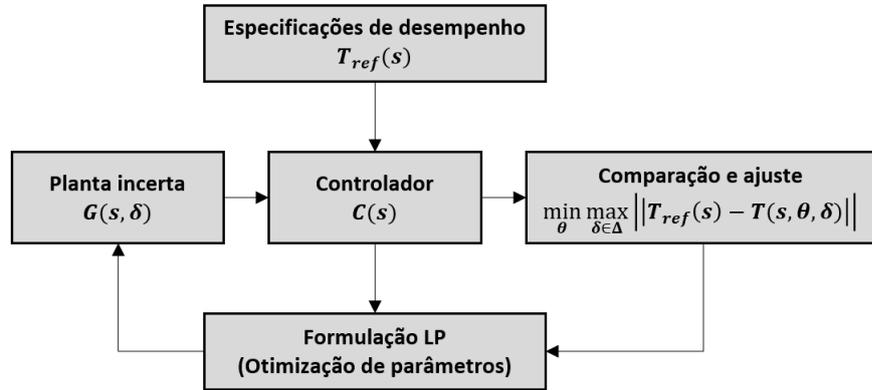
onde λ_j são os coeficientes convexas associados à decomposição de p nos vértices v_j .

3.2.3 Estabilização robusta com controladores de ordem fixa via programação linear

O problema de posicionamento robusto de polos utilizando um controlador de ordem fixa foi formulado, demonstrando que, para regiões de polos desejadas especificadas como um politopo convexo no espaço de coeficientes, uma condição necessária e suficiente pode ser expressa em termos de um problema de programação linear. Em (CHAPELLAT *et al.* 1994) e (BHATTACHARYYA e KEEL 1995), uma abordagem de programação linear também foi utilizada para derivar as condições necessárias para a estabilização em malha fechada com um controlador de ordem fixa. A dificuldade principal no projeto de controladores de ordem fixa é que, em geral, é impossível garantir que um polinômio característico desejado ou uma função de transferência de malha fechada alvo seja alcançável por um controlador de uma ordem fixa específica, quando a planta está na presença de uma família de incertezas paramétricas do tipo *hiper box*.

Além disso, também é abordada a correspondência de modelos de ordem fixa (*Fixed Order Model Matching* - FOMM) e problemas relacionados. Essa abordagem consiste, inicialmente, em trabalhar com uma função de transferência exata em malha fechada, a qual pode ser obtida por técnicas conhecidas, como alocação de polos ou projeto de controladores PID otimizados. O objetivo é que essa função represente as características desejadas do sistema controlado. A partir dessa função de transferência inicial, o próximo passo é expandir o alvo de um conjunto de pontos fixos (ou valores únicos) para um conjunto de intervalos, que podem ser representados geometricamente como uma caixa politópica. Esse processo de expansão relaxa as condições de factibilidade, tornando o problema mais flexível e aumentando a probabilidade de encontrar uma solução viável. Como resultado, cada caso é formulado como um problema de programação linear (LP), que pode ser resolvido de maneira eficiente com os métodos computacionais modernos disponíveis. A escolha exata dos intervalos usados nas especificações depende do desempenho desejado para o sistema em estudo (XILJAK 1989; CHAPELLAT *et al.* 1994). Uma exemplificação desse processo é exibida na Figura 3.3.

Figura 3.3: Diagrama de blocos de um sistema de estabilização robusta com controlador de ordem fixa usando LP



Fonte: Autoria própria.

O bloco de "Comparação e Ajuste" no contexto do FOMM pode ser representado por uma função de custo minimizada via programação linear. A formulação exata depende do critério adotado, mas em geral segue uma estrutura do tipo:

$$\min_{\theta} \max_{\delta \in \Delta} \|T_{\text{ref}}(s) - T(s, \theta, \delta)\| \quad (3.9)$$

onde:

- θ : parâmetros do controlador (ex: K_p , K_i , K_d em um PID);
- δ : parâmetros incertos da planta;
- $T_{\text{ref}}(s)$: função de transferência desejada em malha fechada;
- $T(s, \theta, \delta)$: função de transferência real em malha fechada (dependente de θ e δ);
- Δ : *hiperbox* de incertezas (intervalos definidos para δ).

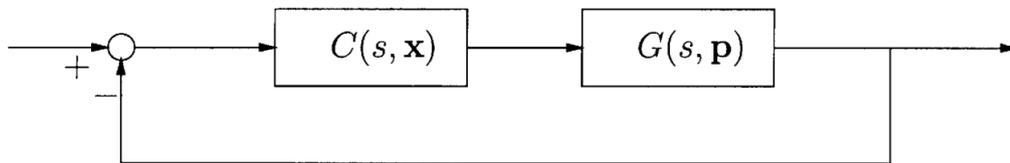
Adicionalmente, também é abordada a questão da robustez, estendendo o problema FOMM para o caso em que a planta é incerta. Assumindo uma estrutura de incerteza de intervalo linear ou multilinear para a planta, é demonstrado que a versão robusta do FOMM também admite uma formulação LP com suas vantagens, como produzir todo o conjunto de controladores que atingem as especificações de forma robusta, como um conjunto convexo. Essa é uma abordagem para o problema de desempenho robusto, onde um limite inferior no desempenho, medido, por exemplo, em termos da norma de uma função

de transferência em malha fechada, é garantido de forma robusta com um controlador de ordem fixa, utilizando alguns limites eficientes de espaço raiz e domínio de frequência da teoria robusta de controle paramétrico (XILJAK 1989; BHATTACHARYYA e KEEL 1995; BARTLETT *et al.* 1988; CHAPPELLAT *et al.* 1994).

3.3 Projeto de controlador via alocação de polos

Considere o sistema de controle retroalimentado mostrado abaixo na figura 3.4.

Figura 3.4: Um sistema de realimentação típico



Fonte: Autoria própria.

Seja $p := [p_1, p_2, \dots, p_s]$ o vetor de parâmetros reais que representa a planta e x o vetor de parâmetros reais que representa o controlador. Em geral, $p = p^0$ representa o valor nominal dos parâmetros da planta e utilizando a seguinte representação das incertezas nos parâmetros da planta deixando p em uma caixa P definida como:

$$P := p : p_i^- \leq p_i \leq p_i^+, i = 1, 2, \dots, s \quad (3.10)$$

Assumindo que o controlador em questão é de ordem fixa e nesse caso $x := [x_1, x_2, \dots, x_r]$ é um vetor de dimensão fixa.

A dinâmica do sistema retroalimentado na presença do controle, é representado por meio do polinômio característico, que pode ser caracterizado por um vetor $a = [a_1, \dots, a_l]$ de números reais que são funções dos parâmetros da planta e do controlador:

$$a_i = a_i(x, p), i = 1, 2, \dots, l \quad (3.11)$$

Para o problema de correspondência de modelos, a_i pode representar a lista ordenada

de coeficientes do denominador do polinômio característico do sistema na presença do controlador em malha fechada, como a função de sensibilidade ou a função de sensibilidade complementar. Por conveniência, nos referiremos ao vetor $a(x, p)$ como o vetor que representa a dinâmica do sistema em malha fechada.

Suponha que o polinômio desejado do sistema, possua a mesma ordem que o polinômio característico, e que possa ser representado pelo vetor de parâmetros desejados, conforme apresentado abaixo:

$$t := [t_1, t_2, t_3, \dots, t_l] \quad (3.12)$$

um ponto em R^l . Os componentes do vetor t representam a dinâmica desejada do sistema em malha fechada na presença do controlador projetado. Então, idealmente, o objetivo do projeto do sistema de controle ou do problema de síntese do controlador poderia ser declarado como o problema de calcular, se possível, o vetor de parâmetros do controlador x , tal que obedeça o seguinte sistema de equações algébricas lineares, conforme apresenta a relação 3.13

$$a_i(p^0, x) = t_i, i = 1, 2, \dots, l \quad (3.13)$$

É importante ressaltar que na Eq. 3.13 utiliza-se o parâmetro nominal p^0 para indicar que o sistema é calculado considerando o valor nominal dos parâmetros da planta. Em geral, a especificação de desempenho representada pelo sistema é calculada considerando o valor nominal dos parâmetros da planta e deve considerar a estabilidade do sistema em malha fechada.

3.4 Projeto de controlador via alocação polinomial intervalar de polos considerando incertezas paramétricas

Se a equação 3.13 puder ser satisfeita, o desempenho desejado será alcançado sob a condição ideal de incerteza zero na planta. Sob perturbações da planta, esse desempenho ideal se deteriorará e o problema de desempenho robusto, seja garantir que o vetor de projeto do controlador x seja calculado de modo que a degeneração da resposta dinâmica do sistema que pode ocorrer à medida que p ultrapassa o conjunto de incertezas, e ainda permaneça dentro dos limites desejados de desempenho dinâmico previamente projetados.

Mesmo quando não são consideradas incertezas na planta, alcançar a meta de desempenho representada pela Eq. 3.13 pode se tornar inviável devido a restrições impostas ao controlador, como sua estrutura e ordem dinâmica. Por exemplo, no problema de posicionamento de polos, o vetor t representa os coeficientes do polinômio característico de malha fechada, os quais são definidos com base nas raízes desejadas para o sistema. É sabido, no caso de sistemas SISO (Sistema com Entrada e Saída Únicas), que uma solução para a Eq. 3.13 existe apenas se a ordem do controlador for igual ou maior que $n - 1$, onde n é a ordem da planta.

Quando a ordem do controlador é limitada e menor que $n - 1$, a obtenção de uma solução viável pode ser extremamente difícil ou até impossível. Para superar essa limitação, especialmente em casos que consideram a presença de incertezas paramétricas, é necessário relaxar as condições de desempenho desejadas. Ao invés de buscar atender um conjunto fixo de especificações representado por um único ponto t , expande-se o alvo para um conjunto de intervalos, formando uma região politópica, conforme descrito pela Eq. 3.14:

$$T := \{t_i^- \leq a_i(p, x) \leq t_i^+, i = 1, 2, \dots, l\} \quad (3.14)$$

Aqui, os limites inferiores (t_i^-) e superiores (t_i^+) definem um intervalo para cada coeficiente $a_i(p, x)$, onde:

- t_i^- : Limite inferior do intervalo para o coeficiente a_i .

- t_i^+ : Limite superior do intervalo para o coeficiente a_i .
- p : Parâmetros do sistema (como polos, zeros ou ganhos).
- x : Parâmetros do controlador, que podem incluir ganhos proporcional, integral e derivativo, ou outros termos ajustáveis.

Ao relaxar o desempenho de um único ponto t para uma família de intervalos, representada pela Eq. 3.14, as condições de projeto tornam-se mais flexíveis. Isso é particularmente útil quando o sistema possui incertezas paramétricas, como variações na dinâmica ou nos valores de seus parâmetros. Essa abordagem permite ampliar o conjunto de soluções possíveis, facilitando a obtenção de controladores que atendam a essas especificações dentro de uma faixa de desempenho aceitável, ao invés de exigir o cumprimento rigoroso de condições pontuais.

Em resumo, o conjunto de igualdades na Eq. 3.13 é substituído por um conjunto de desigualdades mais flexíveis, conforme descrito por:

$$t_i^- \leq a_i(p, x) \leq t_i^+, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (3.15)$$

Essa reformulação proporciona maior liberdade no projeto do controlador, especialmente em sistemas incertos, tornando o problema mais acessível e aumentando a probabilidade de encontrar uma solução viável e robusta.

O problema de projeto robusto então é escolher x , se possível, de modo que o conjunto de desigualdades acima seja satisfeito para todo $p \in P$.

É claro que o tamanho da caixa alvo T teria que ser ajustado para garantir que o desempenho dinâmico desejado do sistema seja satisfatório, sempre que o vetor de desempenho real ou conjunto de vetores estivesse dentro da caixa alvo T . Deste modo, a estabilidade robusta do sistema são garantidos, desde que todas as raízes do sistema realimentado na presença do controlador projetado estejam contidas no conjunto T (CHAPELLAT *et al.* 1994).

Ademais, assume-se que o parâmetro p aparece de forma linear ou multilinear no vetor de desempenho de malha fechada $a(x, p)$, enquanto x aparece de forma linear ou afim. No Teorema 1 (CHAPELLAT *et al.* 1994), mostramos usando o Teorema de Mapeamento que, nestes casos, as versões nominal e robusta do problema de projeto do controlador se reduzem a problemas de programação linear, obtidos simplesmente

substituindo o parâmetro incerto p pelos seus valores de vértice nas desigualdades de projeto na Eq. 3.14. Seja $v_j, j = 1, 2, \dots, n$ os vértices da caixa de parâmetros P (BHATTACHARYYA e KEEL 1995).

3.4.1 Teorema 1

Enunciado: Seja $a_i(p, x)$ uma função multilinear em relação a p , onde $p \in P$ e P é um politopo definido pelos vértices $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ e $t = [t_1, t_2, \dots, t_l]$ é o vetor que contém os valores desejados para as propriedades de desempenho do sistema em malha fechada. Será demonstrado que:

$$t_i^- \leq a_i(p, x) \leq t_i^+, \quad \forall p \in P, \quad i = 1, 2, \dots, l, \quad (3.16)$$

se e somente se:

$$t_i^- \leq a_i(v_j, x) \leq t_i^+, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n, \quad i = 1, 2, \dots, l. \quad (3.17)$$

Parte 1: Necessidade (\implies)

Assume-se que:

$$t_i^- \leq a_i(p, x) \leq t_i^+, \quad \forall p \in P. \quad (3.18)$$

Pelo Teorema do Mapeamento, é sabido que $a_i(p, x)$ pode ser expresso como uma combinação convexa dos valores da função nos vértices do politopo:

$$a_i(p, x) = \sum_{j=1}^n \lambda_j a_i(v_j, x), \quad \text{com} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad \lambda_j \geq 0. \quad (3.19)$$

Substituimos $p = v_j$, que são os vértices de P . Para cada v_j , tem-se que:

$$t_i^- \leq a_i(v_j, x) \leq t_i^+, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.20)$$

Isso mostra que, se a desigualdade é válida para todos os $p \in P$, ela deve ser válida especificamente nos vértices v_j .

Parte 2: Suficiência (\Leftarrow)

Agora assume-se que:

$$t_i^- \leq a_i(v_j, x) \leq t_i^+, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.21)$$

Pelo Teorema do Mapeamento, sabe-se que $a_i(p, x)$ para qualquer $p \in P$ é uma combinação convexa dos valores nos vértices:

$$a_i(p, x) = \sum_{j=1}^n \lambda_j a_i(v_j, x), \quad \text{com} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad \lambda_j \geq 0. \quad (3.22)$$

Como os valores $a_i(v_j, x)$ satisfazem $t_i^- \leq a_i(v_j, x) \leq t_i^+$, e como $a_i(p, x)$ é uma combinação convexa desses valores, segue que:

$$t_i^- \leq a_i(p, x) \leq t_i^+, \quad \forall p \in P. \quad (3.23)$$

Foi demonstrado que:

$$t_i^- \leq a_i(p, x) \leq t_i^+, \quad \forall p \in P, \quad (3.24)$$

é equivalente a:

$$t_i^- \leq a_i(v_j, x) \leq t_i^+, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.25)$$

Essa equivalência é fundamentada no Teorema do Mapeamento, que garante que as propriedades de funções multilineares em relação a parâmetros em um politopo são determinadas completamente pelos valores nos vértices do politopo.

Assumindo que o vetor de desempenho $a(p, x)$ depende linearmente ou de forma afim do vetor de parâmetros x , o Teorema do Mapeamento demonstra que o problema de projeto robusto pode ser reduzido a um problema de *programação linear (LP)*. Essa simplificação ocorre porque, para funções lineares ou multilineares, é suficiente verificar as condições de desempenho apenas nos vértices do politopo de incertezas P .

Em algumas situações práticas, é necessário verificar se um conjunto de controladores, representado por uma "caixa" ou região politópica, atende às especificações de desempe-

nhos desejadas. Caso os parâmetros do controlador x apareçam de forma multilinear em $a(p, x)$, o problema é ainda mais simplificado. Segundo o Teorema 1, as condições de robustez descritas na Eq. 3.17 precisam ser verificadas apenas nos vértices do politopo correspondente ao controlador.

Essa abordagem reduz consideravelmente a complexidade do problema, pois, ao invés de analisar um número infinito de combinações dentro da região do controlador, verifica-se apenas um conjunto finito de condições nos vértices. Isso transforma o problema de projeto robusto em um problema computacionalmente tratável, permitindo o uso de técnicas eficientes de otimização.

Além disso, essa formulação fornece ao projetista um conjunto convexo de soluções, o que permite maior flexibilidade na escolha de um controlador que atenda às restrições práticas e às especificações do sistema. Esse método é particularmente relevante em sistemas com incertezas estruturadas ou paramétricas, nos quais a análise exaustiva de todas as combinações seria impraticável.

3.5 Formulação do Problema de Otimização para Projeto do Controlador

O projeto de um controlador robusto em sistemas sujeitos a incertezas é frequentemente tratado como um problema de otimização, no qual os parâmetros do controlador devem ser ajustados para garantir que o sistema atenda às especificações de desempenho, mesmo diante das variações paramétricas. Nesta seção, o problema é formulado como um problema de minimização, considerando uma função custo apropriada e um conjunto de restrições que garantem a robustez.

3.5.1 Definição do Problema

O objetivo do projeto é encontrar os parâmetros do controlador $x \in \mathbb{R}^m$ que minimizem uma função custo, enquanto garantem que as condições de robustez e desempenho sejam satisfeitas para todas as incertezas $p \in P$, onde P é um politopo que descreve a região de

incertezas do sistema. A formulação geral do problema pode ser escrita como:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^m} J(x) \quad (3.26)$$

$$\text{sujeito a: } t_i^- \leq a_i(p, x) \leq t_i^+, \quad \forall p \in P, i = 1, 2, \dots, l, \quad (3.27)$$

onde:

- $J(x)$: Função custo, que mede o desempenho do controlador x . Por exemplo, $J(x)$ pode ser a norma H_2 ou H_∞ , o erro de rastreamento, ou qualquer outra métrica de desempenho do sistema;
- t_i^- e t_i^+ : Limites inferiores e superiores das especificações de desempenho desejadas;
- $a_i(p, x)$: Função de desempenho que depende do vetor de parâmetros do controlador x e dos parâmetros incertos p ;
- P : Politopo de incertezas, definido pelos seus vértices $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$.

3.5.2 Função Custo

A escolha da função custo $J(x)$ depende dos objetivos do projeto. Algumas opções comuns incluem:

- **Norma H_2** : Minimizar a energia total do sistema em resposta a uma entrada perturbadora.
- **Norma H_∞** : Minimizar o ganho máximo entre a entrada e a saída, garantindo robustez frente a perturbações.
- **Erro Quadrático Médio (MSE)**: Minimizar o erro entre o sinal de saída do sistema e a referência desejada.

No contexto de controladores robustos, $J(x)$ pode ser projetada para penalizar grandes variações nos ganhos do controlador ou grandes desvios nos coeficientes de desempenho.

3.5.3 Conjunto de Restrições

As restrições garantem que o sistema em malha fechada atenda às especificações de desempenho para todos os valores $p \in P$. Segundo o **Teorema 1** e o **Teorema do**

Mapeamento, é suficiente verificar essas condições apenas nos vértices do politopo P , ou seja:

$$t_i^- \leq a_i(v_j, x) \leq t_i^+, \quad \forall v_j \in \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, i = 1, 2, \dots, l. \quad (3.28)$$

Essa reformulação reduz o problema contínuo para um conjunto finito de verificações, tornando-o computacionalmente tratável.

3.5.4 Problema de Minimização

Com a definição da função custo e das restrições, o problema de otimização final pode ser reescrito como:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^m} J(x) \quad (3.29)$$

$$\text{sujeito a: } t_i^- \leq a_i(v_j, x) \leq t_i^+, \quad \forall v_j \in \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, i = 1, 2, \dots, l. \quad (3.30)$$

Esse problema é um problema de **programação convexa** se $J(x)$ e $a_i(v_j, x)$ forem funções convexas. Caso contrário, métodos específicos de otimização não convexa podem ser necessários.

3.6 Conclusão

Neste capítulo, foram discutidas as principais técnicas de controle robusto, focando na estabilização do sistema em malha fechada e na formulação de problemas em termos de programação linear. Inicialmente, abordou-se o problema de estabilização em malha fechada, seguido pela análise do problema de correspondência de modelo de ordem fixa, no qual as soluções foram direcionadas para atender às especificações de desempenho e robustez. Por fim, explorou-se a técnica de ampliação alvo, que possibilita uma maior flexibilidade no ajuste dos parâmetros do controlador, garantindo um comportamento estável mesmo em condições adversas. Essas ferramentas teóricas e metodológicas estabelecem as bases para a aplicação prática dos conceitos. No próximo capítulo, será apresentada a metodologia, detalhando os passos experimentais e computacionais adotados para validar as estratégias de controle robusto e analisar o desempenho do sistema modelado.

Capítulo 4

METODOLOGIA

4.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados os aspectos fundamentais relacionados à configuração da microrrede estudada, incluindo a justificativa técnica para a topologia adotada, bem como as escolhas das fontes de geração e cargas. A seleção da topologia e dos componentes da microrrede foi baseada em critérios técnicos relacionados às demandas da aplicação, alinhados com as particularidades operacionais e geográficas da região amazônica, no contexto da eletromobilidade de embarcações.

Em seguida, será realizada a modelagem da planta, incluindo os equacionamentos utilizados para representar matematicamente o comportamento dos diferentes componentes do sistema. Esta modelagem é crucial para o desenvolvimento de estratégias de controle e para a análise de desempenho da microrrede sob diversas condições operacionais.

Com a estrutura e a modelagem da microrrede definidas, o trabalho prosseguirá com a apresentação do método utilizado para o desenvolvimento e a implementação do controlador de ordem fixa. Esta metodologia envolverá a formulação de problemas de otimização e aplicação de técnicas de programação linear, garantindo que o controlador projetado atenda aos requisitos de desempenho mesmo sob condições de incerteza nos parâmetros da planta.

Por fim, serão descritos os testes e validações realizados em ambientes de simulação, que têm como objetivo avaliar o desempenho do sistema e verificar a aderência do controlador projetado às especificações definidas.

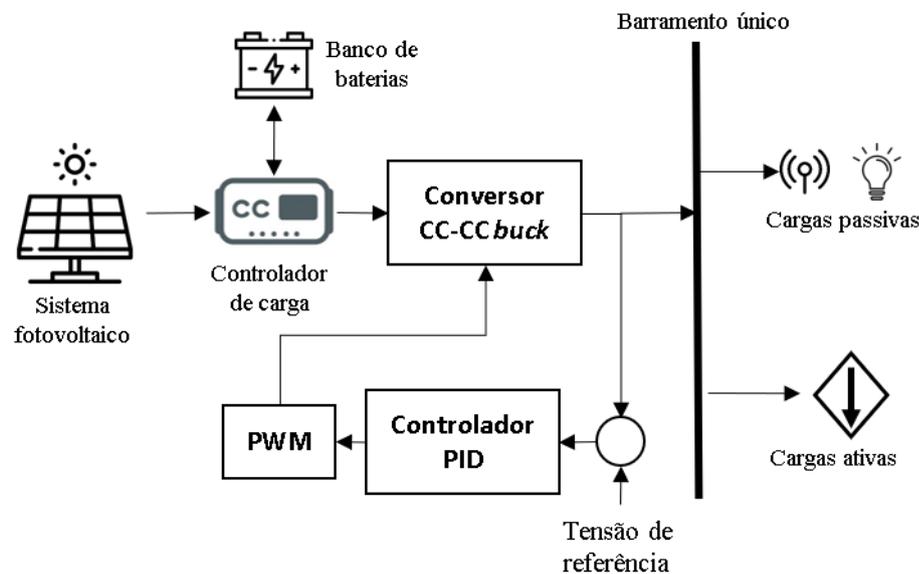
4.2 Apresentação da topologia da microrrede selecionada

Dentre as diversas topologias de microrredes existentes apresentadas no Capítulo 2, optou-se pela topologia **radial de barramento único** para esta aplicação. Essa escolha foi motivada pelos seguintes fatores:

- **Simplicidade na implementação e operação:** A topologia radial é utilizada em sistemas que requerem simplicidade estrutural e facilidade de implementação. Ela é caracterizada por possuir um único barramento central, que conecta as fontes de geração, dispositivos de armazenamento e cargas, vide 4.1. Essa estrutura reduz a complexidade do projeto e facilita o controle e a manutenção da microrrede.
- **Adequação às demandas de baixa tensão:** No contexto da microrrede estudada, o barramento opera em baixa tensão, alinhado com as características típicas de sistemas de embarcações elétricas. A baixa tensão do barramento elimina a necessidade de conversões adicionais de energia, aumentando a eficiência do sistema.
- **Referências de *benchmarks* e aplicações reais:** A escolha da topologia radial também se baseou em estudos e *benchmarks* encontrados na literatura técnica, como em Bhargavi et al. (2021), onde essa configuração é recomendada para sistemas de microrredes de baixa tensão que priorizam simplicidade e custo reduzido.

A figura 4.1 apresenta o modelo simplificado da microrrede utilizada para aplicação neste estudo.

Figura 4.1: Topologia da microrrede utilizada para o desenvolvimento do estudo



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, a estrutura da microrrede em estudo conecta uma fonte de alimentação, que passa por um conversor CC-CC e o nível de tensão da saída flui para um barramento, no qual podem ser conectadas cargas diversas. Para este trabalho, as cargas representam o funcionamento do motor de uma embarcação elétrica.

4.2.1 Justificativa para escolha da fonte de geração

A microrrede em estudo utiliza como fonte de geração primária a **energia solar fotovoltaica**, a qual deve alimentar um banco de baterias que deve fornecer energia para as cargas. Essa escolha é justificada pelos seguintes fatores:

- **Relevância para comunidades isoladas:** Em muitos locais da Amazônia, não há acesso ao fornecimento de energia elétrica pelo Sistema Interligado Nacional (SIN). Diante dessa realidade, a energia solar fotovoltaica surge como uma solução viável e essencial para atender às demandas energéticas dessas comunidades.
- **Sustentabilidade e Redução de Impactos Ambientais:** A utilização de energia solar elimina a dependência de combustíveis fósseis, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade da eletromobilidade na Amazônia.
- **Capacidades Modulares:** Os módulos fotovoltaicos podem ser escalonados de

acordo com as demandas de energia, oferecendo flexibilidade ao sistema e viabilidade econômica em microrredes de baixa potência.

Além disso, o conversor CC-CC tipo *buck* foi selecionado como o principal dispositivo de conversão de energia na microrrede devido à sua adequação técnica para aplicações de redução de tensão, simplicidade estrutural e alta eficiência. Esse tipo de conversor é amplamente utilizado em sistemas de corrente contínua, especialmente em configurações de microrredes que demandam controle preciso da tensão em barramentos de baixa tensão. A seguir, são apresentadas as principais justificativas para essa escolha:

- **Redução de tensão com alta eficiência:** O conversor de potência *buck* é projetado para reduzir a tensão de entrada para um nível de saída inferior, com alta eficiência energética. No contexto da microrrede estudada, essa característica é essencial para ajustar a tensão de saída dos painéis solares fotovoltaicos ou das baterias ao nível de operação das cargas conectadas ao barramento.
- **Estabilidade e controle simples:** O modelo matemático do conversor de potência *buck* permite o controle preciso da tensão de saída por meio de técnicas de modulação por largura de pulso (PWM). Essa simplicidade no controle é vantajosa para aplicações em microrredes, onde é necessário garantir a estabilidade do barramento mesmo diante de variações na carga ou na tensão de entrada.
- **Adaptação ao barramento de corrente contínua:** Em sistemas baseados em barramentos CC, como o adotado neste trabalho, o conversor de potência *buck* apresenta uma integração direta e eficiente, sem a necessidade de circuitos adicionais para ajuste de tensão, o que reduz custos e aumenta a confiabilidade do sistema.
- **Relevância para o contexto de cargas em embarcações elétricas:** No contexto da eletromobilidade de embarcações na Amazônia, as cargas conectadas ao barramento incluem motores CC e dispositivos auxiliares, que requerem tensão estabilizada para operar eficientemente. O conversor de potência *buck* atende a essas necessidades de forma eficaz, ajustando a tensão de saída ao nível necessário para a propulsão elétrica e outros equipamentos.
- **Simplicidade e custo-efetividade:** Por sua construção relativamente simples, o conversor de potência *buck* apresenta um custo reduzido em comparação com outras

topologias de conversores CC-CC. Essa característica é particularmente relevante em aplicações onde a relação custo-benefício é um fator crítico, como em comunidades isoladas que dependem de soluções acessíveis e robustas.

Portanto, a escolha do conversor CC-CC tipo Buck justifica-se pela combinação de eficiência, simplicidade, e capacidade de atender às demandas específicas do sistema estudado, contribuindo para a estabilidade e o desempenho geral da microrrede.

4.2.2 Escolha e caracterização das cargas

As cargas utilizadas na microrrede foram definidas com base no comportamento operacional de embarcações elétricas típicas na região amazônica. Dois tipos de cargas principais foram considerados:

- **Cargas Resistivas Passivas:** Utilizadas para simular dispositivos de baixa complexidade, como sistemas auxiliares ou iluminação nas embarcações. Essas cargas fornecem uma base para a avaliação da estabilidade do barramento CC.
- **Cargas Ativas:** A escolha de motores CC como carga ativa foi motivada pela necessidade de simular a operação real de motores de propulsão em embarcações. Esses motores são modelados como fontes de corrente controladas, cuja demanda varia conforme as condições de operação (correnteza, arrasto, aceleração).

As cargas presentes na microrrede serão analisadas em termos de suas características e requisitos de energia. A compreensão das demandas energéticas do motor é fundamental para a modelagem precisa e a gestão eficiente da microrrede, assegurando que o sistema possa operar de maneira estável sob diferentes condições de carga e geração de energia.

A metodologia do trabalho envolverá a formulação de problemas de otimização e a aplicação de técnicas de programação, garantindo que o controlador projetado atenda aos requisitos de desempenho mesmo sob condições de incerteza nos parâmetros da planta.

4.3 Projeto de controle considerando ação de carga passiva

A função de transferência que representa o modelo linearizado do conversor de potência do tipo *buck* foi descrita no Capítulo 2 e é dada por:

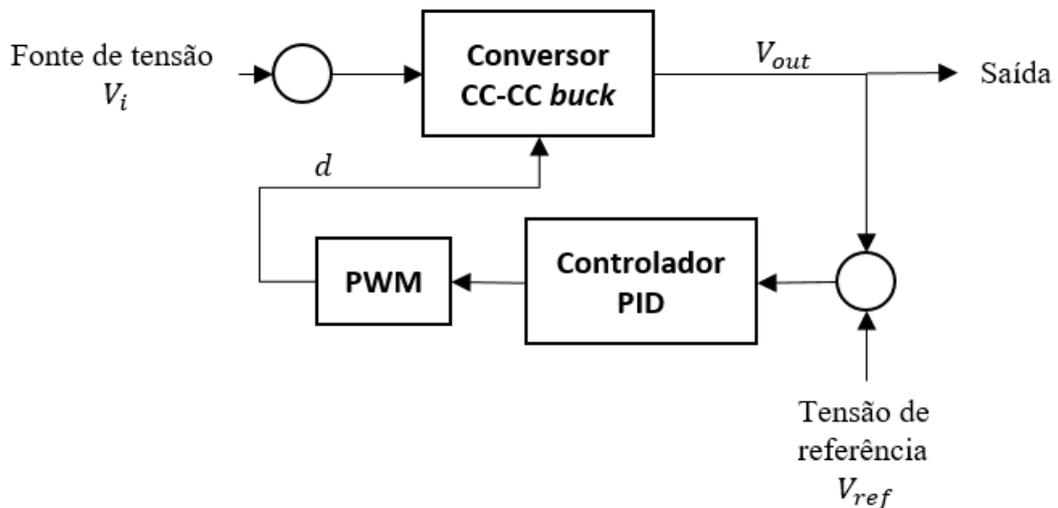
$$G(s) = \frac{\frac{V_i}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (4.1)$$

Nesse trabalho, a tensão de entrada do conversor V_i e a carga de saída R tendem a variar entre valores fixados $[V_i^-; V_i^+]$ e $[R^-; R^+]$, como uma incerteza paramétrica. O controlador proposto é do tipo proporcional-integral-derivativo (PID), da forma:

$$C(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (4.2)$$

Onde, K_d , K_p e K_i são os coeficientes derivativo, proporcional e integrativo do controlador PID, respectivamente. Dessa forma, o sistema deve ser tal como exibido na Figura 4.2

Figura 4.2: Diagrama de blocos do controle da tensão de saída do conversor de potência *buck*



Fonte: Autoria própria.

Os requisitos desejados para o projeto do controlador são definidos pelos critérios de desempenho em malha fechada, incluindo o tempo de assentamento (t_{ss}) e o sobressinal (ovs , do inglês *overshoot*). Esses critérios fornecem os limites inferiores (t_i^-) e superiores (t_i^+) para as especificações de desempenho do sistema. A partir desses requisitos, calcula-se o coeficiente de amortecimento (ζ) e a frequência natural (ω_n), que são expressos como:

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{ovs}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{ovs}{100}\right)}}, \quad (4.3)$$

$$\omega_n = \frac{4,6}{t_{ss}\zeta}. \quad (4.4)$$

Os valores mínimos e máximos para essas grandezas são apresentados na Tabela 4.1, indicando os intervalos definidos para o projeto.

Tabela 4.1: Critérios intervalares para o desempenho da planta

Intervalos	t_{ss} (s)	ovs (%)
Mínimo	0,05	10
Máximo	0,1	20

Para atender às especificações de desempenho, o polinômio desejado em malha fechada ($T(s)$) é definido como:

$$T(s) = (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(s + q_0), \quad (4.5)$$

$$T(s) = s^3 + s^2(2\zeta\omega_n + q_0) + s(2\zeta\omega_n q_0 + \omega_n^2) + \omega_n^2 q_0. \quad (4.6)$$

Os coeficientes do polinômio característico são definidos como:

$$t_1 = 2\zeta\omega_n + q_0, \quad (4.7)$$

$$t_2 = 2\zeta\omega_n q_0 + \omega_n^2, \quad (4.8)$$

$$t_3 = \omega_n^2 q_0. \quad (4.9)$$

O polo auxiliar q_0 é escolhido como um múltiplo de $\zeta\omega_n$, definido como $q_0 = 5\zeta\omega_n$.

Substituindo, obtém-se:

$$t_1 = 7\zeta\omega_n, \quad (4.10)$$

$$t_2 = 10\zeta^2\omega_n^2 + \omega_n^2, \quad (4.11)$$

$$t_3 = 5\zeta\omega_n^3. \quad (4.12)$$

Dessa forma, o polinômio característico desejado ($T(s)$) é:

$$T(s) = s^3 + t_1s^2 + t_2s + t_3. \quad (4.13)$$

Para considerar a robustez do sistema, assume-se que os coeficientes do polinômio característico podem variar dentro de intervalos definidos. Introduzindo tal lance intervalar, caracterizado pelo polinômio de incertezas $\Delta(t)$ dado por:

$$\Delta(t) := [\delta_1, \delta_2, \delta_3] \quad (4.14)$$

Em que δ_i , $i = 1, 2, 3$ representam as variações entorno dos coeficientes do polinômio característico. Dessa forma, o polinômio característico intervalar desejado é dado por:

$$T(s, \delta) = s^3 + [t_1 - \delta_1, t_1 + \delta_1]s^2 + [t_2 - \delta_2, t_2 + \delta_2]s + [t_3 - \delta_3, t_3 + \delta_3] \quad (4.15)$$

Ou, simplesmente,

$$T(s, \delta) = s^3 + [t_1^-, t_1^+]s^2 + [t_2^-, t_2^+]s + [t_3^-, t_3^+]. \quad (4.16)$$

O modelo do conversor de potência *buck* pode ser descrito pela seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{p_0}{s^2 + p_1s + p_2}, \quad (4.17)$$

onde:

$$p_0 = \frac{V_i}{LC}, \quad p_1 = \frac{1}{RC}, \quad p_2 = \frac{1}{LC}. \quad (4.18)$$

A função de transferência em malha fechada, considerando o controlador $C(s)$, definido pela equação 4.2, é:

$$FT_{MF}(s) = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)}. \quad (4.19)$$

Substituindo-se 4.18 e 4.2 em 4.19, tem-se:

$$FT_{MF}(s) = \frac{p_0(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{s^3 + s^2(p_1 + p_0 K_d) + s(p_2 + p_0 K_p) + p_0 K_i} \quad (4.20)$$

Dessa forma, o polinômio característico em malha fechada da planta é dado por:

$$P_{MF}(s) = s^3 + s^2(p_1 + p_0 K_d) + s(p_2 + p_0 K_p) + p_0 K_i \quad (4.21)$$

Para que o sistema atenda aos requisitos, é necessário que:

$$P_{MF}(s) = T(s, \delta) \quad (4.22)$$

Portanto, o problema de estabilização é tomado como uma alocação de polos. Contudo, a fim de verificar a capacidade do modelo de otimização da resposta, serão comparados os dois modelos: alocação de polos clássica, e alocação de polos robusta, considerando as variações paramétricas.

4.3.1 Formulação do problema de otimização robusta

O problema de otimização é formulado para determinar os valores ótimos de K_d , K_p e K_i que minimizem a função custo quadrática:

$$f(X) = K_d^2 + K_p^2 + K_i^2, \quad (4.23)$$

onde $X = [K_d, K_p, K_i]^T$ é o vetor de parâmetros do controlador PID. A solução do problema é obtida resolvendo:

$$X^* = \arg \min f(X), \quad (4.24)$$

sujeito às restrições impostas pelo polinômio intervalar do sistema:

$$t_1^- \leq p_1 + p_0 K_d \leq t_1^+, \quad (4.25)$$

$$t_2^- \leq p_2 + p_0 K_p \leq t_2^+, \quad (4.26)$$

$$t_3^- \leq p_0 K_i \leq t_3^+. \quad (4.27)$$

Em forma matricial, o problema de otimização pode ser descrito como:

$$\begin{bmatrix} t_1^- - p_1 \\ t_2^- - p_2 \\ t_3^- \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} p_0 & 0 & 0 \\ 0 & p_0 & 0 \\ 0 & 0 & p_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_d \\ K_p \\ K_i \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} t_1^+ - p_1 \\ t_2^+ - p_2 \\ t_3^+ \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

Para solucionar o seguinte problema:

$$\text{Minimizar: } f(X) = K_d^2 + K_p^2 + K_i^2, \quad (4.29)$$

$$\text{Sujeito a: } B_L \leq AX \leq B_H, \quad (4.30)$$

onde:

- A é a matriz que relaciona os parâmetros K_d , K_p e K_i às restrições do sistema;
- B_L e B_H representam os limites inferiores e superiores das restrições, definidos a partir das condições de robustez do polinômio característico.

Esta formulação garante que os parâmetros do controlador PID sejam otimizados para minimizar a função $f(X)$, resultando em um controle eficiente que atende aos requisitos de desempenho e robustez do sistema.

Introduzindo variações na tensão de entrada V_i , por conseguinte, no parâmetro p_0 , tem-se:

$$p_0^- \leq p_0 \leq p_0^+, \quad (4.31)$$

Portanto, as desigualdades intervalares matriciais definidas em 4.30 ficam da forma:

$$\begin{bmatrix} t_1^- - p_1^- \\ t_1^- - p_1^- \\ t_2^- - p_2^- \\ t_2^- - p_2^- \\ t_3^- \\ t_3^- \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} p_0^- & 0 & 0 \\ p_0^+ & 0 & 0 \\ 0 & p_0^- & 0 \\ 0 & p_0^+ & 0 \\ 0 & 0 & p_0^- \\ 0 & 0 & p_0^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_d \\ K_p \\ K_i \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} t_1^+ - p_1^+ \\ t_1^+ - p_1^+ \\ t_2^+ - p_2^+ \\ t_2^+ - p_2^+ \\ t_3^+ \\ t_3^+ \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Note que apesar de o sistema possuir três variáveis, a matriz intervalar pode ser desmembrada para uma matriz com seis linhas, cada par de linha correspondendo a um intervalo máximo-mínimo a ser satisfeito para a realização do sistema, conforme apresentado na seguinte relação. Observa-se que o projeto deve ser escrito como um problema de otimização linear, de modo que seja um problema de minimização, onde a função custo é a soma linear dos ganhos do controlador, para maiores detalhes vide (MEDEIROS *et al.* 2018).

4.4 Projeto de controle considerando ação de carga ativa

Nesta seção, será modelado o sistema MIMO composto pelo conversor de potência *buck* com uma fonte de corrente controlada conectada em paralelo com a carga passiva. Essa abordagem introduz uma característica ativa na carga, permitindo que a fonte de corrente controlada adicione uma perturbação dinâmica ao sistema, representando de forma equivalente o comportamento de um motor CC com demanda variável. A justificativa para a utilização da fonte de corrente controlada está na sua capacidade de reproduzir, de forma simplificada e ajustável, o comportamento dinâmico de um motor CC operando em diferentes condições. Primeiramente, será descrita a modelagem técnica da fonte de corrente controlada, seguida pela modelagem completa do sistema em espaço de estados.

4.4.1 Fonte de corrente controlada: modelagem e aplicação

A fonte de corrente controlada é um componente utilizado para injetar uma corrente ajustável $I_{\text{fonte}}(t)$ no sistema, representando cargas dinâmicas que demandam corrente variável ao longo do tempo. No contexto do sistema em estudo, a fonte é projetada para simular a operação dinâmica de um motor CC, que, por sua vez, varia sua demanda de corrente em função de parâmetros como torque, velocidade angular e carga.

Embora o modelo de um motor CC com excitação independente tenha sido apresentado anteriormente, sua substituição por uma fonte de corrente controlada é justificada pelas seguintes razões técnicas:

- **Equivalência de comportamento:** A corrente de armadura de um motor CC (I_a) é diretamente proporcional ao torque produzido pelo motor e depende da carga aplicada. De forma semelhante, uma fonte de corrente controlada ajusta sua saída de corrente em função de um sinal de controle, simulando o comportamento dinâmico do motor sob diferentes condições de operação.
- **Simplificação de modelagem e controle:** Enquanto o modelo completo de um motor CC envolve equações acopladas que relacionam tensão, corrente e dinâmica mecânica (como a velocidade angular e o torque), a fonte de corrente controlada oferece uma representação simplificada que mantém a essência da demanda variável de corrente, facilitando a análise e o projeto do sistema.
- **Flexibilidade para simulação:** A fonte de corrente controlada permite ajustar diretamente os parâmetros de ganho e controle, o que é vantajoso para testar diferentes condições operacionais do sistema, como mudanças abruptas na carga ou variabilidade da resistência mecânica (ex.: correnteza e arrasto em embarcações).

Portanto, a utilização de uma fonte de corrente controlada não apenas simplifica a modelagem e análise do sistema, mas também mantém uma equivalência funcional com o comportamento de um motor CC em termos de demanda de corrente.

A fonte de corrente controlada é caracterizada pela injeção de uma corrente $I_{\text{fonte}}(t)$ no sistema, proporcional a um sinal de controle $u(t)$. O modelo básico é dado por:

$$I_{\text{fonte}}(t) = K \cdot u(t), \quad (4.33)$$

onde:

- $I_{\text{fonte}}(t)$ é a corrente injetada pela fonte controlada;
- K é o ganho proporcional que ajusta a relação entre o sinal de controle $u(t)$ e a corrente de saída da fonte;
- $u(t)$ é o sinal de controle que simula as condições de operação de um motor CC, como variações de torque e velocidade.

Ao ajustar o sinal $u(t)$, é possível representar diferentes perfis de demanda dinâmica de corrente. Por exemplo, um aumento em $u(t)$ pode simular uma maior demanda de torque, como durante a aceleração de uma embarcação. Por outro lado, uma redução em $u(t)$ pode simular condições de menor esforço mecânico, como durante uma descida ou movimento em águas calmas.

No contexto das embarcações elétricas na Amazônia, a fonte de corrente controlada desempenha um papel crucial ao representar a demanda dinâmica do motor principal de propulsão. Essa demanda varia significativamente devido a fatores externos, como:

- **Correnteza:** A resistência da água pode aumentar ou diminuir dependendo da direção e intensidade da correnteza, alterando a demanda de torque e, consequentemente, de corrente.
- **Arrasto:** Mudanças na geometria ou na velocidade da embarcação afetam diretamente o arrasto hidrodinâmico, impactando a carga do motor.
- **Variações de Velocidade:** Durante manobras, acelerações ou desacelerações, a corrente consumida pelo motor varia em resposta às mudanças de torque.

Neste estudo, utilizamos o conversor de potência *buck* com os mesmos parâmetros e requisitos definidos anteriormente, incluindo a adição de uma fonte de corrente controlada conectada em paralelo à carga resistiva. Essa abordagem permite simular o comportamento de um motor CC operando de forma dinâmica, introduzindo uma característica ativa à carga, essencial para avaliar a robustez do controlador em situações práticas. O sistema é modelado em espaço de estados, considerando as variáveis de estado, entradas e saídas, conforme descrito a seguir.

O comportamento dinâmico do conversor de potência *buck* pode ser descrito pelas equações diferenciais fundamentais que governam os componentes elétricos. A corrente no indutor L e a tensão no capacitor C são escolhidas como variáveis de estado, representadas por $x_1(t) = i_L(t)$ e $x_2(t) = V_{\text{out}}(t)$, respectivamente.

A dinâmica do sistema é definida pelas seguintes equações:

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{\text{in}}d(t) - V_{\text{out}}(t), \quad (4.34)$$

Em que V_{in} é a tensão de entrada e $d(t)$ é o ciclo de trabalho (*duty cycle*), controlado pelo sistema. Além disso, a equação sobre o capacitor é regida pela seguinte relação:

$$C \frac{dV_{\text{out}}(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{V_{\text{out}}(t)}{R} - I_{\text{fonte}}(t), \quad (4.35)$$

Em que $I_{\text{fonte}}(t)$ é a corrente injetada pela fonte de corrente controlada, que representa a carga ativa equivalente ao motor CC.

Essas equações são reescritas em forma de espaço de estados, onde o vetor de estados é definido como:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_{\text{out}}(t) \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

A equação de estado completa do sistema é:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{\text{in}}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} I_{\text{fonte}}(t). \quad (4.37)$$

Neste formato, o sistema é descrito por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1d(t) + \mathbf{B}_2I_{\text{fonte}}(t), \quad (4.38)$$

onde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{V_{\text{in}}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix}. \quad (4.39)$$

A equação de saída, que corresponde à tensão no capacitor ($V_{\text{out}}(t)$), é definida como:

$$y(t) = C\mathbf{x}(t), \quad (4.40)$$

onde:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.41)$$

Esse modelo em espaço de estados representa a interação entre o conversor *buck* e a fonte de corrente controlada. A entrada $d(t)$ é o ciclo de trabalho, ajustado pelo controlador, enquanto $I_{\text{fonte}}(t)$ é a corrente dinâmica que simula a operação de um motor CC. Essa abordagem permite avaliar o desempenho do controlador robusto em condições dinâmicas, garantindo que o sistema permaneça estável e atenda aos critérios de desempenho definidos.

4.4.2 Formulação do problema de otimização robusta

Com o modelo dinâmico do sistema representado em espaço de estados, que inclui a interação entre o conversor *buck* e a fonte de corrente controlada, é possível formular o problema de otimização para o projeto do controlador robusto. O objetivo principal é determinar os ganhos K_p , K_i , e K_d de um controlador PID que atendam aos critérios de desempenho estabelecidos, garantindo estabilidade e robustez frente às incertezas introduzidas pela carga ativa.

O sistema em análise é representado em espaço de estados, incluindo a fonte de corrente controlada como uma entrada ativa. O modelo dinâmico completo é descrito por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B_1d(t) + B_2I_{\text{fonte}}(t), \quad (4.42)$$

$$y(t) = C\mathbf{x}(t), \quad (4.43)$$

onde:

- $\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) & V_{\text{out}}(t) & x_3(t) \end{bmatrix}^T$ é o vetor de estados, com $x_3(t)$ representando a integral do erro;
- $d(t)$ é a entrada controlada pelo controlador PID;

- $I_{\text{fonte}}(t)$ é a entrada ativa associada à fonte de corrente controlada;
- A , B_1 , B_2 e C são as matrizes que descrevem o comportamento do sistema, dadas por:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} \frac{V_{\text{in}}}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.44)$$

O controlador PID ajusta o ciclo de trabalho $d(t)$ como:

$$d(t) = -K_p e(t) - K_i \int e(t) dt - K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.45)$$

onde $e(t) = V_{\text{ref}}(t) - V_{\text{out}}(t)$ é o erro entre a referência e a saída.

Em malha fechada, o sistema dinâmico é descrito por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (A + B_1 K) \mathbf{x}(t) + B_2 I_{\text{fonte}}(t), \quad (4.46)$$

onde $K = \begin{bmatrix} K_p & K_i & K_d \end{bmatrix}$ é o vetor de ganhos do controlador.

O problema de otimização consiste em determinar os ganhos K_p , K_i , e K_d que garantam que os polos da matriz dinâmica em malha fechada $(A + B_1 K)$ estejam dentro de uma região desejada do plano complexo, definida pelos critérios de desempenho.

A formulação do problema é:

$$\text{Minimizar: } f(K) = K_p^2 + K_i^2 + K_d^2, \quad (4.47)$$

$$\text{Sujeito a: } A'_{\text{MF}} P + P A_{\text{MF}} \preceq -\epsilon I, \quad P \succ \epsilon I, \quad (4.48)$$

onde:

- $A_{\text{MF}} = A + B_1 K$ é a matriz dinâmica em malha fechada;
- P é uma matriz de Lyapunov para garantir estabilidade;
- $\epsilon > 0$ é um valor pequeno para evitar degeneração numérica.

4.5 Cálculo dos parâmetros dos controladores para diferentes condições

A realização dos resultados se deu inicialmente com a síntese dos parâmetros para os controladores PID em duas condições: alocação de polos robusta e clássica. Os cálculos foram implementados através de *scripts* desenvolvidos no ambiente de simulação *MATLAB*. Além disso, com o intuito de se realizarem as otimizações dos parâmetros K_d , K_p e K_i dos controladores, foi realizada a programação linear com auxílio da ferramenta de simulação *YIALMIP*, que é uma "caixa de ferramentas" usada para modelar e resolver problemas de otimização que ocorrem tipicamente em sistemas e teoria de controle.

Para o desenvolvimento do estudo utilizou-se os seguintes dados para o conversor *buck* resumidos na tabela 4.2:

Tabela 4.2: Dados definidos para o conversor *buck*

Dados	Mín	Nominal	Máx
Tensão de entrada (V)	11	12	13
Indutância (mH)	-	1	-
Capacitância (μF)	-	2200	-
Resistência da carga (Ω)	3	4,5	6

4.5.1 Controlador por alocação de polos robusta

Substituindo-se os valores nominais definidos para o conversor CC-CC *buck* e os requisitos de projetos (tabela 4.1), na equação 4.32, as matrizes de desigualdades intervalares são dadas por:

$$\begin{bmatrix} 170,49 \\ 170,49 \\ 1,97 \cdot 10^5 \\ 1,97 \cdot 10^5 \\ 1,45 \cdot 10^8 \\ 1,45 \cdot 10^8 \end{bmatrix} \leq (10^6) \times \begin{bmatrix} 5,0000 & 0 & 0 \\ 5,9091 & 0 & 0 \\ 0 & 5,0000 & 0 \\ 0 & 5,9091 & 0 \\ 0 & 0 & 5,0000 \\ 0 & 0 & 5,9091 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_d \\ K_p \\ K_i \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 568,24 \\ 568,24 \\ 13,16 \cdot 10^5 \\ 13,16 \cdot 10^5 \\ 7,7562 \cdot 10^8 \\ 7,7562 \cdot 10^8 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Dessa forma, através da otimização implementada, uma resposta factível apresentada para os valores ótimos dos ganhos do controlador PID robusto é:

$$K_p = 0,0394, \quad K_d = 6,7267 \times 10^{-5}, \quad K_i = 28,9973 \quad (4.50)$$

4.5.2 Controlador por alocação de polos clássica

Os ganhos do controlador PID implementado por alocação de polos clássica foi realizado através da solução de um modelo que atendessem aos requisitos da planta definidos na tabela 4.1. O modelo de adequação dos polos é tal qual apresentado na equação 4.22. Dessa forma, os ganhos do controlador PID é:

$$K_p = 0,0532, \quad K_d = 1,2424 \times 10^{-5} \times 10^5, \quad K_i = 7,142 \quad (4.51)$$

4.5.3 Controlador PID para ação de carga ativa

Os cálculos são realizados no *MATLAB* com o auxílio do pacote *YALMIP* e do solver *MOSEK*, sendo o problema de otimização formulado como um problema de programação semidefinida (*semidefinite programming, SDP*).

Dessa forma, os ganhos do controlador PID é:

$$K_p = -0,081, \quad K_d = 1,02 \times 10^{-5}, \quad K_i = 0,195 \quad (4.52)$$

4.6 Procedimentos de Testes

Os testes realizados têm como objetivo avaliar o desempenho do conversor CC-CC *buck* na regulação da tensão do barramento de saída, considerando cenários práticos enfrentados por embarcações elétricas. Foram definidos quatro tipos de testes principais: variação da carga passiva, variação da carga ativa, variação da tensão de entrada e variação do *setpoint*. O sistema será avaliado quanto à sua capacidade de manter a estabilidade, precisão e robustez nas condições descritas, com parâmetros iniciais e variações detalhadas

para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

4.7 Conclusão

Neste capítulo, foi detalhada a metodologia utilizada para o desenvolvimento e validação do sistema proposto. Inicialmente, apresentou-se o processo de desenvolvimento da microrrede, com foco no controle da tensão do barramento de saída do conversor de potência *buck*. Em seguida, foi discutido o projeto de controle robusto aplicado à regulação da tensão de saída, estendendo a análise para cenários envolvendo cargas ativas. A modelagem da fonte de corrente controlada foi abordada, incluindo sua aplicação prática e a incorporação no sistema, descrito em sua forma completa no espaço de estados. Por fim, detalhou-se o projeto do controlador PID para o conversor de potência *buck* e os procedimentos de testes definidos para avaliar o desempenho do sistema.

Com essa fundamentação, estabelece-se um alicerce sólido para a análise dos resultados parciais, que serão apresentados no próximo capítulo, destacando o desempenho do sistema modelado e controlado nas condições propostas.

Capítulo 5

RESULTADOS

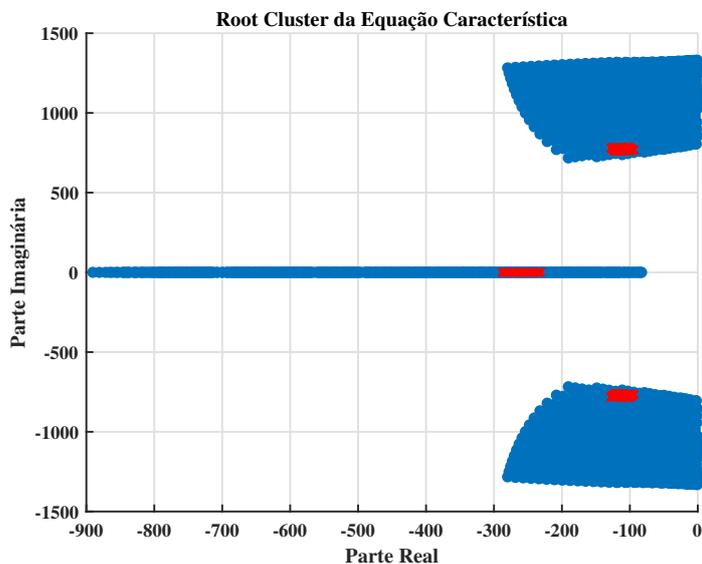
Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos para o desempenho dos controladores aplicados ao conversor *buck*, considerando diferentes cenários operacionais: variações de *setpoint* de tensão, variações de tensão de entrada, inserção de cargas passivas e ativas. Serão analisados qualitativamente os comportamentos do sistema e discutidos os principais aspectos observados em cada teste, verificando-se se os objetivos foram alcançados.

Inicialmente, serão analisados os desempenhos dos modelos de controladores implementados por alocação de polos robusta, tanto para o caso de carga passiva, quanto ativa. Em seguida, serão avaliados os resultados dos testes: variação do *setpoint*, variação da tensão de entrada, inserção de carga passiva e variação de carga ativa.

5.1 Desempenho dos controladores por alocação de polos robusta

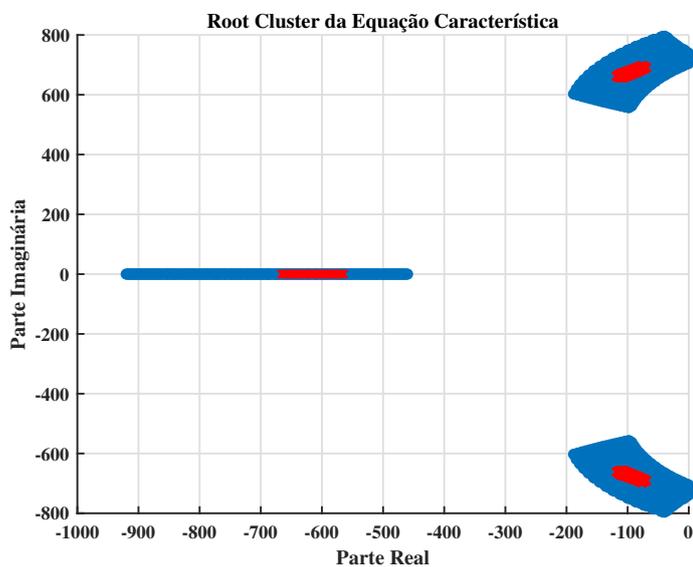
O desempenho do modelo robusto foi avaliado por meio da análise do lugar das raízes da equação característica, inicialmente foi analisado o desempenho do modelo de alocação de polos robusta para o sistema com carga passiva, exibido na Figura 5.1, em seguida, foi verificado o desempenho para carga ativa, exibido na Figura 5.2.

Figura 5.1: Lugar das raízes da equação característica do modelo desenvolvido para a carga passiva.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.2: Lugar das raízes da equação característica do modelo desenvolvido para a carga ativa.



Fonte: Autoria própria.

Como é possível observar, as raízes do sistema determinado (em vermelho) encontram-se dentro do conjunto de raízes (em azul) que satisfazem os critérios de desempenho. Isso indica que o controlador robusto foi eficaz na alocação dos polos, garantindo a estabilidade e a robustez do sistema diante de incertezas. Tal comportamento é consistente com o

esperado no projeto.

5.2 Resultados para variação de *setpoint* de tensão da saída do conversor *buck*

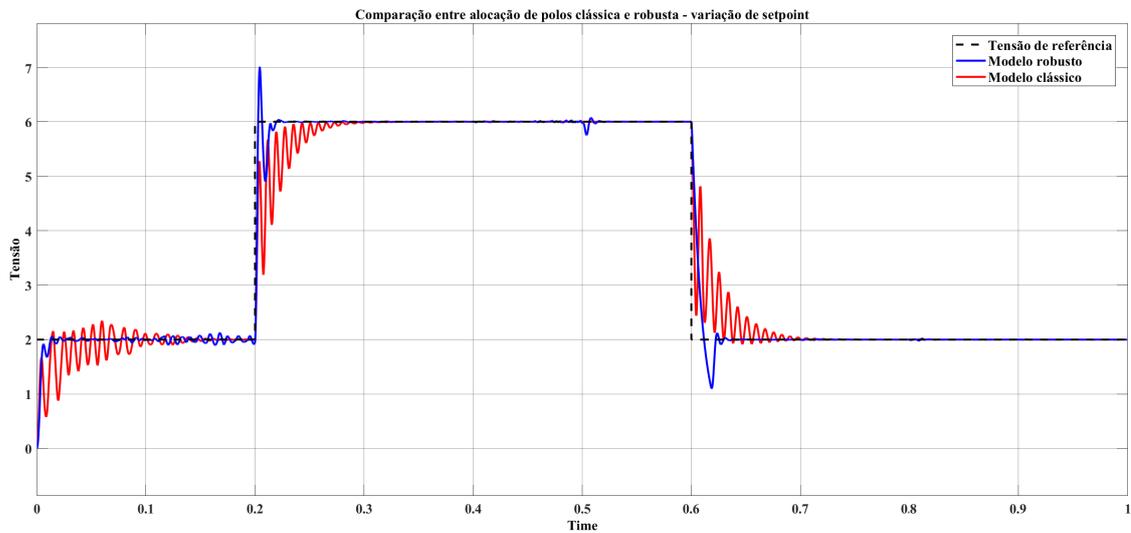
A variação do *setpoint* é um teste crítico para avaliar a eficácia do controlador da microrrede em cenários reais de operação, onde ajustes dinâmicos na potência ou velocidade são frequentemente necessários. Em embarcações elétricas, por exemplo, mudanças na demanda de energia ocorrem quando o veículo precisa acelerar para evitar obstáculos, reduzir a velocidade em áreas sensíveis ou alternar entre modos de operação econômica e alta performance. Essas transições exigem que o controlador responda de forma rápida e estável, garantindo que a tensão do barramento e a corrente nas cargas ativas permaneçam dentro dos limites seguros, sem oscilações excessivas ou erros permanentes.

O procedimento será realizado conforme descrito:

- O sistema será configurado com uma tensão de entrada de valor 12 V.
- O *setpoint* definido para o barramento da tensão de saída é 2 V de 0 a 0,2 s, após esse momento o *setpoint* é alterado para 6 V até 0,6 s quando vai a 2 V novamente e segue até o final da janela de simulação.

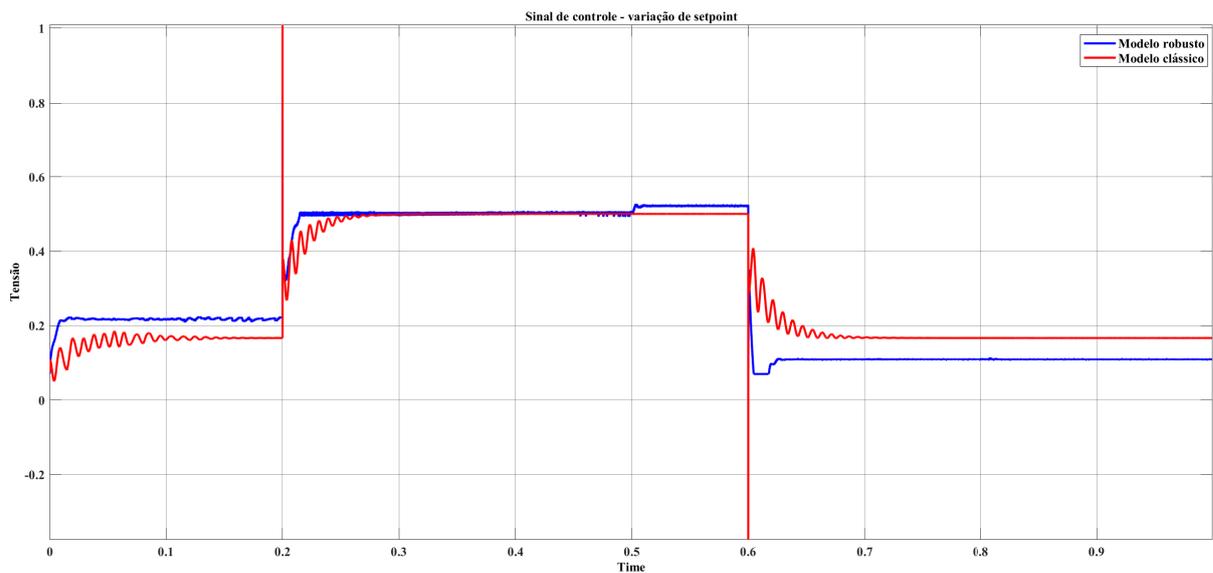
O teste valida se o controlador mantém a estabilidade mesmo durante transições bruscas, assegurando que a microrrede opere de forma confiável e eficiente em todas as condições.

A Figura 5.3 apresenta os resultados dessas variações, enquanto a Figura 5.4 mostra o comportamento dos sinais de controle.

Figura 5.3: Resultados para a variação no *setpoint*.

Fonte: Autoria própria.

Figura 5.4: Comparação entre os sinais de controle.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados demonstram que o sistema respondeu adequadamente às variações no *setpoint*, com tempo de resposta e sobressinal dentro dos limites definidos em projeto. O controlador robusto apresentou maior suavidade no sinal de controle, evidenciando melhor desempenho em comparação ao modelo clássico. Isso confirma que os critérios de estabilidade e desempenho foram atendidos.

É possível perceber ainda que o sobressinal da resposta robusta foi maior no segundo aumento de *setpoint*, isso se deve, entre outras coisas, ao acúmulo de energia, pois durante

a operação inicial, os elementos do sistema (como o indutor e o capacitor) estão em um estado de menor armazenamento de energia. Quando ocorre o primeiro aumento de *setpoint*, o sistema começa a se estabilizar em torno do novo ponto de operação. No segundo aumento, a energia já acumulada nos componentes pode contribuir para uma resposta mais rápida e intensa, aumentando a probabilidade de *overshoot*.

Além disso, o sinal de controle do controlador desenvolvido por alocação de polos robusta é mais eficiente do que o realizado pela alocação de polos clássica, demonstrando um esforço de controle inferior.

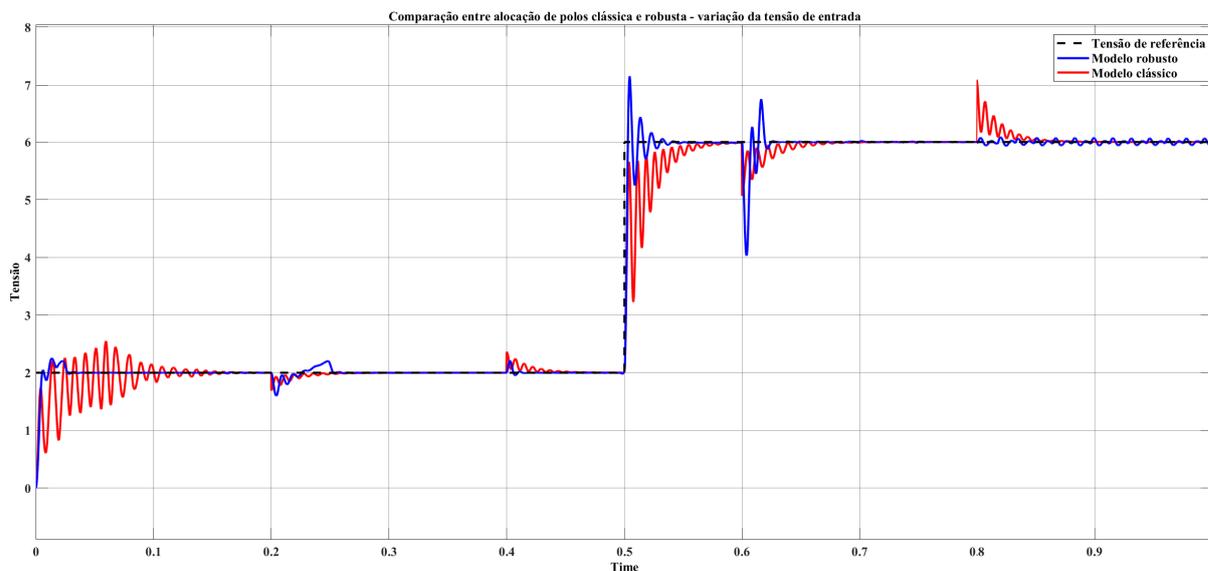
5.3 Resultados para variação da tensão de entrada do conversor *buck*

Para simular condições práticas de operação de embarcações elétricas alimentadas por fontes solares, este teste avalia o desempenho do sistema sob flutuações na tensão de entrada do conversor, representando mudanças no índice de irradiância solar ou variações no nível da bateria.

O procedimento será realizado conforme descrito:

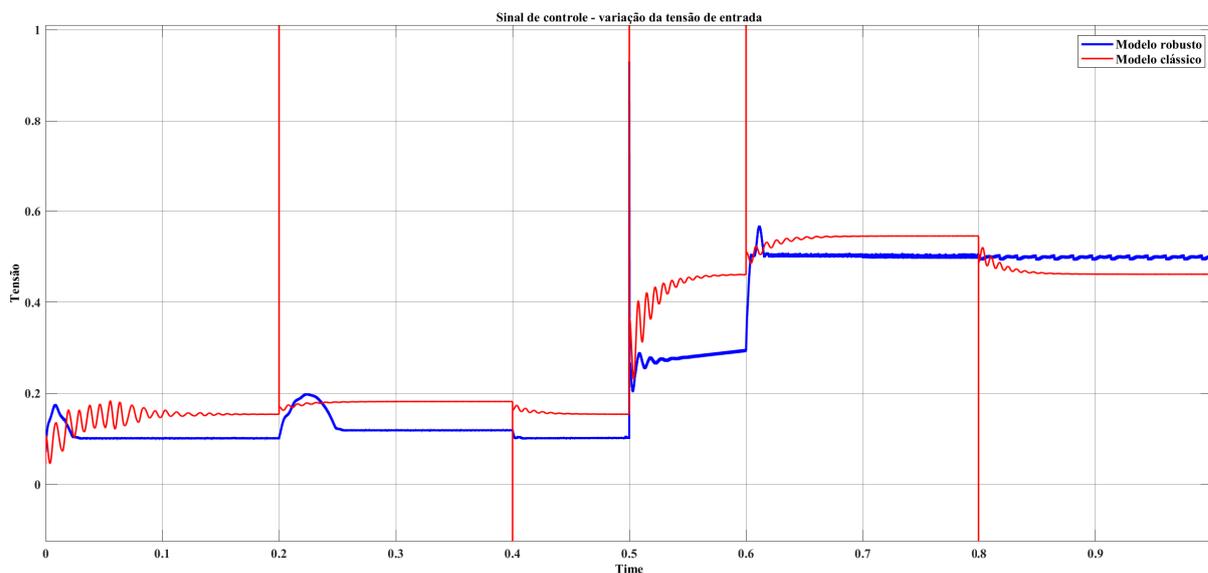
- O sistema será configurado inicialmente com uma tensão de entrada de valor 13 V, após a estabilização do sistema, decorridos 0,2 segundos, a tensão de entrada será reduzida para 11 V.
- O *setpoint* definido para o barramento da tensão de saída é 2 V de 0 a 0,2 s, após esse momento o *setpoint* é alterado para 6 V até 0,6 s quando vai a 2 V novamente e segue até o final da janela de simulação.

Nos testes que simulam flutuações na tensão de entrada, o desempenho do sistema foi avaliado conforme os resultados das Figuras 5.5 e 5.6.

Figura 5.5: Resultado para a variação na tensão de entrada do conversor *buck*.

Fonte: Autoria própria.

Figura 5.6: Compara o entre os sinais de controle.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostram que o sistema foi capaz de manter a tensão de saída estável, mesmo diante de varia es significativas na tensão de entrada. O comportamento transitório foi controlado de forma satisfatória, apesar da maior oscila o no segundo aumento de *setpoint*, devido ao acúmulo de energia. A resposta do controlador robusto foi superior em termos de estabilidade e suavidade.

Não obstante,   possível perceber que o esforço de controle no caso do projeto robusto

também é inferior, demonstrando uma maior eficiência para este projeto.

Esse resultado demonstra que, mesmo diante de oscilações nas fontes de alimentação do sistema, o barramento permanece com um nível de tensão satisfatório.

5.4 Resultados para inserção de carga passiva

Este teste avalia o comportamento do sistema frente a alterações no valor da resistência na microrrede, representando a ligação ou desligamento de componentes como sistemas de iluminação ou dispositivos eletrônicos a bordo. A variação da resistência provoca uma mudança na demanda de corrente, exigindo uma adaptação do conversor *buck* para estabilizar a tensão de saída.

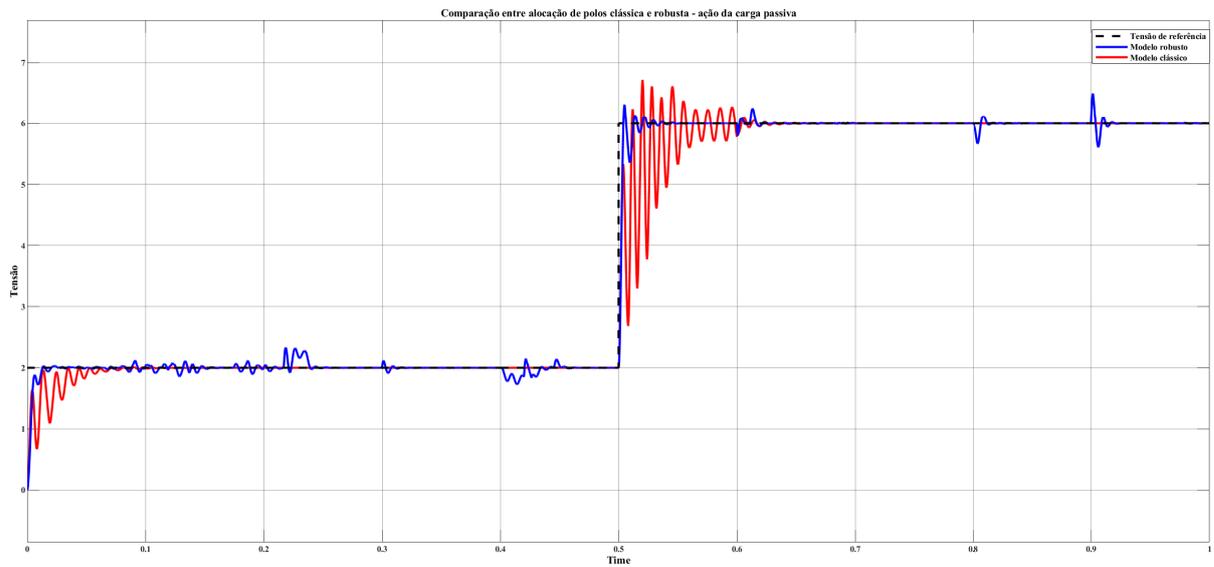
O teste será conduzido conforme o seguinte procedimento:

- O sistema será configurado com V_i fixo em 12 V e a carga inicialmente em 3 Ω , após a estabilização do sistema, decorridos 0,3 segundos, o valor da resistência é alterado para 6 Ω , representando um aumento de carga. O sistema segue nesse ciclo a cada 0,3 segundos durante o intervalo de 1 segundo de teste.
- O *setpoint* definido para o barramento da tensão de saída é 2 V de 0 a 0,5 s, após esse momento o *setpoint* é alterado para 4 V.

Este teste avalia o tempo de resposta, o comportamento transitório e a capacidade de estabilização do conversor para condições variáveis de carga passiva.

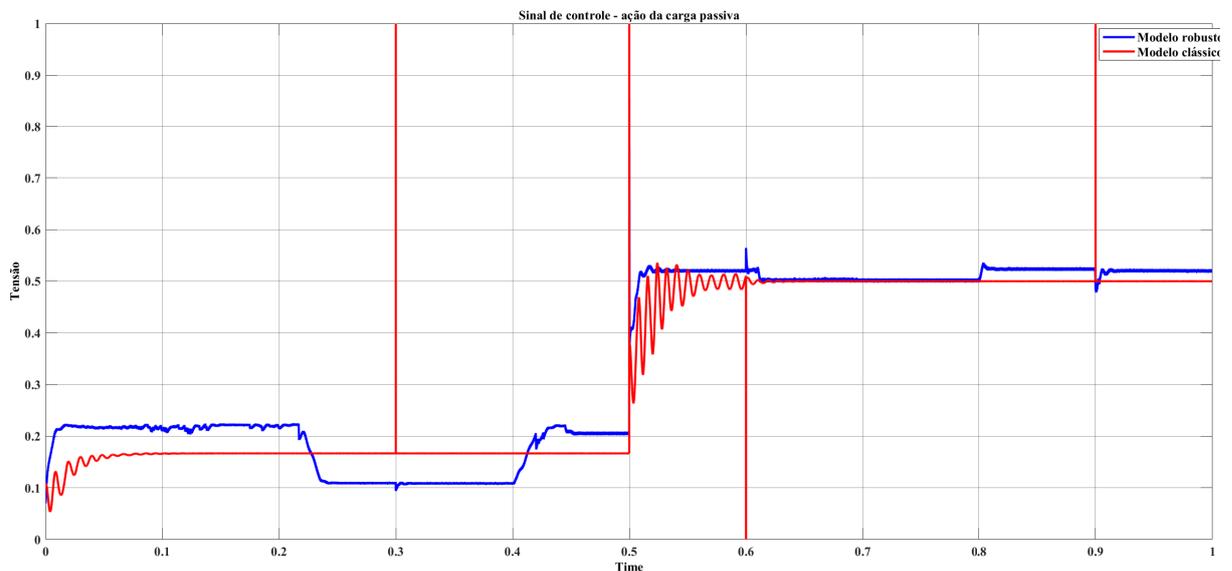
As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os resultados obtidos.

Figura 5.7: Desempenho dos controladores para inserção de carga passiva.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.8: Sinal de controle.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados confirmam que o sistema foi capaz de se adaptar às variações de carga sem comprometer a estabilidade. O controlador robusto apresentou melhor desempenho, com menor variação no sinal de controle e tempo de resposta mais curto.

Dessa forma, mesmo diante de variações em cargas passivas presentes na embarcação (como iluminações, sinalizações etc.), o desempenho do controlador robusto é superior ao implementado do modo clássico. Também, como demonstrado no sinal de controle de

ambos controladores.

5.5 Resultados para inserção de carga ativa

Este teste considera o impacto de cargas ativas, como motores de corrente contínua (CC), cuja demanda de potência varia conforme as condições operacionais. A fonte de corrente controlada é ajustada para emular diferentes níveis de carga mecânica, representando fatores como mudanças de fluido, aumento de arrasto ou travamento parcial das pás do motor.

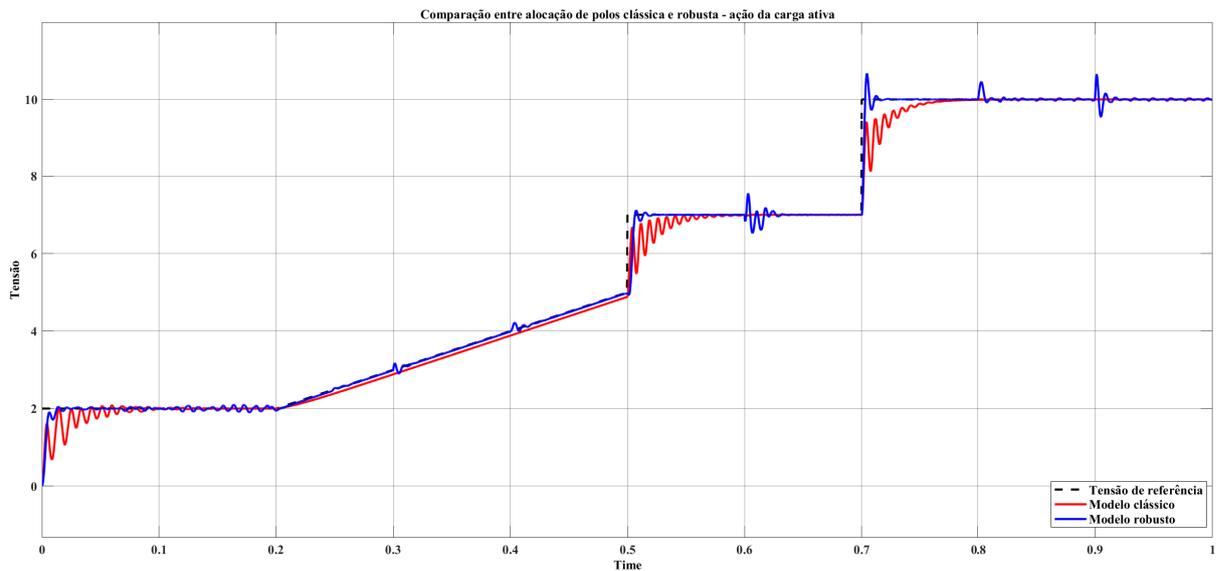
O procedimento é detalhado como segue:

- O sistema será configurado inicialmente para uma carga ativa com uma corrente de valor inicial associado a um torque mecânico nominal.
- Após 0,3 segundos de estabilização, o valor da corrente será alterado com um acréscimo de 2 A no sistema, simulando um aumento da demanda de potência do motor, em seguida a corrente adicional é retirada aos 0,6 segundos.
- O *setpoint* definido para o barramento da tensão de saída é 2 V de 0 a 0,2 s, após esse momento o *setpoint* cresce em rampa até atingir 5 v aos 0,5 s, quando é alterado para 7 V, aos 0,7 s o valor é alterado para 10 V e persiste até o final da janela de simulação (1 s).

Este teste avalia a capacidade do conversor de manter a tensão de saída estável em condições de carga ativa variáveis, garantindo a operação confiável do motor.

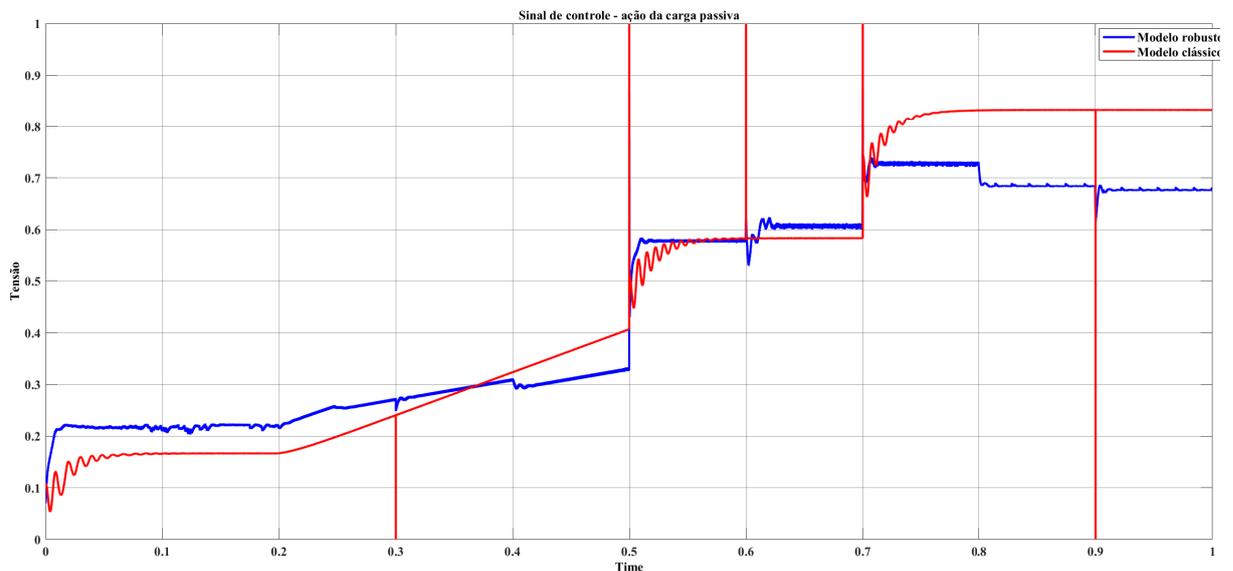
Os resultados estão apresentados nas Figuras 5.9 e 5.10.

Figura 5.9: Desempenho dos controladores para inserção de carga ativa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.10: Sinal de controle.



Fonte: Autoria própria.

O sistema atendeu satisfatoriamente aos critérios de projeto, apresentando estabilidade e capacidade de manter a tensão de saída, mesmo com as variações impostas pela carga ativa. O controlador robusto novamente demonstrou desempenho superior ao modelo clássico, garantindo maior estabilidade e suavidade no controle.

Entende-se, portanto, que mesmo sob ação de cargas ativas, tal como o motor propulsor da embarcação, os modelos mantiveram o resultado dentro dos requisitos esperados.

Contudo, o modelo robusto demonstrou maior eficiência, assim como na Figura 5.10, que afere um menor esforço de controle.

5.6 Análise dos Resultados

A fim de avaliar o resultado dos controladores nas três situações simuladas foram avaliadas algumas métricas de desempenho, inicialmente foi verificada a Integral do Erro ao Quadrado (*ISE - integral of the square of the error*), que é dado por:

$$ISE = \int (error(t))^2 dt \quad (5.1)$$

Os resultados analíticos estão sintetizados na tabela 5.1 a seguir.

Tabela 5.1: Integral do erro quadrático

Metodologia	Setpoint	Tensão de entrada	Carga Passiva	Carga Ativa
Robusta	0,11	0,02	0,02	0,04
Clássica	0,22	0,04	0,05	0,12

Em seguida, foi verificada a Integral do Erro Absoluto ponderado pelo tempo (*ITAE - integral of time-weighted absolute error*), que é dado por:

$$ITAE = \int t(error(t))dt \quad (5.2)$$

Os resultados estão sintetizados na tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2: Integral do erro absoluto ponderado pelo tempo (10^3)

Metodologia	Setpoint	Tensão de entrada	Carga Passiva	Carga Ativa
Robusta	4,00	1,31	1,55	2,94
Clássica	6,98	3,2	3,61	9,03

Estas métricas permitem avaliar:

- A estabilidade do conversor diante de variações nas condições de carga e entrada.
- O tempo de resposta do sistema em situações de transição e a precisão do controle na estabilização da tensão de saída.

A partir das métricas quantitativas, é possível verificar que o modelo desenvolvido através da alocação de polos robusta se mostrou superior em todos os casos testados, em relação ao modelo clássico.

5.7 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados e analisados os resultados parciais obtidos no controle da tensão de saída do conversor *buck*, considerando diferentes cenários de operação. Inicialmente, avaliou-se o desempenho dos controladores em situações de variação de *set-point*, de tensão de entrada e na inserção de cargas passivas, demonstrando a capacidade do sistema em manter a estabilidade e a precisão desejadas. Além disso, foram analisados os efeitos da inserção de uma carga ativa, modelada como uma fonte de corrente controlada, evidenciando o impacto dessa dinâmica no comportamento do sistema.

Por fim, as métricas utilizadas na avaliação permitiram uma análise quantitativa do desempenho dos controladores, destacando as vantagens do controle robusto em relação a estratégias convencionais.

Com esses resultados, o próximo capítulo será dedicado às conclusões e discussões finais, consolidando as contribuições do trabalho e apontando caminhos para estudos futuros.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

As simulações realizadas para o sistema de microrrede isolada, com um conversor buck operando em quatro modos distintos: variação de setpoint de tensão de saída, variação de tensão de entrada, inserção/retirada de carga passiva e variação de carga ativa demonstraram a eficiência do controle robusto aplicado ao sistema. A análise dos resultados do ISE, uma das métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos controladores, revela uma resposta satisfatória em termos de estabilidade e minimização de erros, especialmente sob condições de variação de carga, onde o sistema apresentou um comportamento robusto e adaptativo. Além disso, a métrica ITAE, que tende a penalizar erros persistentes que aparecem mais tarde no tempo de resposta, exibiu uma boa capacidade de estabilização do modelo robusto.

O desempenho superior do sistema nas condições de inserção e retirada de carga passiva sugere que o controle robusto é eficaz em mitigar os impactos de variações abruptas de carga. Não obstante, o modelo obteve um resultado satisfatório para a simulação da ação com um motor acoplado no barramento de saída (representado por uma carga ativa), uma característica essencial para a confiabilidade operacional em microrredes isoladas, como as encontradas em embarcações elétricas. Essa resiliência é crítica para manter a estabilidade da tensão de saída, garantindo a continuidade da operação dos sistemas embarcados, mesmo diante de mudanças repentinas na demanda de potência.

No entanto, a variação da tensão de entrada apresentou desafios que resultaram em uma maior acumulação de erro, indicando que o controle robusto pode necessitar de ajustes adicionais para melhorar a compensação de flutuações na fonte de alimentação. Isso é particularmente relevante em sistemas alimentados por energia solar, onde as variações

de irradiância e outras condições ambientais podem causar perturbações significativas.

Esses resultados destacam a importância do desenvolvimento contínuo de estratégias de controle avançadas. Estudos futuros devem focar na modelagem precisa do motor CC, que é fundamental para a propulsão da embarcação. Uma modelagem detalhada permitirá um ajuste fino do controle robusto, considerando as dinâmicas inerentes do motor e suas interações com o conversor buck. Adicionalmente, a integração de técnicas como controle preditivo baseado em modelos (MPC) ou algoritmos de aprendizado de máquina poderia oferecer melhorias significativas no desempenho do sistema, permitindo uma operação mais eficiente e adaptativa da microrrede, especialmente em cenários de operação off-grid com fontes renováveis intermitentes.

Este trabalho estabelece uma base sólida para o controle de microrredes isoladas em embarcações elétricas, apontando para a necessidade de avanços contínuos na modelagem e controle para alcançar uma operação ainda mais eficiente e robusta em condições reais.

Referências Bibliográficas

ABBASI, A. R.; BALEANU, D. Recent developments of energy management strategies in microgrids: An updated and comprehensive review and classification. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 297, p. 117723, 2023.

ABDOLRASOL, M.; KER, P. J.; HANNAN, M.; AYOB, A.; TIONG, S. Energy management in integrated microgrids: An optimal schedule controller utilizing gradient descent algorithm. In: IEEE. **2023 IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids (ETFG)**. [S.l.], 2023. p. 1–6.

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. ed. [S.l.]: São Paulo: Prentice Hall, 2000.

AL-GHAILI, A. M.; KASIM, H.; AL-HADA, N. M.; JØRGENSEN, B. N.; OTHMAN, M.; WANG, J. Energy management systems and strategies in buildings sector: A scoping review. **Ieee Access**, IEEE, v. 9, p. 63790–63813, 2021.

ALI, A.; MARTIN, O.; ABDEL-RADY, M.; A. Energy management in multi-microgrid systems — development and assessment. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 7, n. 32(2):1-1, 2016.

ALI, M.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M.; GUAN, Y.; BAZMOHAMMADI, N. Microgrid an energy solution for remote islanded communities in indonesia. In: **2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia)**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 3799–3804.

ALLWYN, y. A comprehensive review on energy management strategy of microgrids. **Energy Reports**, Elsevier, v. 9, p. 5565–5591, 2023.

AMER, A.; BAYHAN, S.; EHSANI, M.; MASSOUD, A. Development of residential load simulator for advanced residential energy management. In: IEEE. **2024 4th International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)**. [S.l.], 2024. p. 1–6.

BALOG, R. S.; KREIN, P. T. Bus selection in multibus dc microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 26, n. 3, p. 860–867, 2010.

BARTLETT, A. C.; HOLLOT, C. V.; LIN, H.; A. Root locations of an entire polytope of polynomials: It suffices to check the edges. **Mathematics of Control, Signals and Systems**, Springer, v. 1, n. 1, p. 61–71, 1988.

BHARGAVI, K.; JAYALAKSHMI, N.; GAONKAR, D.; SHRIVASTAVA, A.; JADOUN, V. K. A comprehensive review on control techniques for power management of isolated dc microgrid system operation. **IEEE access**, IEEE, v. 9, p. 32196–32228, 2021.

- BHATTACHARYYA, S. P.; KEEL, L. H. Robust control: the parametric approach. In: **Advances in control education 1994**. [S.l.]: Elsevier, 1995. p. 49–52.
- BRANDAO, D. I.; POMILIO, J. A.; MARAFÃO, F. P.; ALONSO, A. M. Validação experimental de uma microrrede com controle centralizado e despachável. **Eletrônica de Potência**, v. 23, n. 3, p. 281–291, 2018.
- CHAN, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 90, n. 2, p. 247–275, 2002.
- CHAPELLAT, H.; KEEL, L. H.; BHATTACHARYYA, S. P.; A. Extremal robustness properties of multilinear interval systems. **Automatica**, Elsevier, v. 30, n. 6, p. 1037–1042, 1994.
- CHEN, W.; ZHANG, P. Energy management strategy of energy local network based on energy storage virtual queue. In: IEEE. **2020 International Conference on Computer Science and Management Technology (ICCSMT)**. [S.l.], 2020. p. 249–253.
- CHI, L.; ZHAO, Z.; XIA, C.; CHANG, X. A case study of developing an intelligent management system for energy internet. In: IEEE. **2020 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)**. [S.l.], 2020. p. 69–73.
- CLAIRAND, J.-M.; SERRANO-GUERRERO, X.; GONZÁLEZ-ZUMBA, A.; ESCRIVÁ-ESCRIVÁ, G. Techno-economic assessment of renewable energy-based microgrids in the amazon remote communities in ecuador. **Energy Technology**, Wiley Online Library, v. 10, n. 2, p. 2100746, 2022.
- COELHO, R. F.; SCHMITZ, L.; MACEDO, L. T.; MARTINS, D. C. Estratégia para controle do fluxo de potência em uma microrrede híbrida destinada a alimentação de cargas cc críticas. **Eletrônica de Potência**, v. 20, n. 2, p. 205–214, 2015.
- CONRADO, B. R.; SILVA, S. M.; BRANDAO, D. I.; SOUZA, W. A.; MOREIRA, A. C.; PAREDES, H. K. Classificação de cargas em microrredes utilizando a análise relacional grey e fatores de desempenho da carga. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020.
- CRUZ, J. D. L.; WU, Y.; CANDELO-BECERRA, J. E.; VÁSQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Review of networked microgrid protection: Architectures, challenges, solutions, and future trends. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 10, n. 2, p. 448–467, 2024.
- DAVID, R. **A dinâmica do transporte fluvial de passageiros no Estado do Amazonas**. [S.l.]: Dissertação (Mestrado em Geografia). Manaus: UFAM, 2010.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of power electronics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.
- FERAHTIA, S.; HOUARI, A.; CIOARA, T.; BOUZNIT, M.; REZK, H.; DJERIOUI, A. Recent advances on energy management and control of direct current microgrid for smart cities and industry: A survey. **Applied Energy**, Elsevier, v. 368, p. 123501, 2024.
- FREULER, L. **”sun21”sets world record!** 2007. Acesso em 8 de jul de 2024. Disponível em: <http://www.transatlantic21.org/>.

HASAN, A. M.; TRIANNI, A. Energy management: sustainable approach towards industry 4.0. In: IEEE. **2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. [S.l.], 2020. p. 537–541.

JJENGENHARIA, F. **Energia solar fotovoltaica**. 2023. Acesso em 15 de dez de 2024. Disponível em: <http://jj.eng.br/segmento>.

KAZIMIERCZUK, M. K. **Pulse-width modulated DC-DC power converters**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

LEITE, C. C.; SOUSA, V. D. Exclusão elétrica na amazônia legal: Quem ainda está sem acesso à energia elétrica? **Instituto de Energia e Meio Ambiente, ISIS**, 2020.

LIU, X.; ZHAO, T.; DENG, H.; WANG, P.; LIU, J.; BLAABJERG, F. Microgrid energy management with energy storage systems: A review. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, CSEE, v. 9, n. 2, p. 483–504, 2022.

MATIELLO, S.; PAGANI, C. H. P.; LEAL, M. L. M.; CERRI, F.; MORET, A. D. S. Energia e desenvolvimento: alternativas energéticas para áreas isoladas da amazônia. **Revista Presença Geográfica**, v. 5, n. 1, p. 11–21, 2018.

MEDEIROS, R. L. P. D.; JR, W. B.; BESSA, I. V. D.; FILHO, J. E. C.; JR, F. A. D. C. A.; NEVES, C. C. D. Robust decentralized controller for minimizing coupling effect in single inductor multiple output dc-dc converter operating in continuous conduction mode. **ISA transactions**, Elsevier, v. 73, p. 112–129, 2018.

MELO, S.; ROMANEL, C. **Gestão de Recursos Hídricos no Estado do Amazonas: o Caso da Bacia do Tarumã-Açu**. [S.l.]: Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental), 2015.

MOHAN, F.; SASIDHARAN, N. Dc microgrid and its protection-a review. In: IEEE. **2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)**. [S.l.], 2020. p. 1–6.

MOURA, M. M. de; VALE, L. A. de M.; COSTA, V. P. de A.; DIAS, D. H. N.; FIGUEIREDO, G. Avaliação da integridade de módulos fotovoltaicos semi flexíveis aplicado ao sistema de geração de um catamarã elétrico. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. [S.l.: s.n.], 2024.

NASCIMENTO, B. Z.; CATELAN, T. C.; CHAVES, G. d. L. D.; CELESTE, W. C. Avaliação da viabilidade de implementação de sistemas híbridos renováveis para o acesso de energia na região amazônica. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 10, p. e448101415–e448101415, 2019.

NETO, T. O.; NOGUEIRA, R. J. B. **Caminhos que marcham: o transporte fluvial na Amazônia**. 1°. ed. [S.l.]: Revista Terra das Águas, 1999.

_____. Os transportes e as dinâmicas territoriais no amazonas. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia**, Théry, Hervé, n. 43, 2019.

NISE, N. S. **Control systems engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.

PARK, J.-D.; CANDELARIA, J.; MA, L.; DUNN, K. Dc ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location. **IEEE transactions on Power delivery**, IEEE, v. 28, n. 4, p. 2574–2584, 2013.

RASHID, M. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. Makron, 1999. ISBN 9788534605984. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=n9tIAAAACAAJ>.

RASHID, M. M. U.; HOSSAIN, M. A.; SHAH, R.; ALAM, M. S.; KARMAKER, A. K.; RAHMAN, M. An improved energy and cost minimization scheme for home energy management (hem) in the smart grid framework. In: IEEE. **2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)**. [S.l.], 2020. p. 1–2.

SEN, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics, International Adaptation**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2021.

STACCIARINI, J.; FELDMANN, L. **A importância da rede hidroviária para o Estado do Amazonas**. 14°, n.1. ed. [S.l.]: Revista Okara: Geografia em debate, 2020. 153-168 p.

TAN, S.; XIE, P.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; ALCALA, J. M.; CARREÑO, J. E. M.; GUERRERO-ZAPATA, M. Lyapunov-based resilient cooperative control for dc microgrid clusters against false data injection cyber-attacks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 15, n. 3, p. 3208–3222, 2024.

TANG, W.; QIN, H. Multi-microgrid optimal scheduling considering electric vehicle participation. In: IEEE. **2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)**. [S.l.], 2019. p. 2026–2031.

TARASIUK, T.; JAYASINGHE, S. G.; GORNIK, M.; PILAT, A.; SHAGAR, V.; LIU, W.; GUERRERO, J. M. Review of power quality issues in maritime microgrids. **IEEE Access**, IEEE, v. 9, p. 81798–81817, 2021.

TOLEDO, A. de P.; SILVA, M. E. R. A. da. Integração amazônica pela navegação fluvial: Do tratado de cooperação amazônica à crise da iniciativa para integração de infraestrutura regional sul-americana. **Dom Helder Revista de Direito**, v. 3, n. 7, 2020.

UDDIN, M.; MO, H.; DONG, D.; ELSAWAH, S.; ZHU, J.; GUERRERO, J. M. Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. **Energy Strategy Reviews**, Elsevier, v. 49, p. 101127, 2023.

VOLITAN. **designnobilis**. 2024. Disponível em: designnobilis.com.

WANG, Y.; LI, Q.; LI, B.; WEI, T.; ZHU, Z.; LI, W.; WEN, W.; WANG, C. A practical dc fault ride-through method for mmc based mvdc distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 36, n. 4, p. 2510–2519, 2020.

XIE, M.; JI, X.; HU, X.; CHENG, P.; DU, Y.; LIU, M. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution system with multi-microgrids. **Energy**, Elsevier, v. 153, p. 479–489, 2018.

XILJAK, D. D. **Parameter space methods for robust control design: A guided tour**. [S.l.]: IEEE Transactions on Automatic Control, AC-34, 674 688., 1989.

YAN, N.; LI, S.; YAN, T.; MA, S. H. Study on the whole life cycle energy management method of energy storage system with risk correction control. In: IEEE. **2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)**. [S.l.], 2020. p. 2450–2454.

YONEDA, Y. Ms tûranor planetsolar: Inhabitat reports live from the world's largest solar-powered boat. **Tûranor PlanetSolar**, 2015.

ZHANG, Y.; YANG, X.; ZHOU, J.; A. Application of regional integrated energy management and service management system. In: IEEE. **2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)**. [S.l.], 2020. p. 1568–1573.