

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Daniel Leocádio Fernandes

Sistemas Multiagentes Aplicados a Microrredes em Corrente Contínua com
Ênfase nas Interfaces de Comunicação em um Ambiente de Cossimulação

Juiz de Fora

2025

Daniel Leocádio Fernandes

**Sistemas Multiagentes Aplicados a Microrredes em Corrente Contínua com
Ênfase nas Interfaces de Comunicação em um Ambiente de Cossimulação**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área: Sistemas Eletrônicos.

Orientadora: Profª. Drª. Janaína Gonçalves de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Márcio Soares

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Fernandes, Daniel Leocádio.

Sistemas Multiagentes Aplicados a Microrredes em Corrente Contínua
com Ênfase nas Interfaces de Comunicação em um Ambiente de Cossimulação
/ Daniel Leocádio Fernandes. – 2025.

133 p. : il.

Orientadora: Janaína Gonçalves de Oliveira

Coorientador: Guilherme Márcio Soares

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de
Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2025.

1. Cossimulação.
 2. Sistema multiagentes.
 3. Taxa de atualização automática.
- I. Oliveira, Janaína, orient. II. Soares, Guilherme, coorient.
III. Título.

Daniel Leocádio Fernandes

Sistemas multiagentes aplicados a microrredes em corrente contínua com ênfase nas interfaces de comunicação em um ambiente de cossimulação

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Aprovada em 08 de dezembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Janaína Gonçalves de Oliveira - Orientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Guilherme Márcio Soares - Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira

Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Paulo Fernando Ribeiro

Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Pedro Gomes Barbosa

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Carlos Augusto Duque

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 19/11/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Márcio Soares, Professor(a)**, em 08/12/2025, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Janaina Goncalves de Oliveira, Professor(a)**, em 08/12/2025, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Gomes Barbosa, Coordenador(a)**, em 08/12/2025, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Augusto Duque, Professor(a)**, em 08/12/2025, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **PAULO FERNANDO RIBEIRO, Usuário Externo**, em 08/12/2025, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



[novembro de 2020.](#)



Documento assinado eletronicamente por **gustavo henrique da costa oliveira, Usuário Externo**, em 12/12/2025, às 11:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2753986** e o código CRC **341254B3**.

*À Cristina, ao Felipe e ao André
que são a inspiração ao meu esforço.*

Agradecimentos

À minha família, em especial à minha esposa, Ana Cristina, aos meus filhos, Felipe e André, à minha mãe, Elza, e aos meus irmãos, por todo o amor, apoio, incentivo, motivação e confiança depositados em mim, bem como pela compreensão e abdicação do convívio durante as muitas horas dedicadas aos estudos.

Aos meus orientadores e professores, Janaína de Oliveira e Guilherme Márcio, pelos valiosos ensinamentos, incentivos, disponibilidade e dedicação ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, que sempre torceram por mim e me apoiaram nessa trajetória.

É importante mencionar o suporte educacional e a infraestrutura laboratorial disponibilizados pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e pela Universidade Federal de Juiz de Fora, sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho.

Por fim, o autor agradece o apoio financeiro concedido, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) — Código de Financiamento 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e pela Universidade Federal de Juiz de Fora, por meio da bolsa de estudos concedida.

*Não se pode mudar o vento, mas sim ajustar
as velas do barco para se chegar aonde quer.*

Resumo

Esta tese apresenta uma investigação e análise aprofundada de um sistema multiagente projetado para coordenar as operações de uma Microrrede (MR) em corrente contínua conectada ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), composta por diversos conversores de energia e cargas. O objetivo principal deste sistema é aumentar a estabilidade da MR através da gestão ativa do estado de carga da unidade de armazenamento de energia, neste caso, um banco de baterias. O Sistema Multiagentes (MAS) desempenha um papel crítico no fornecimento de informações em tempo real ao retificador/inversor, o qual provê a interligação da MR ao SEP, permitindo o controle preciso da injeção de corrente no barramento de corrente contínua com base nos dados dos sensores coletados pelos conversores integrados na MR. Por outro lado, sobras na geração da MR são exportadas para o SEP. Esta tese explora um cenário de teste simulado em um ambiente de cossimulação. É proposta uma técnica que visa a adaptação da taxa de atualização dos agentes ao MAS de forma a mitigar interferências causadas por retardos na rede de comunicação. São simulados dois cenários de retardo: $0,84\text{ ms}$ e $46,0\text{ ms}$, momento em que os agentes passam a atualizar o MAS a taxas de 65 Hz e 16 Hz , respectivamente. O sistema simulado produziu resultados satisfatórios, destacando a eficácia do sistema multiagente na melhoria da estabilidade operacional, do desempenho da MR e da técnica de adaptação da taxa de atualização proposta. São simulados cenários em que a MR se encontra conectada ao SEP, assim como, ilhada. Tais testes bem-sucedidos abrem caminho para a pesquisa e o desenvolvimento adicionais nesta área crítica de gestão de energia e controle de MRs. A análise de dados provenientes da operação do sistema é embasada em relatórios gerados a partir de um banco de dados que armazena informações operacionais da MR, assim como, de dados gerados pelos simuladores individuais integrantes do sistema.

Palavras-chave: Cossimulação. Sistema multiagentes. Taxa de atualização automática.

Abstract

This thesis presents an in-depth investigation and analysis of a multi-agent system designed to coordinate the operations of a direct current microgrid connected to the main grid, composed of various power converters and loads. The primary objective of this system is to increase the microgrid's stability through the active management of the state of charge of the energy storage unit, in this case, a battery bank. The multi-agent system plays a critical role in providing real-time information to the rectifier/inverter, which provides the interconnection between the microgrid and the main grid, enabling precise control of the current injection into the direct current bus based on sensor data collected by the converters integrated into the microgrid. On the other hand, surplus generation from the microgrid is exported to the main grid. This thesis explores a simulated test scenario in a co-simulation environment. A technique is proposed that aims to adapt the agents' update rate to the multi-agent system in order to mitigate interference caused by delays in the communication network. Two delay scenarios are simulated: 0.84 ms and 46.0 ms , at which point the agents begin updating the multi-agent system at rates of 65 Hz and 16 Hz , respectively. The simulated system produced satisfactory results, highlighting the effectiveness of the multi-agent system in improving operational stability, microgrid performance, and the proposed update rate adaptation technique. Scenarios are simulated in which the microgrid is connected to the main grid, as well as isolated. These successful tests pave the way for further research and development in this critical area of energy management and microgrid control. The analysis of data from the system's operation is based on reports generated from a database that stores microgrid operational information, as well as data generated by the individual simulators that are part of the system.

Keywords: Co-simulation. Multi-agent system. Automatic update rate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	– Visão geral dos sistemas de geração centralizada e distribuída.	20
Figura 1.2	– Análise por autores extraída da base Dimensions com as palavras-chave: <i>micro-grid</i> , <i>co-simulation</i> , <i>multi-agent</i> e <i>distributed control</i> .	23
Figura 1.3	– Análise por tema extraída da base Dimensions com as palavras-chave: <i>micro-grid</i> , <i>co-simulation</i> , <i>multi-agent</i> e <i>distributed control</i> .	24
Figura 2.4	– Microrrede CC.	39
Figura 2.5	– Estrutura de controle hierárquica típica de uma microrrede CC.	42
Figura 2.6	– Controle do estado de carga (SoC).	44
Figura 2.7	– Ponto de inflexão.	45
Figura 2.8	– Ilustração de simulação em tempo real e não-real.	47
Figura 3.9	– Sistema de operação do barramento CC.	53
Figura 3.10	– Conexão entre os elementos do cossimulador.	54
Figura 3.11	– Diagrama de blocos do sistema.	54
Figura 3.12	– Estrutura de comunicação do sistema.	55
Figura 3.13	– Fluxo principal de execução da cossimulação na instância MAS.	57
Figura 3.14	– Fluxos secundários de execução da cossimulação nas instâncias dos conversores do sistema.	58
Figura 3.15	– Exemplo de fluxo de mensagens do sistema.	59
Figura 3.16	– Blocos DLL.	61
Figura 3.17	– Algoritmo de controle do MAS.	62
Figura 3.18	– Caso em estudo.	63
Figura 3.19	– Método de Åström-Hägglund.	63
Figura 3.20	– Oscilação do sistema em malha fechada utilizando controlador por histerese destacando as grandezas numéricas envolvidas.	64
Figura 3.21	– Mecanismo de ajuste do TA com base em atrasos de comunicação específicos do agente.	69
Figura 4.22	– Diagrama de blocos do sistema.	73
Figura 4.23	– Conversores utilizados no ambiente de cossimulação na fase preliminar.	75
Figura 4.24	– Curva de descarga da bateria.	76
Figura 4.25	– Resultados obtidos no conversor bidirecional CC-CC.	78
Figura 4.26	– Resultados da operação do conversor controlador dos arranjos fotovoltaicos.	79
Figura 4.27	– Eventos observados com variações nos consumidores.	80
Figura 4.28	– Comportamento do sistema à diferentes taxas de atualização.	81

Figura 4.29	– Eventos observados à taxa de atualização de 10 Hz	82
Figura 4.30	– Fluxo de mensagens trocadas entre Bidi, PV e MAS.	83
Figura 4.31	– Curvas do conversor CC-CC bidirecional para diferentes taxas de amostragem.	84
Figura 4.32	– Elementos físicos do sistema cossimulador.	86
Figura 4.33	– Continuidade do barramento CC.	88
Figura 4.34	– Subcircuito da bateria.	88
Figura 4.35	– Curva de descarga da bateria.	89
Figura 4.36	– Simulação de retardo na rede de comunicação.	91
Figura 4.37	– Frequências de atualização dos agentes ao MAS na presença de latência no meio de comunicação.	92
Figura 4.38	– Resultados obtidos no ambiente de cossimulação.	94
Figura 4.39	– Sistema operando sob taxa de atualização fixa.	97
Figura 4.40	– Cenário de contingência em caso de falha na comunicação.	100
Figura 4.41	– Comportamento do Retificador/Inversor em caso de falha na comunicação.	101
Figura 4.42	– Cenário de contingência na operação da MR ilhada.	102
Figura 4.43	– Variações no ambiente de cossimulação na presença de evento na geração solar.	103
Figura A.44	– Conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração <i>Buck</i> em modelo chaveado.	116
Figura A.45	– Topologia do conversor CC-CC bidirecional em corrente. . .	116
Figura A.46	– Inversor monofásico.	117
Figura A.47	– Modelo de valor médio dinâmico.	118
Figura A.48	– Conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração <i>Buck</i> em modelo médio.	119
Figura A.49	– Composição do circuito dos geradores de sinais de controle para as fontes controladas do modelo médio do conversor CC-CC unidirecional.	120
Figura A.50	– Modelo médio do conversor CC-CC Bidirecional	120
Figura A.51	– Sinais de controle das fontes controladas do modelo médio do conversor bidirecional.	120
Figura A.52	– Modelo médio da carga.	121
Figura A.53	– Conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração <i>Buck</i> em modelo chaveado.	121
Figura A.54	– Conversor Buck do PV com o interruptor aberto.	122
Figura A.55	– Conversor Buck do PV com o interruptor fechado.	123
Figura A.56	– Controle do conversor unidirecional em corrente <i>Buck</i> . . .	125

Figura A.57	– Conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração <i>Boost</i>	126
Figura A.58	– Circuito equivalente para o interruptor semicondutor fechado.	127
Figura A.59	– Circuito equivalente para o interruptor semicondutor aberto.	127
Figura A.60	– CC-CC Bidirecional em corrente.	129
Figura A.61	– Controle em cascata.	133
Figura A.62	– Controle em cascata - simplificação I.	133
Figura A.63	– Controle em cascata - final.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Sumário dos trabalhos da literatura comentados.	31
Tabela 1.2 – Comparativo entre as técnicas <i>In-the-loop</i>	33
Tabela 3.3 – Protocolo de comunicação entre agentes e o MAS.	56
Tabela 3.4 – Descrição das variáveis do sistema.	60
Tabela 3.5 – Tabela de identificação dos pinos do bloco de comunicação de um agente.	60
Tabela 3.6 – Descrição das variáveis do algoritmo de controle do MAS. . . .	62
Tabela 3.7 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols com base em Ganho Crítico K_{CR} (K_u) e Período Crítico P_{CR} (P_u) (Segundo Método).	65
Tabela 3.8 – Infraestrutura de equipamentos.	66
Tabela 3.9 – Avaliação do rendimento do link <i>socket/TCP/IP</i>	66
Tabela 3.10–Retardo no tempo de simulação em diferentes taxas de atualização. .	67
Tabela 4.11–Lista de parâmetros utilizados no conversor unidirecional em corrente.	77
Tabela 4.12–Lista de parâmetros utilizados no conversor bidirecional em corrente. .	77
Tabela 4.13–Nomenclatura das curvas da Figura 4.28.	81
Tabela 4.14–Atraso de reação do agente PV na visão do Bidi de acordo com a taxa de amostragem.	85
Tabela 4.15–Hardware utilizado no experimento.	85
Tabela 4.16–Alocação dos simuladores por estação.	86
Tabela 4.17–Lista de parâmetros utilizados no conversor unidirecional, em corrente em modelo médio.	90
Tabela 4.18–Lista de parâmetros utilizados no conversor bidirecional em corrente em modelo médio.	90
Tabela 4.19–Lista de parâmetros utilizados no conversor retificador/inversor em modelo médio.	90
Tabela 4.20–Parâmetros utilizados na sessão de simulação NS-3.	91
Tabela 4.21–Parâmetros utilizados em uma primeira abordagem da MR em ambiente de cossimulação.	93
Tabela 4.22–Parâmetros utilizados em uma segunda abordagem da MR em ambiente de cossimulação.	93
Tabela 4.23–Comparação entre taxas de atualização adaptativa e fixa.	98

Lista de Abreviaturas e Siglas

AOP	Programação Orientada a Agentes , do inglês (<i>Agent-Oriented Programming</i>)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CC-CA	Corrente Contínua para Corrente Alternada
CC-CC	Corrente Contínua para Corrente Contínua
CCM	Modo de Condução Contínua, do inglês (Continuous Conduction Mode)
CEL	Comunidades de Energia Local
CHIL	<i>Controller Hardware-in-the-loop</i>
CP	Controle Primário
CPES	Sistema de Energia Ciberfísica , do inglês (<i>Cyber-Physical Energy System</i>)
CS	Controle Secundário
CT	Controle Terciário
DAVM	Modelo de Valor Médio Dinâmico , do inglês (<i>Dynamic Average Value Model</i>)
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
DLL	Biblioteca de Link Dinâmico , do inglês (<i>Dynamic Link Library</i>)
EMS	Sistema de Gerenciamento de Energia , do inglês (<i>Energy Management System</i>)
EV	Veículos Elétricos , do inglês (<i>Electric Vehicles</i>)
ESS	Sistema de Armazenamento de Energia , do inglês (<i>Energy Storage System</i>)
FA	Frequência de Atualização
FIPA-OS	Fundação para Agentes Físicos Inteligentes-Sistemas Abertos , do inglês (<i>Foundation For Intelligent Physical Agents - Open Systems</i>)
GD	Geração Distribuída
IP	Protocolo de Internet , do inglês (<i>Internet Protocol</i>)
JADE	Ambiente de Desenvolvimento de Agentes Em Java , do inglês (<i>Java Agent Development Environment</i>)
HIL	Hardware-in-the-loop
MGCC	Controlador Central da Microrrede , do inglês (<i>Multigrid Central Controller</i>)

MAS	Sistema Multiagentes , do inglês (<i>Multi-Agent System</i>)
ML	Aprendizado de Máquina , do inglês (<i>Machine Learning</i>)
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência , do inglês (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
MR	Microrrede
NTR	Não-Tempo Real
OPC	Comunicações de Plataforma Aberta , do inglês (<i>Open Platform Communications</i>)
OPNET	Simulador de Rede em Nível de Pacote , do inglês (<i>Packet-Level Network Simulator</i>)
PHIL	<i>Power Hardware in the Loop</i>
PID	Proporcional, Integral E Derivativo
PSCAD	Projeto Assistido por Computador de Sistemas de Energia , do inglês (<i>Power Systems Computer Aided Design</i>)
PWM	Modulação por Largura de Pulses , do inglês (<i>Pulse Width Modulation</i>)
PV	Painel Fotovoltaico
RMS	Valor Médio Quadrático , do inglês (<i>Root Mean Square</i>)
ROS	Resto do Sistema , do inglês (<i>Rest of the System</i>)
RTDS	Simulador Digital em Tempo Real , do inglês (<i>Real Time Digital Simulator</i>)
RTT	Tempo de Ida e Volta , do inglês (<i>Round-Trip Time</i>)
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIL	Software-in-the-loop
SoC	Estado de Carga , do inglês (<i>State Of Charge</i>)
SNMP	Protocolo Simples de Gerenciamento de Rede , do inglês (<i>Simple Network Management Protocol</i>)
SPWM	Modulação por Largura de Pulso Senoidal , do inglês (<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>)
TA	Tempo de Atualização
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão , do inglês (<i>Transmission Control Protocol</i>)
TeD	Transmissão e Distribuição
TE	Tempo de Espera

TESP	Plataforma de Simulação de Energia Transativa , do inglês (<i>Transactive Energy Simulation Platform</i>)
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação , do inglês (<i>Information and Communication Technologies</i>)
TR	Tempo Real
TS	Tempo de Simulação
VSC	Conversor de Fonte de Tensão , do inglês (<i>Voltage Source Converter</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
1.1.1	Microrredes	22
1.1.2	Conversores de energia	25
1.1.3	Sistema multiagente	26
1.1.4	Cossimulação	28
1.1.5	Sumário dos trabalhos da literatura comentados	30
1.1.6	Simulações <i>in-the-loop</i>	32
1.2	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E CONTRIBUIÇÕES	32
1.2.1	Identificação do problema	33
1.2.2	Contribuições	34
1.3	OBJETIVOS	34
1.3.1	Objetivo geral	34
1.3.2	Objetivos específicos	35
1.4	PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	35
1.4.1	Artigos relacionados ao trabalho	35
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	36
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	37
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO CONTEXTO DA ARQUITETURA DE INTERESSE	37
2.1.1	Componentes de uma microrrede	38
2.2	SISTEMA MULTIAGENTE	40
2.3	MÉTODOS DE CONTROLE EM MICRORREDES	41
2.3.1	Estrutura hierárquica	42
2.3.2	Controle do estado de carga	43
2.4	COSSIMULAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA	46
2.4.1	Arquitetura do ambiente de cossimulação	46
2.4.2	Ambientes computacionais utilizados	47
2.4.2.1	PSIM	48
2.4.2.2	PLECS	48
2.4.2.3	RTDS	48
2.4.2.4	Integração dos simuladores	49
2.4.3	Considerações sobre Robustez e Estabilidade em ambientes de cossimulação	50
2.5	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	51
3	METODOLOGIA	52
3.1	SISTEMA EM ESTUDO E ARQUITETURA GERAL	52

3.2	ESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO E PROTOCOLOS	54
3.2.1	Protocolo de comunicação	56
3.2.2	Taxa de atualização do MAS	56
3.3	AMBIENTE DE COSSIMULAÇÃO E INTEGRAÇÃO	56
3.3.1	Sistema Multiagentes	58
3.3.1.1	Definição do controlador localizado no segundo patamar de controle (PID)	62
3.3.1.2	Controlador do SoC	64
3.4	ABORDAGEM COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO FIXA	65
3.4.1	Fundamentação Teórica	65
3.4.1.1	Teste de <i>throughput</i> para definição da taxa de atualização do MAS	65
3.4.2	Limitações da abordagem com taxa fixa	67
3.5	ABORDAGEM COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO ADAPTATIVA	67
3.5.1	Fundamentação Teórica do Algoritmo Adaptativo	68
3.5.2	Mecanismo de Ajuste Dinâmico	69
3.6	LIMITAÇÕES DESTA ABORDAGEM	70
3.7	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	70
4	RESULTADOS	72
4.1	ABORDAGEM COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO FIXA	72
4.1.1	Modelos de Simulação Utilizados na Abordagem com TA Fixa	74
4.1.2	Parâmetros adotados no sistema	76
4.1.3	Resultados obtidos com a taxa de atualização (TA) fixa	77
4.1.4	Efeitos e Limitações Observados	80
4.2	ABORDAGEM COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO ADAPTATIVA	85
4.2.1	Modelos de Simulação Utilizados na Abordagem com TA Adaptativa	86
4.2.2	Parâmetros adotados no sistema	90
4.2.3	Atrasos simulados no meio de comunicação	90
4.2.4	Diferenças de parametrização em relação à TA fixa	92
4.3	RESULTADOS GERAIS COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO ADAPTATIVA	93
4.4	COMPARAÇÃO DIRETA ENTRE TA FIXO E ADAPTATIVO	95
4.5	ANÁLISES DE CONTINGÊNCIA	98
4.5.1	Cenários de Contingência Considerados	98
4.5.2	Falhas de Comunicação	99
4.5.3	Operação em Modo Ilhado	100
4.6	RESPOSTA SOB CONDIÇÕES CRÍTICAS	101
4.7	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	103
5	Conclusões e considerações finais	105
5.1	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	105

REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A – APÊNDICE	115
A.1 CONVERSORES DE POTÊNCIA	115
A.1.1 Conversor unidirecional em corrente	115
A.1.2 Conversor bidirecional em corrente	115
A.1.3 Inversor monofásico	117
A.1.4 Interface com o SEP	117
A.1.5 Modelos médios dos conversores	118
A.1.5.1 Modelo médio do conversor CC-CC unidirecional em corrente	118
A.1.5.2 Modelo médio do conversor CC-CC bidirecional em corrente	119
A.1.6 Modelo médio da carga	120
A.2 CONVERSOR CC-CC UNIDIRECIONAL EM CORRENTE NA CONFIGURAÇÃO <i>BUCK</i>	121
A.2.1 Modelamento do conversor	121
A.2.2 Função de transferência do conversor unidirecional em corrente	125
A.2.3 Controle do conversor	125
A.3 CONVERSOR CC-CC UNIDIRECIONAL EM CORRENTE NA CONFIGURAÇÃO <i>BOOST</i>	125
A.3.1 Modelamento do conversor	126
A.3.2 Efeito da resistência série do capacitor sobre a tensão de saída	128
A.3.3 Efeito da resistência série do indutor	128
A.4 CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL	129
A.4.1 Modelamento do conversor	129
A.4.1.1 Análise de pequenas perturbações	130
A.4.1.2 Separação dos componentes CC e CA	131
A.4.1.3 Passando ao domínio da frequência s	131
A.4.1.4 Variável de saída	131
A.4.2 Função de transferência do Conversor Bidirecional em corrente	132
A.4.3 Controle do conversor	132

1 INTRODUÇÃO

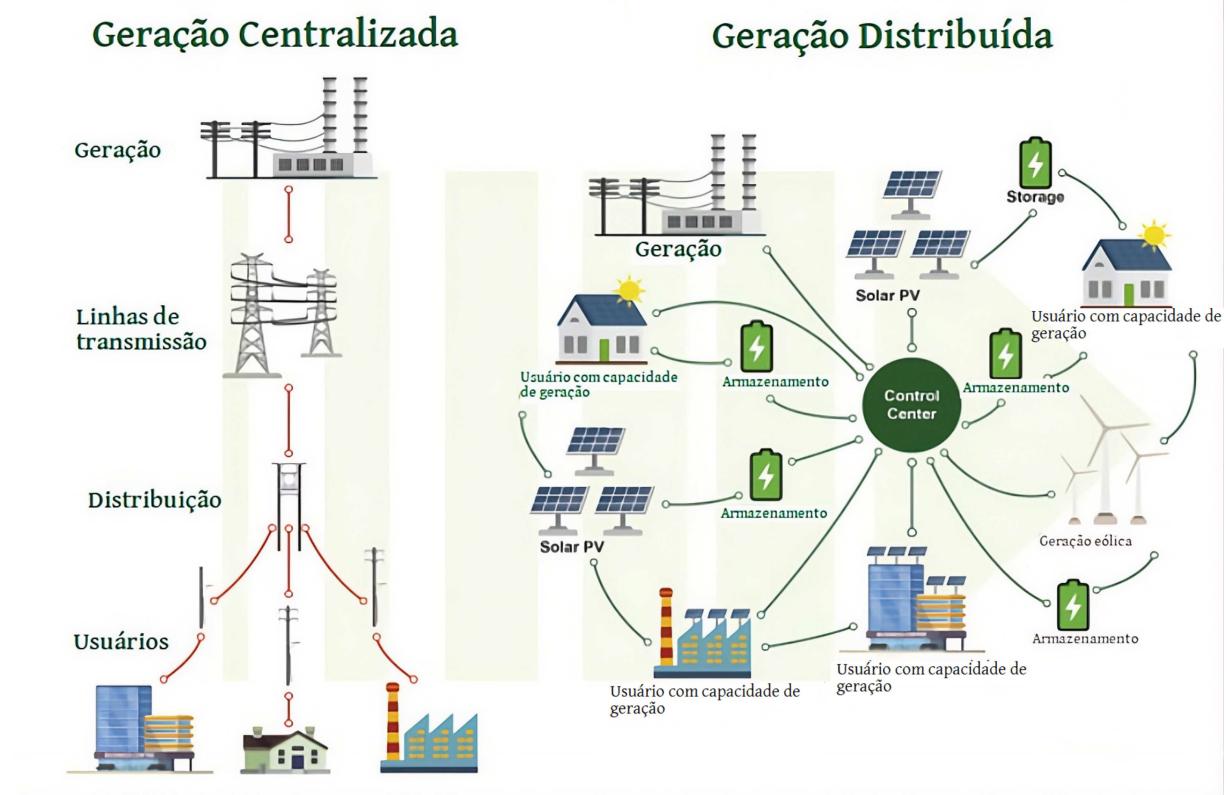
Em um contexto marcado por crescentes preocupações globais relacionadas às mudanças climáticas e aos seus impactos na sociedade, o setor energético passa por uma profunda mudança de paradigma, orientada à adoção de soluções sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Nesse cenário, os sistemas eletrônicos de energia assumem papel central, uma vez que constituem a base para a conversão, a distribuição e o gerenciamento eficiente da energia elétrica. À medida que a comunidade científica e industrial busca mitigar os efeitos das mudanças climáticas, o desenvolvimento e o aprimoramento desses sistemas tornam-se foco prioritário de pesquisas e de soluções tecnológicas inovadoras.

Os sistemas eletrônicos de energia englobam um conjunto diversificado de componentes e tecnologias interconectadas, projetadas para viabilizar a conversão e o controle da energia elétrica em diferentes aplicações. Nesse contexto, a matriz elétrica vivencia uma transição progressiva do modelo tradicional de geração centralizada para arquiteturas de geração distribuída, conforme ilustrado na Figura 1.1. Os Recursos Energéticos Distribuídos (REDs), fortemente baseados em sistemas eletrônicos de potência, impõem novas exigências de comunicação e coordenação, significativamente mais complexas do que aquelas observadas em sistemas centralizados convencionais.

A inserção massiva de fontes renováveis intermitentes, como sistemas fotovoltaicos e eólicos, associada ao uso crescente de sistemas de armazenamento de energia, especialmente baterias, transforma a rede elétrica em uma estrutura dinâmica e bidirecional. Nesse novo paradigma, um dos principais desafios reside na comunicação eficiente e confiável entre os diversos elementos da rede elétrica, condição essencial para garantir estabilidade, desempenho e segurança operacional.

Os conversores de potência, baseados em sistemas eletrônicos, desempenham um papel fundamental na integração dos diversos elementos que compõem os sistemas modernos de energia elétrica, tais como sistemas de armazenamento, fontes de geração renováveis e não renováveis, bem como cargas elétricas. Esses sistemas de energia podem assumir diferentes configurações, características operacionais e escalas de potência, variando conforme a aplicação e o contexto de implantação. Nesse cenário, o conceito de Microrrede (MR), desenvolvido no início do século XXI, representa uma mudança significativa em relação ao modelo tradicional de redes elétricas centralizadas, ao permitir a integração e o controle coordenado de unidades de Geração Distribuída (GD). As MRs podem ser classificadas em microrredes em Corrente Alternada (CA) ou em Corrente Contínua (CC) (KUMAR; PRABHA, 2022), sendo estas últimas reconhecidas como uma solução eficiente, escalável e confiável, especialmente para a eletrificação de áreas remotas e para aplicações que demandam elevada eficiência energética. No entanto, para garantir sua operação segura e estável, as MRs em CC requerem estratégias de controle adequadas e funcionamento em

Figura 1.1 – Visão geral dos sistemas de geração centralizada e distribuída.



Fonte: (ASIF, 2022).

conformidade com parâmetros previamente estabelecidos.

Durante as fases de concepção, desenvolvimento e projeto das MRs, torna-se essencial a realização de testes que permitam validar o desempenho do sistema frente aos requisitos operacionais especificados. Nesse contexto, destacam-se os simuladores computacionais, os quais possibilitam a análise, a verificação e o aprimoramento das estratégias de controle e da arquitetura do sistema antes de sua implementação em ambiente real.

A simulação é um método comum para avaliar o desempenho de Sistema de Energia Ciberfísica (CPES). Os sistemas de potência e de comunicação são analisados em simuladores separados. A simulação integrada só pode ser realizada mediante a reimplementação dos modelos de comunicação em um simulador de sistemas de potência (ou vice-versa), ou pela criação de uma plataforma de cossimulação que combine ambos os simuladores, utilizando um módulo de controle para sincronizar o tempo e intercambiar dados. Embora a reimplementação não exija sincronização temporal nem reconstrução de dados, os simuladores de sistemas de potência geralmente não suportam todas as funcionalidades necessárias para modelar o sistema de comunicação e vice-versa (SHI *et al.*, 2015).

Como mencionado, as MRs trazem a integração de unidades de GD, sendo necessário o estabelecimento de formas de controle tais que as unidades independentes não causem distúrbios na rede elétrica. Neste contexto, os sistemas multiagentes (Sistema Multiagentes (MAS)) oferecem recursos de controle em um meio escalonável que permitem organizar a cooperação entre os elementos de MRs. Nessa estratégia de controle, agentes autônomos utilizam informações locais e comunicação entre vizinhos e o MAS para alcançar objetivos comuns de forma cooperativa (MORSTYN *et al.*, 2018). Uma vez que a MR, configurada em um cenário de MAS, estabelece níveis de operação: local e central, estratégias de controle, como controle hierárquico, são aplicáveis. Estas, potencialmente, conferem operação eficaz e robusta a esses sistemas.

A abordagem hierárquica é organizada em três camadas — primária, secundária e terciária —, cada uma com funcionalidades específicas. Diferentes estratégias de controle hierárquico aplicadas em MRs são encontradas na literatura: métodos de controle primário para o compartilhamento de corrente e a regulação de tensão, controle secundário na correção de erros, e o controle terciário voltado ao gerenciamento de potência e energia (ABHISHEK *et al.*, 2020). O MAS exerce importância fundamental no âmbito do controle hierárquico, situado nos patamares superiores da hierarquia e promovendo a orquestração dos elementos de uma MR (SMITH; ROBINSON; ELPHICK, 2024). Desta forma, a comunicação em um ambiente multi-agentes torna possível a troca de informações entre seus elementos, a qual deve ser fluida de forma a evitar o surgimento de retardos ou, até mesmo, a perda de fragmentos dos dados que circulam entre os elementos do sistema (FERNANDES *et al.*, 2024b).

Esta tese explora o uso de cossimulação habilitada em controle distribuído, tendo em seu patamar superior o orquestrador escrito em Python (FOUNDATION, 2022), e no patamar inferior os simuladores "Simulador Digital em Tempo Real (RTDS)"(RTDS Technologies Inc., 2024), "PLECS"(Plexim GmbH, 2023) e "PSIM"(POWER ELECTRONICS SOLUTION PROVIDER, 2023) para projetar e testar uma Microrrede (MR) em Corrente Contínua (CC) conectada ao Sistema Elétrico de Potência (SEP). O sistema foi concebido para fornecer energia a uma pequena vila teórica. O foco foi dado à integração de diferentes ferramentas de simulação através do protocolo de comunicação *socket* sobre Protocolo de Controle de Transmissão (TCP) / Protocolo de Internet (IP), habilitando assim o funcionamento eficiente e preciso do sistema. A tese fornece um guia passo a passo para o processo de cossimulação, incluindo a configuração do ambiente de cossimulação, o projeto do sistema e a análise dos resultados da simulação. O sistema Corrente Contínua para Corrente Contínua (CC-CC) conectado ao SEP é projetado para converter eficientemente a energia gerada por painéis fotovoltaicos em uma forma utilizável na presença de irradiação solar para a pequena vila, assim como, utilizar a energia proveniente do SEP quando a irradiação solar for insuficiente ou ausente. Em caso de geração excedente, as sobras são exportadas para o SEP. A tese explora os vários aspectos da arquitetura do sistema e a

análise dos resultados da cossimulação ajudam a avaliar o seu desempenho e a identificar áreas para melhorias futuras. É importante ressaltar que o sistema simples desenvolvido no âmbito da cossimulação do presente trabalho é dotado de quatro conversores de potência e serve de base para experimentos práticos laboratoriais.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dada a vastidão da bibliografia disponível para pesquisas, no presente estudo optou-se pela utilização de plataformas de acesso a vários bancos de dados que fornecem dados de referência e citação de periódicos acadêmicos, anais de conferências e outros documentos em várias disciplinas acadêmicas. Bases de dados tais como Dimensions (DIMENSIONS, 2023), Web of Science (CLARIVATE, 2023) e Scopus (ELSEVIER, 2023) proporcionam a massa de dados de pesquisa baseada em palavras-chave para análise pela ferramenta VOSViewer (ECK; WALTMAN, 2010). Esta possibilita a realização de análises bibliométricas criando visualizações a partir da referida massa de dados.

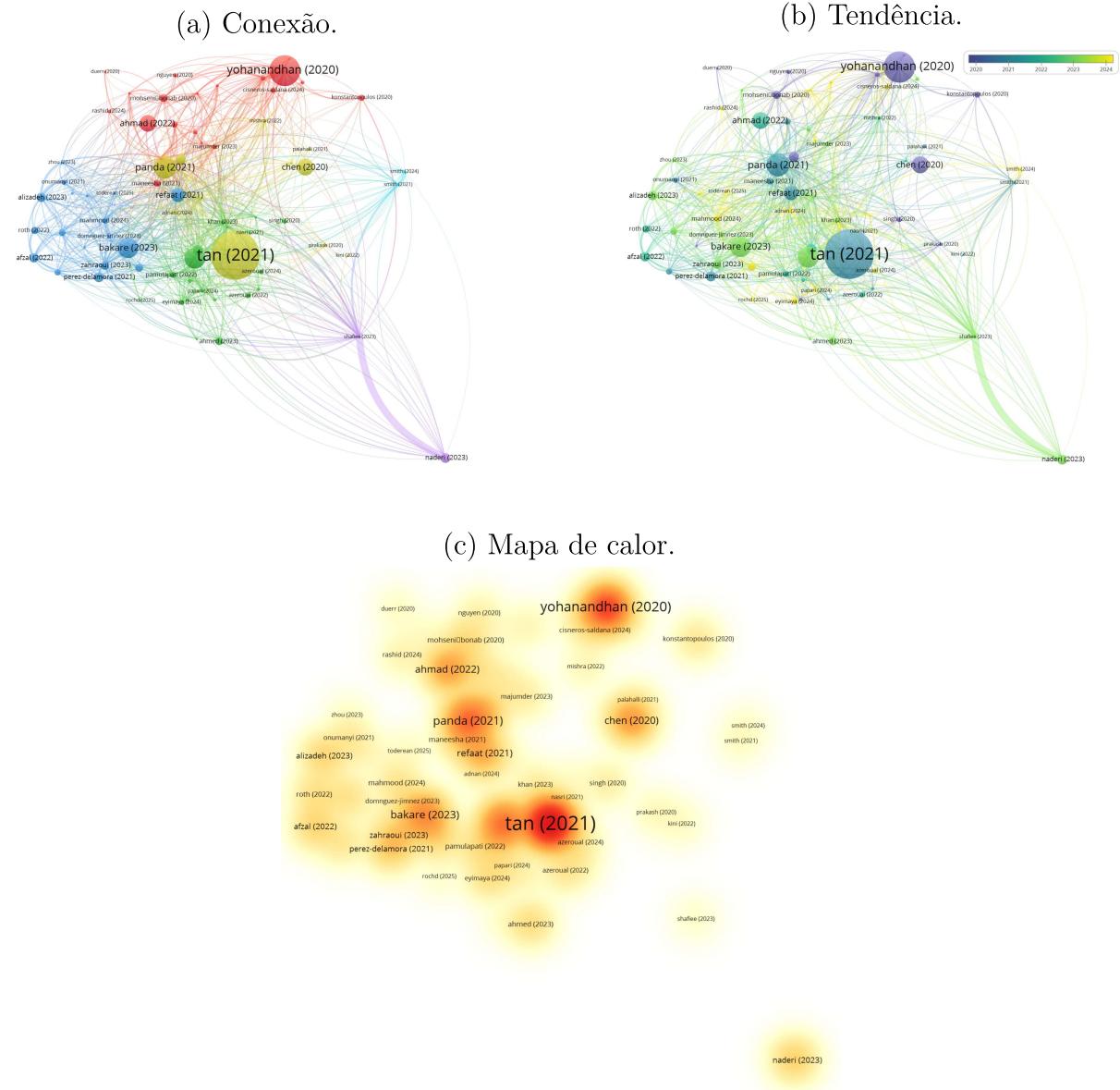
Por meio das palavras-chave, no idioma Inglês: *micro-grid; co-simulation; multi-agent* e *distributed control*, a busca realizada resultou em duzentas e uma publicações pela base Dimensions, considerando os cinco últimos anos, sobre a qual analisa-se autores citados no âmbito do tema, assim como as redes de conexões com demais autores, tendência e mapa de calor utilizando a ferramenta VOSViewer, conforme ilustrado na Figura 1.2. A Figura 1.2a mostra uma rede em destaque em que autores como (TAN, 2021), (YOHANANDHAN *et al.*, 2020), se despontam por terem estabelecido um número maior de conexões dentro do tema em foco. A Figura 1.2b mostra a tendência de citação entre os autores pesquisados sendo que os primeiros abordam o tema pesquisado por volta do ano de 2020 e os últimos, mais recentemente. Os referidos autores vêm sendo citados com maior frequência recente. A Figura 1.2c ilustra o mapa de calor destacando-se em ícones com dimensões proporcionais a influência do autor. A Figura 1.3 ilustra a evolução temática dentro do escopo extraído da base Dimensions por meio das palavras-chave mencionadas.

A Figura 1.3a ilustra a conexão entre os principais temas destacados dentro do escopo em foco. O tema *microgrid* apresenta conexões com *communication network, multi-agent system, power system, grid, energy resource*, entre outros. Sob o ponto de vista de tendência, conforme ilustrado na Figura 1.3b, o tema *microgrid* apresenta uma evolução interessante ficando em maior destaque em tempos recentes. E por último, o mapa de calor ilustrado na Figura 1.3c mostra em destaque o tema *microgrid* localizado na região central da figura, o que indica sua importância na literatura.

1.1.1 Microrredes

As Microrredes (MRs) são sistemas de energia inovadores e regionalizados que oferecem uma solução dinâmica para os desafios energéticos contemporâneos. Operando

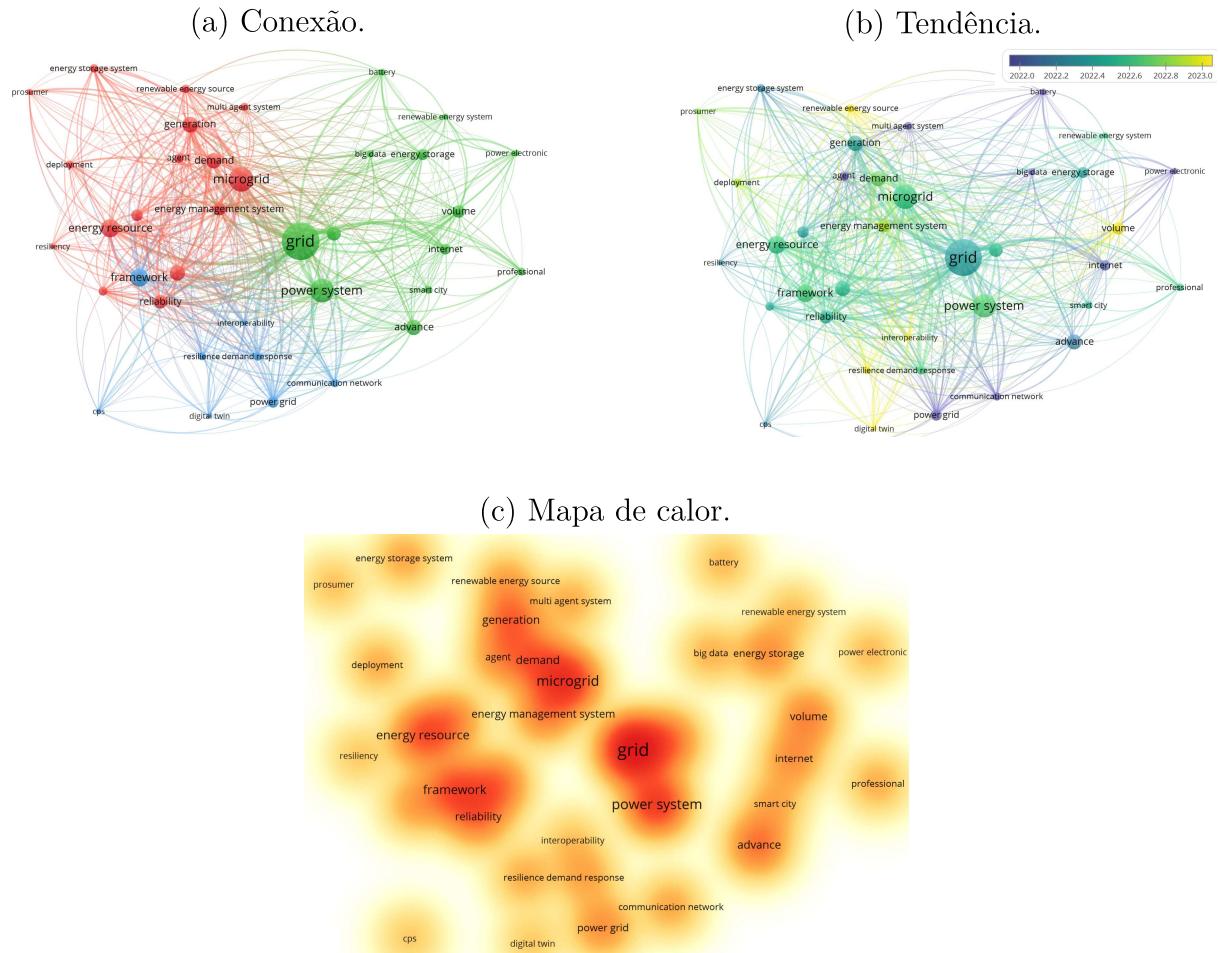
Figura 1.2 – Análise por autores extraída da base Dimensions com as palavras-chave: *micro-grid*, *co-simulation*, *multi-agent* e *distributed control*.



Fonte: Elaborado pelo autor, gerada no VOSViewer (2025).

independente ou em conjunto com o SEP, as MRs integram fontes de energia diversas, armazenamento de energia e sistemas de controle avançados. Tais redes autossustentáveis aumentam a confiabilidade energética, reduzem as emissões de carbono e melhoram a resiliência contra interrupções no fornecimento de energia. Ao promover a autonomia energética e permitir uma distribuição eficiente, as MR capacitam comunidades, campi e até mesmo indústrias a obterem maior controle sobre sua geração e consumo de energia. Essa tecnologia crescente representa um passo fundamental em direção a um cenário de energia mais sustentável e descentralizado (FARROKHABADI *et al.*, 2020).

Figura 1.3 – Análise por tema extraída da base Dimensions com as palavras-chave: *microgrid*, *co-simulation*, *multi-agent* e *distributed control*.



Fonte: Elaborado pelo autor, gerada no VOSViewer (2025).

A Geração Distribuída (GD) está relacionada à utilização de pequenas unidades geradoras instaladas em pontos estratégicos do SEP ou locais próximos a centros de carga. A GD pode ser utilizada de forma isolada, suprindo a demanda local do consumidor ou integrada à rede fornecendo energia ao SEP. A GD pode funcionar com recursos de energia renovável, combustíveis fósseis ou calor residual. O tamanho do equipamento varia de menos de um quilowatt (kW) a dezenas de megawatts (MW). A GD pode atender às mais diversas necessidades de energia em uma instalação. Se conectada a um sistema de distribuição ou transmissão, a energia pode ser vendida para a concessionária ou para terceiros (HAMMONS L L LAI, 2008).

Em se tratando de fontes de energia, recursos como: painéis solares térmicos, painéis fotovoltaicos, células de combustível, microturbinas, entre outros estão atualmente disponíveis. Tais recursos renováveis são difíceis de se conectar diretamente em um SEP. Uma MR se configura como uma interface entre os recursos mencionados e a rede elétrica

e é vista como um sistema de distribuição de baixa tensão. Uma MR pode ser operada separadamente ou conectada a um sistema de distribuição principal (TAYABA MOHD AZRIK BIN ROSLANA; KASHIF, 2017).

1.1.2 Conversores de energia

O objetivo desta Seção é apresentar uma visão geral das principais topologias de conversores de energia abordadas nesta tese, fornecendo ao leitor um panorama inicial das arquiteturas e dos conceitos fundamentais relacionados ao tema. Ressalta-se que, no Apêndice, são apresentadas análises mais detalhadas dos conversores empregados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Nessas análises, discutem-se aspectos de modelagem, operação e integração dos conversores ao sistema proposto, de modo a fundamentar as etapas subsequentes da pesquisa.

Os conversores de energia evoluíram para se tornar a espinha dorsal da infraestrutura energética moderna, possibilitando a integração de fontes renováveis, a utilização eficiente dos recursos disponíveis e o gerenciamento inteligente de energia. Amplamente citados na literatura, os conversores do tipo *Boost* (BADDIPADIGA; PRABHALA, 2018) e *Buck* (Sutedjo *et al.*, 2018), responsáveis, respectivamente, pelo aumento e pela redução dos níveis de tensão, apresentam simplicidade estrutural e eficiência satisfatória, características que justificam sua adoção no contexto desta tese. Ademais, emprega-se uma estratégia de controle em cascata associada a uma topologia de conversor bidirecional, com o objetivo de viabilizar a integração de sistemas de armazenamento de energia. Os conversores bidirecionais destacam-se como elementos essenciais, pois permitem o fluxo bidirecional de energia entre fontes e cargas, sendo fundamentais em aplicações como sistemas de armazenamento, veículos elétricos e cenários de integração com a rede elétrica (Özhan Atmaca *et al.*, 2019). O conversor bidirecional em corrente é importante neste trabalho pois promove a integração da bateria em paralelo ao barramento CC, de forma a controlar a sua carga e descarga.

Os conversores de CC-CC são utilizados para fornecer tensões reguladas a partir de fontes de tensão contínua não reguladas. Nesse contexto, tais conversores desempenham papel relevante no presente trabalho, especialmente no controle das fontes e das cargas que compõem a MR.

No conversor do tipo *Buck*, a tensão média de saída é inferior à tensão de entrada (KAZIMIERCZUK, 2008; HART, 2011). Essa topologia é composta, essencialmente, por quatro elementos: um MOSFET de potência, utilizado como chave controlável; um diodo; um indutor; e um capacitor de filtro. MOSFETs de potência são amplamente empregados em conversores CC-CC devido às suas elevadas velocidades de comutação, normalmente acionadas por meio de técnicas de Modulação por Largura de Pulso (PWM). Outros dispositivos semicondutores, como transistores bipolares de junção, transistores bipolares

de porta isolada ou tiristores controlados por MOSFET, também podem ser utilizados. O diodo presente na topologia é denominado diodo de roda livre (do inglês, *freewheeling diode*), também conhecido como diodo *flywheel* ou diodo *catch*. A rede de comutação formada pelo transistor e pelo diodo interrompe periodicamente a tensão de entrada em corrente contínua, razão pela qual esse tipo de conversor é frequentemente denominado *chopper*, resultando em uma tensão média reduzida na saída.

O conversor do tipo *Boost*, ou elevador, caracteriza-se por regular a tensão média de saída para um valor igual ou superior ao da tensão de entrada. Trata-se de um dispositivo que recebe um determinado nível de tensão ou corrente contínua em sua entrada e o converte em outro nível de tensão ou corrente contínua em sua saída, conforme descrito em (HART, 2011).

1.1.3 Sistema multiagente

De forma a se manter uma boa qualidade do serviço e interagir com a rede elétrica, uma supervisão online, ou seja, uma arquitetura de supervisão em tempo real se torna um diferencial para que a MR tenha o nível de qualidade de operação desejado. Neste sentido, o uso de um sistema multiagente tem sido defendido como uma ferramenta útil e promissora para aplicações de supervisão (AUNG *et al.*, 2010).

O sistema MAS se traduz em uma coleção de sistemas de agentes inteligentes que trabalham juntos para atingir um objetivo global (MAHELA *et al.*, 2020). O MAS permite um controle inteligente de uma MR, onde cada elemento necessário é representado por um agente inteligente que usa uma combinação de modelos matemáticos para decidir sobre ações ótimas. Cada fonte de energia, componente e carga em um sistema pode, portanto, ser representado como um agente inteligente. O elemento fundamental de um sistema multiagente é um agente inteligente que possui as três características típicas, a saber: habilidades reativas, proativas e sociais (AUNG *et al.*, 2010).

Em (SHAYANFAR; MALEK, 2015), o controle cooperativo de uma MR fotovoltaica através de um sistema multiagente é proposto. O controle cooperativo usa algoritmo de consenso para tensão e frequência. A tensão da carga deve ser mantida em valor nominal, desta forma a carga é considerada como sendo um agente inteligente que é capaz de solicitar a tensão desejável.

Em (LIU *et al.*, 2021), estratégias de controle distribuído são investigadas, pois oferecem soluções promissoras para uma infinidade de desafios encontrados no gerenciamento de sistemas de energia. Ao contrário das abordagens de controle centralizado que dependem fortemente da troca global de informações, os esquemas de controle distribuído facilitam a comunicação entre subsistemas através de uma rede, exigindo pouca ou nenhuma informação global. Este quadro descentralizado permite que cada subsistema interaja apenas com os seus homólogos vizinhos, simplificando assim a comunicação e reduzindo

a dependência de uma extensa partilha global de dados. Como resultado, a rede de comunicação sob controle distribuído pode ser mais eficiente e econômica, particularmente quando comparada com a estrutura de comunicação de todos para todos, com utilização intensiva de recursos. O controle distribuído não só aumenta a resiliência do sistema, mas também possui um potencial significativo para otimizar a alocação de recursos e o desempenho geral do sistema .

Em (LI; VASQUEZ; GUERRERO, 2015) um controle distribuído baseado em multiagentes é proposto para MR CC com o objetivo de minimizar o custo de operação. A potência de cada GD é despachada de forma distribuída através de um sistema multiagente por meio de escalonamento de tensão. Através da comunicação apenas com seus vizinhos diretos, cada unidade pode obter informações globais, tomar decisões localmente e cooperar para alcançar a minimização do custo operacional de todo o sistema. Por outro lado, os regimes centralizados crescem em capacidade de processamento computacional e de comunicação sob um número grande de unidades GD, o que gera alguns inconvenientes sobre tal arquitetura comumente encontrados na literatura:

- i. alta carga computacional devido à multiplicidade de recursos controláveis, por exemplo, unidades GD e cargas;
- ii. necessidades de comunicação diversas devido à características geográficas específicas de acordo com determinado projeto;
- iii. requisitos frequentes de redesenho, uma vez que uma mudança em apenas uma unidade afeta o controlador central;
- iv. confiabilidade e vulnerabilidade de segurança do controlador central como um ponto comum de falha (YOHANANDHAN *et al.*, 2020).

Portanto, as técnicas não centralizadas são mais adequadas para fornecer a funcionalidade necessária, as quais podem ser descentralizadas ou distribuídas. Os métodos descentralizados assumem que a interação entre os subsistemas é insignificante. Essa suposição, entretanto, nem sempre é válida e pode resultar em um desempenho ruim em todo o sistema. (YAZDANIAN; MEHRIZI-SANI, 2014).

Em (WANG *et al.*, 2021) explora-se a aplicação de uma estrutura de comércio de energia ponto a ponto para uma célula de rede CC com base em técnicas de Aprendizado de Máquina (ML) distribuídas, em que adota-se a Plataforma de Simulação de Energia Transativa (TESP). Uma célula de rede CC é definida como uma rede CC em um endereço específico, seja um edifício, pequena vila, indústria, etc., composta por múltiplos PV, EV e outras cargas CC de diferentes prosumidores. Tais células configuram blocos num contexto de redes comunitárias em maior escala, conectando vários edifícios, ou mesmo redes dessa rede comunitária.

Em (DIMEAS, 2005) é investigado o funcionamento de um sistema multiagente MAS para o controle de uma MR. A abordagem apresentada utiliza as vantagens de se usar a tecnologia MAS para controlar uma MR e um algoritmo distribuído clássico baseado no problema de atribuição simétrica para a troca ótima de energia entre as unidades de produção da MR e as cargas locais, bem como a rede principal. O Ambiente de Desenvolvimento de Agentes Em Java (JADE) (BELLIFEMINE; GREENWOOD, 2004) foi adotado pelo autor para implementação do MAS. O Comunicações de Plataforma Aberta (OPC) foi utilizado para a simulação do meio de comunicação.

Em (HAPSARI *et al.*, 2013) é proposto um método de planejamento de alocação para Veículos Elétricos (EV) em uma MR baseada em multiagentes. O método proposto aloca EV no fornecimento de energia às cargas prioritárias exigentes no âmbito de um país em caso de desastres que afetem significativamente a geração de energia, tais como terremotos, maremotos ou outros tipos de eventos catastróficos de vulto.

Segundo (RAJU *et al.*, 2017), o MAS aumenta a eficiência funcional e, assim, maximiza a produção de energia da MR solar e reduz o custo operacional ao mínimo. Assim, o MAS na MR leva à otimização dos recursos de capital e ambientais.

1.1.4 Cossimulação

As MRs surgem como uma alternativa interessante para o alcance de fontes de energia mais sustentáveis. Nesse contexto, a cossimulação se destaca como uma ferramenta poderosa para projetar, testar e otimizar sistemas complexos de energia. A cossimulação envolve a integração de várias ferramentas de simulação para modelar e simular diferentes aspectos de um sistema, enquanto estabelece uma estrutura para o CPES. No entanto, adotar a cossimulação é uma tarefa difícil e complexa, pois requer uma estrutura de comunicação eficiente para acoplar diferentes simuladores e modelar a troca adequada de informações entre os subsistemas (NGUYEN YVON BESANGER; NGUYEN, 2017) (RAFIQUE; KHALID; MUYEEN, 2020). Em (MOHSENI-BONAB *et al.*, 2020) é realizada uma revisão bibliográfica com base em técnicas de cossimulação aplicadas a sistemas integrados de Transmissão e Distribuição (TeD), cuja contribuição principal gira em torno de dois estudos: no primeiro, um algoritmo de otimização é aplicado às variáveis de decisão do lado da distribuição para aumento da margem de carga, bem como redução de perdas incorporando cossimulação de TeD, que demonstra que o módulo de otimização pode melhorar os índices de margem de carga e redução de perdas quando se calcula esses índices pela abordagem integrada de TeD; no segundo, a mesma abordagem integrada de TeD é aplicada para análise de penetração de tecnologia no lado da distribuição, que utiliza uma abordagem baseada em cenários para análise de penetração, considerando uma rede integrada de TeD.

As Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) (KAZICKOVÁ; BUHNOVA,

2016) têm um forte impacto na arquitetura do sistema e estão transformando a grade clássica em um CPES (ANDERSSON, 2018). Aliado à adoção de MAS para integração de agentes inteligentes em ambientes MR (SINGH; SHARMA, 2011), sistemas como JADE (ALSEYAT, 2019) (BELLIFEMINE; GREENWOOD, 2004) simplificam a implementação de sistema multiagente. Sistemas como JADE podem ser totalmente implementados em linguagem Java, o que pode ser, em algumas MR pequenas e médias, um problema (WANG *et al.*, 2013). Outros sistemas multiagentes incluem Fundação para Agentes Físicos Inteligentes-Sistemas Abertos (FIPA-OS) (COMMUNITY, 2023), ZEUS (BT Intelligent Agent Research, 2023), JACK (AOS Group, 2023), (AGLET COMMUNITY, 2023) e outros (NGUYEN T T DANG; BUDINSKA, 2002).

De acordo com a literatura, o uso de plataformas para cossimulação traz grande flexibilidade para o projeto de sistemas, fornecendo ferramentas poderosas para prever possíveis problemas relacionados a sistemas físicos. Em (ATEF; BARAKA, 1999), os autores implementam um backplane que fornece meios de comunicação entre diferentes simuladores (solucionadores). O backplane é responsável por coordenar a atividade dos solucionadores e direcionar cada mensagem de um solucionador para os outros solucionadores a que se destina. Em (C SHUM *et al.*, 2018), os autores apresentam uma integração de cossimulação de simuladores de execução direta para fornecer suporte dedicado para software de smart grid distribuído. Neste trabalho, os autores usam uma plataforma multiagente JADE integrada com Projeto Assistido por Computador de Sistemas de Energia (PSCAD) e Simulador de Rede em Nível de Pacote (OPNET) usando infraestrutura de tempo de execução de cossimulação padronizada. Em (LE T L NGUYEN; HOANG, 2020), os autores propõem uma plataforma geral baseada em cossimulação para validar algoritmos distribuídos com integração de CPES, usando o framework MOSAIK como o principal componente mestre para desenvolver um simulador, um sistema de agentes, bem como um banco de dados e uma interface de visualização. Em (KAZMI A LATIF; PALENSKY; GAWLIK, 2016) uma cossimulação *test-bed* (acoplando vários simuladores para executar uma única simulação de sistema) é desenvolvida para avaliar a interdependência de sistemas cibernéticos e físicos em uma solução de smart grid. Segundo (C SHUM *et al.*, 2014), a cossimulação é o estudo de problemas em diferentes domínios, permitindo a reutilização de ativos de simulação existentes, o que reduz o tempo de desenvolvimento. Em um ambiente de cossimulação, o modelo de um sistema maior é dividido em vários subconjuntos, cada um modelado por um simulador dedicado. Durante o tempo de execução da simulação, as mensagens são trocadas entre os simuladores para refletir suas inter-relações. Em seu trabalho, (RANA *et al.*, 2022) investigam diversas abordagens de modelagem para Comunidades de Energia Locais (CELS), incluindo uma arquitetura de camada de controle distribuído. Nessa estrutura, controladores primários gerenciam a operação localizada de componentes individuais, enquanto controladores secundários coordenam o fluxo de energia em nível sistêmico. A estrutura distribuída proposta emprega comunicação baseada em

agentes, na qual cada agente interage apenas com seus vizinhos diretos.

Em (AZEROUAL *et al.*, 2020) é proposto um sistema multiagente para controlar e gerenciar o sistema de distribuição de MR, um Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS). As estratégias de gestão de energia são introduzidas de forma autônoma e implementam recursos de *smart grids* usando a plataforma MACSimJX. Posteriormente, uma estratégia de controle coordenado baseada em sistema multiagente para cargas distribuídas é desenvolvida para a microrrede em modo de ilhamento. A abordagem avançada é desenvolvida sobre uma plataforma de cossimulação para uma microrrede híbrida, modelada em *MATLAB/Simulink*, e gerenciada pelas ações de um MAS implementado em JADE. MACSimJX é uma interface que permite que modelos de sistemas criados em *Simulink* troquem dados com um sistema multiagente criado em JADE.

1.1.5 Sumário dos trabalhos da literatura comentados

Os autores mencionados estudaram Sistema Multiagentes (MAS), software de simuladores de potência, co-simuladores e simuladores de comunicação, conforme resumido na Tabela 1.1. Tais recursos de experimentação são comumente referidos como simulações *in-the-loop*, que referem-se à integração de componentes reais (hardware/software) com modelos de simulação programados, criando um ambiente híbrido de teste e validação. Simulações *in-the-loop* são abordadas na Subseção 1.1.6.

Tabela 1.1 – Sumário dos trabalhos da literatura comentados.

Referência	Sumário	Multiagente	Sistema Físico / Simulador	Redes de Comunicação
(SHAYANFAR; MALEK, 2015)	Os autores propõe o controle cooperativo e hierárquico de uma MR	Não utilizado	MATLAB	Links diretos
(WANG <i>et al.</i> , 2021)	Os autores propõe uma estrutura de negociação de energia ponto a ponto para uma célula de rede CC	TESP	TESP	TESP
(DIMEAS, 2005)	São apresentadas as capacidades oferecidas pela tecnologia de sistemas multiagentes na operação de uma MR	JADE	NTUA Lab	OPC
(HAPSARI <i>et al.</i> , 2013)	Os autores propõe um MAS que opera a carga de EVs em caso de desastres naturais	JADE	NTUA Lab	OPC
(RAJU <i>et al.</i> , 2017)	É proposto um sistema multiagente para utilização distribuída de energia em MR solar, visando o gerenciamento robusto da rede.	JADE	Não utilizado	Link direto
(ATEF; BARAKA, 1999)	Os autores implementam um <i>backplane</i> que fornece meios de comunicação entre diferentes simuladores (solucionadores)	<i>Backplane</i>	VHDL-AMS	<i>Fast-Ethernet</i>
(C SHUM <i>et al.</i> , 2018)	É apresentada uma integração de cossimulação de simuladores de execução direta em suporte para smart grid distribuído	JADE	PSCAD	OPNET
(AUNG <i>et al.</i> , 2010)	Os autores propõe um sistema de controle baseado em agentes para o controle e gerenciamento de uma MR	JADE	RTDS	TCP/IP
(KAZMI A LATIF; PALENSKY; GAWLIK, 2016)	Os autores desenvolvem uma plataforma de cossimulação para avaliar a interdependência de sistemas cibernéticos e físicos em uma solução de smart grid.	JADE	DigSilent/ PowerFactory	OMNET++ e INET
(AZEROUAL <i>et al.</i> , 2020)	Os autores desenvolvem um EMS para manter o equilíbrio de potência na MR	JADE	MATLAB/ Simulink	MACSimJX
(LE T L NGUYEN; HOANG, 2020)	Uma plataforma genérica de co-simulação para validar algoritmos distribuídos com integração ciberfísica	Sistema Cibernético	PyPower	Sistema Cibernético
(RANA <i>et al.</i> , 2022)	Três modelos de CEL com mercados comunitários, destacando o controle distribuído	JADE	DigSilent	OMNET++
(C SHUM <i>et al.</i> , 2014)	Os autores propuseram uma estrutura baseada no padrão HLA	JADE	PSCAD	OPNET
Esta tese	Um sistema de controle distribuído testado em uma estrutura de co-simulação, mantendo taxas de atualização diversas no MAS	Python	RSCAD/ PSIM/ PLECS	NS3

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

1.1.6 Simulações *in-the-loop*

Simulações *in-the-loop* auxiliam sobremaneira na concepção de sistemas complexos no sentido de habilitar cenários de teste realistas e que reduzem riscos previamente à sua implementação física.

O conceito *Power Hardware in the Loop* (PHIL) é uma combinação de simulação computacional de parte do sistema, conhecida como Resto do Sistema (ROS), em tempo real, e o controle e a medição do hardware em teste conectado a essa simulação em tempo real. PHIL é um método seguro de redução de riscos extremamente aplicável (a possibilidade de um componente, sistema ou controle não funcionar como esperado quando integrado ao mundo real, devido a modelos de software incompletos ou simplificados), pois proporciona um ambiente mais realista do que a simulação de software isoladamente (EDRINGTON *et al.*, 2015).

A simulação *Controller Hardware-in-the-loop* (CHIL) é uma metodologia poderosa para testar sistemas de controle de eletrônica de potência. Esta cria um ambiente de teste dinâmico onde o controlador real interage com uma simulação de alta fidelidade e em tempo real da planta, permitindo que engenheiros testem cenários que seriam muito caros ou perigosos para recriar em um laboratório físico. Ao reduzir custos, melhorar a segurança, aumentar a cobertura dos testes e acelerar o desenvolvimento de sistemas complexos. Tal simulação está impulsionando a inovação em setores como automotivo, aeroespacial, eletrônica de potência, acionamentos industriais, conversores conectados à rede e sistemas de energia (OSORIO, 2024).

A simulação Hardware-in-the-loop (HIL) é um tipo de simulação em tempo real que provê um ambiente seguro cujo funcionamento se assemelha ao sistema físico e proporciona meios para testar determinado sistema. A simulação HIL quando aplicada a um sistema de controle mostra como o controlador em teste responde em tempo real a estímulos virtuais realistas. A técnica HIL possibilita a validação do modelo do sistema físico, planta, estimado matematicamente (RWEGARSIRA *et al.*, 2018).

A simulação Software-in-the-loop (SIL) é totalmente executada em um ambiente computacional. É um método de teste que valida aplicações previamente à sua implementação física no qual o código-fonte gerado que representa a aplicação real é compilado e executado em um computador (FARUQUE *et al.*, 2015).

1.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E CONTRIBUIÇÕES

O panorama energético contemporâneo necessita de abordagens sinérgicas que combinem o poder de várias tecnologias. A cossimulação, técnica que mescla diferentes plataformas de simulação, surge como uma poderosa ferramenta para analisar interações complexas entre componentes de sistemas eletrônicos de potência. Esta tese investiga

Tabela 1.2 – Comparativo entre as técnicas *In-the-loop*.

Técnica	Controlador	Sistema Físico	Sistema Simulado
PHIL	Físico	Pelo menos um equipamento de potência	Demais elementos
CHIL	Físico	Não há	Demais elementos
HIL	Geralmente físico	Não há	Demais elementos
SIL	Simulado	Não há	Demais elementos

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

as complexidades da cossimulação como ferramenta para analisar conversores de energia e suas interações em redes elétricas, permitindo avaliação antecipada previamente à implementação de sistemas reais.

Além dos pontos mencionados, esta tese investiga o domínio dos sistemas multiagentes, que apresentam uma notável promessa na otimização da operação cooperativa e orquestrada, assim como o controle hierárquico de múltiplos sistemas eletrônicos de potência, melhorando a eficiência a estabilidade geral e gerenciabilidade do sistema. Ao promover a tomada de decisão descentralizada e a comunicação inteligente entre os componentes, os sistemas multiagentes têm o potencial de aumentar a resiliência, flexibilidade e adaptabilidade do sistema.

1.2.1 Identificação do problema

Considerando o levantamento bibliográfico apresentado na área, esta tese procura mostrar o uso de cossimulação aliada aos simuladores PSIM, PLECS e RTDS comunicando-se via *socket* sobre TCP / IP de forma assíncrona com um sistema multiagente leve, desenvolvido especificamente para aplicação ao presente trabalho. Tal abordagem topológica demanda comunicação entre os elementos do sistema, sendo que no levantamento bibliográfico realizado, percebeu-se a carência de trabalhos que explorem deficiências do meio de comunicação e sua respectiva interferência na operação do sistema. Desta forma, a comunicação configura o principal foco de investigação neste trabalho.

Sob outra perspectiva, observa-se na literatura a ampla utilização do sistema JADE (BELLIFEMINE; GREENWOOD, 2004), que emprega a linguagem de programação de alto nível Java. Nesse contexto, assume-se que os elementos participantes da Microrrede (MR), frequentemente equipados com microcontroladores de baixa capacidade computacional, sejam capazes de suportar tal linguagem, o que implica um aumento significativo do peso computacional imposto ao sistema.

A arquitetura descentralizada, por vezes adotada em Microredes (MRs) (LIU *et al.*, 2021), exige que todos os elementos tenham conhecimento das informações dos demais componentes da rede, o que resulta em uma maior demanda por tráfego de dados. Em instalações de MRs remotas, nas quais sistemas de comunicação precários podem estar

presentes, essa característica representa, indubitavelmente, uma limitação relevante.

1.2.2 Contribuições

Esta tese busca contribuir com uma abordagem leve e de baixa complexidade para comunicação e cossimulação do sistema proposto. Diferentes ferramentas de simulação são integradas de forma a fornecer uma análise abrangente do desempenho do sistema.

Percebe-se a lacuna na literatura referente a atualização da taxa de atualização do MAS pelos seus agentes subordinados no sentido de preservar a estabilidade do sistema. Os tempos de resposta entre seus diferentes componentes, bem como a taxa efetiva de transmissão de dados no meio de comunicação, podem exercer influência direta e até crítica sobre o desempenho global. Quando esses fatores não são devidamente tratados, o sistema tende a apresentar atrasos, sobrecarga de processamento ou até instabilidade em situações de maior complexidade. Nesse contexto, esta tese dedica-se a:

- simular a arquitetura proposta, dotada de um Sistema Multiagentes (MAS);
- integrar os conversores diversos ao MAS por meio de protocolo de comunicação;
- arquitetar um ambiente de cossimulação heterogêneo, composto de simuladores de diferentes fontes;
- investigar em profundidade interferências ao ambiente de cossimulação devido a atrasos na rede de comunicação, analisando como eles se manifestam e em que medida afetam a interação entre os componentes do sistema;
- propor um algorítimo adaptativo que não apenas otimize a comunicação, mas que também aumente a robustez do sistema, mitigando potenciais desvantagens e assegurando maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Em suma, esta tese utiliza sistemas eletrônicos, com foco no controle hierárquico dos conversores de energia em um contexto de fontes distribuídas alocadas em MR. A comunicação entre os elementos da MR representa um elo fundamental neste contexto, a qual é estudada no âmbito desta tese.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho são descritos nesta Seção.

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver uma estratégia de controle hierárquico voltada ao gerenciamento ativo da tensão contínua em uma MR CC, assegurando estabilidade operacional e maior eficiência

no fluxo de energia. O objetivo de desenvolvimento da tese consiste em realizar uma cossimulação integrando diferentes ferramentas — MAS, RTDS, PLECS e PSIM — com o objetivo de validar o modelo teórico de controle de uma MR CC conectada ao SEP, de forma a verificar sua viabilidade prática e futura implementação experimental em bancada. Ao longo do desenvolvimento serão simulados conversores de potência com capacidade de comunicação, os quais, aliados ao sistema desenvolvido em Python, formam um Sistema Multiagentes (MAS) responsável por coordenar as ações de controle. A estratégia central de controle implica no gerenciamento do Estado de Carga (SoC) das baterias do sistema de armazenamento, que desempenham papel fundamental na estabilidade da MR, garantindo maior confiabilidade, flexibilidade e robustez ao ambiente de cossimulação.

1.3.2 Objetivos específicos

- i. Modelar os algoritmos de controle individuais e as arquiteturas dos conversores integrantes do sistema, assim como, o algoritmo de controle do SoC;
- ii. Desenvolver o arcabouço de comunicação necessário para a fluência dos sinais de controle e supervisão entre os elementos integrantes do sistema;
- iii. Desenvolver a estrutura de cossimulação envolvendo os simuladores RTDS, PLECS e PSIM integrados aos respectivos módulos de comunicação individuais escritos em linguagem de programação *C*;
- iv. Explorar aspectos referentes à comunicação entre os agentes do sistema investigando implicações referentes ao retardo na fluidez de informações;
- v. Propor uma metodologia para adaptar a taxa de envio de atualizações dos agentes ao MAS quando da ocorrência de retardo no meio de comunicação;
- v. Obter resultados diversos derivados de eventos controlados gerados no ambiente de cossimulação da MR.

1.4 PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Como resultado das pesquisas realizadas durante o período de doutoramento (2021 - 2025), foram submetidos para publicação trabalhos em conferências nacionais assim como em periódicos internacionais:

1.4.1 Artigos relacionados ao trabalho

- Artigo publicado em periódico:

Fernandes, Daniel Leocadio and Leopoldino, André Luiz Marques and Santiago, Juan de and Verginis, Christos and Ferreira, Andre Augusto and Oliveira, Janaina

Gonçalves de, [Distributed Control on a Multi-Agent Environment Co-Simulation for DC Bus Voltage Control.](#), *EPSR*, Jul-2024 (FERNANDES *et al.*, 2024b).

- Artigo aprovado para publicação em periódico:

Fernandes, Daniel Leocadio and Soares, Guilherme Márcio and Oliveira, Janaína Gonçalves, [Co-Simulation Microgrid with Distributed Control Based on a Multi-Agent System and Communication with Adaptive Update Rate.](#), *IET Smart Grid*, Jul-2025.

- Artigo publicado em congresso:

Leopoldino, André Luiz Marques and Fernandes, Daniel Leocadio and José Antenor Pomilio and Ferreira, Andre Augusto and Oliveira, Janaina Gonçalves de, [Off-the-shelf low-cost wireless communication structure applied to microgrids power converters.](#) *COBEP SPEC 2023* (LEOPOLDINO *et al.*, 2023).

Fernandes, Daniel Leocadio and Ferreira, Andre Augusto and Silva, Leandro Rodrigues Manso and Oliveira, Janaina Goncalves and de, [Refined update frequency selection in multi-agent systems](#), *CBA 2024* (FERNANDES *et al.*, 2024a).

Fernandes, Daniel Leocadio and Oliveira, Janaina Goncalves and de, [Cossimulação em Sistema Multiagente com Controle Distribuído para Regulação de Tensão em Barramento CC em Tempo Real](#), *XI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2025)*.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do presente capítulo introdutório, o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica essencial para a compreensão dos resultados obtidos na tese, tais como: detalhes da regulação de tensão no âmbito da MR, do MAS, da taxa de atualização adaptativa e o controle hierárquico para o gerenciamento da MR e da cossimulação adotada no âmbito desta tese. O Capítulo 3 aborda a metodologia para o projeto do sistema multiagente no cenário de cossimulação, a modelagem e validação da MR usada nos resultados nesta tese, a modelagem e a implementação de técnicas de controle usadas para manter o nível de tensão no barramento CC dentro dos limites projetados e a SoC do sistema acumulador de energia. No Capítulo 4 é apresentada a estrutura das simulações com as respectivas curvas de demanda de carga de consumidores, demanda do sistema acumulador de energia e provimento de energia pelo Painel Fotovoltaico (PV). Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

No presente capítulo são apresentados os conceitos fundamentais necessários ao desenvolvimento deste trabalho, incluindo uma breve descrição do Sistema Multiagentes (MAS), as estratégias adotadas na concepção do ambiente de cossimulação, o controle hierárquico e o algoritmo adaptativo responsável pelo ajuste do Tempo de Atualização (TA) dos agentes no âmbito do MAS.

Nesse contexto, a arquitetura de interesse, que integra a MR, o MAS, os conversores de potência, os métodos de controle e o ambiente de cossimulação, é amplamente discutida na literatura e serve de base para o desenvolvimento dos resultados almejados de forma clara e estruturada. Trata-se de uma arquitetura de natureza centralizada, na qual todos os agentes se comunicam por intermédio do MAS, responsável por coletar as informações relevantes do sistema e tomar decisões com base em seus algoritmos internos.

Além disso, esta tese propõe a integração de estratégias voltadas à mitigação de limitações inerentes ao meio de comunicação, contribuindo para o aumento da robustez e da confiabilidade do sistema em estudo.

As seções subsequentes auxiliam na compreensão global da metodologia aqui proposta explorando fundamentos teóricos sobre a arquitetura de interesse, destacando-se simuladores adotados, os conversores de potência simulados, o MAS, a cossimulação e o controle hierárquico. A Seção 2.1 explora as diferentes configurações de uma MR, sua classificação, suas características principais, modos de operação e outras observações importantes para o desenvolvimento desta tese. A Seção 2.2 aborda características relevantes de um MAS, traz conceitos importantes, tais como Programação Orientada a Agentes (AOP), agentes e arquitetura. Ilustra aplicações típicas, por exemplo, em sistemas elétricos de potência e seu posicionamento em uma arquitetura hierarquizada. Métodos de controle utilizados em MRs são discutidos na Seção 2.3. Tal discussão inclui o método hierárquico por se adequar bem a uma MR uma vez que caracteriza patamares distintos de controle, ao nível local - conversores - e centralizado - MAS. A Seção 2.4 apresenta os conceitos fundamentais relacionados ao ambiente de cossimulação. São discutidos os princípios que sustentam essa técnica, bem como os simuladores de interesse utilizados no contexto deste trabalho. Além disso, abordam-se aspectos de integração, considerados essenciais para o adequado funcionamento e desempenho do ambiente de cossimulação.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO CONTEXTO DA ARQUITETURA DE INTERESSE

Os benefícios associados à Geração Distribuída (GD) tornam necessária uma abordagem sistêmica de planejamento e operação, na qual geração e cargas passam a ser tratadas como partes integrantes de um mesmo subsistema energético. Nesse

contexto, emerge o conceito de Microrrede (MR), que constitui a base da arquitetura de interesse adotada neste trabalho, permitindo a integração coordenada de fontes de energia distribuídas, sistemas de armazenamento e cargas locais. Com difusão da utilização das MRs, há o incremento de sistemas computadorizados, os quais facilitam a difusão de sistemas integrados por meios de comunicação e promovem a centralização da inteligência, ou seja, do controle da GD.

Sob a perspectiva de conexão ao sistema elétrico de potência principal (SEP), as microrredes podem operar a partir de diferentes estratégias de controle. O modo formador de rede (*grid-forming*) é responsável por estabelecer as referências de tensão e frequência da MR, enquanto o modo seguidor de rede (*grid-following*) ajusta sua operação às referências impostas, mantendo a sincronização. Já o condicionador de rede (*grid-conditioning*) corresponde a um conceito mais abrangente, englobando tecnologias destinadas ao monitoramento e à adequação da qualidade da energia, podendo incorporar funções típicas dos modos formador e seguidor (JUNIOR, 2020).

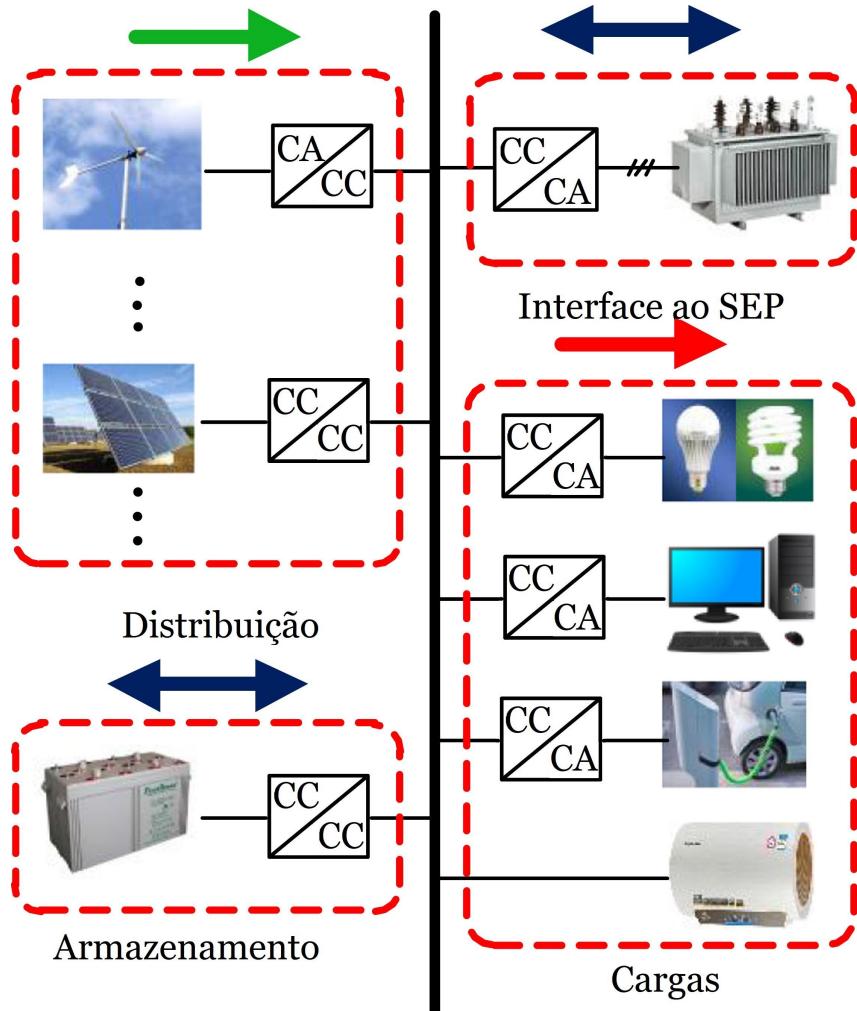
Essa arquitetura favorece a instalação de unidades geradoras próximas às cargas, possibilitando o aproveitamento mais eficiente da energia produzida e, quando aplicável, do calor residual, sem a necessidade de sistemas complexos de distribuição. Além disso, a GD tende a apresentar maior confiabilidade em relação à rede convencional, especialmente quando composta por unidades modulares de menor porte (kW), que permitem redundância operacional e uso eficiente da energia no ponto de consumo. A Figura 2.4 ilustra uma microrrede conceitual associada à arquitetura considerada (LASSETER; PAIGI, 2004).

2.1.1 Componentes de uma microrrede

Os Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) são componentes típicos de uma MR, tais como painéis fotovoltaicos, sistemas de armazenamento de energia, cargas, sistema de controle central, geradores eólicos, entre outros.

- Painéis fotovoltaicos: Um painel solar é um dispositivo que converte a luz solar diretamente em eletricidade, este utiliza a energia dos fótons e a transforma em corrente elétrica. Tal processo é possível graças ao efeito fotovoltaico, que é o princípio científico fundamental por trás de seu funcionamento. A energia gerada por um módulo fotovoltaico depende de vários parâmetros climáticos, como radiação solar, temperatura, umidade, velocidade do vento, terreno, etc. O tipo de tecnologia fotovoltaica, a inclinação e a instalação também afetam a eficiência geral do sistema fotovoltaico. A radiação solar e a temperatura são consideradas os principais parâmetros que mais prejudicam a eficiência, pois variam devido às diversas condições climáticas e topográficas, influenciando assim a energia de saída e a confiabilidade dos módulos fotovoltaicos (MALIK; CHANDEL; GUPTA, 2025).

Figura 2.4 – Microrrede CC.



Fonte: Adaptado de (SHUAI *et al.*, 2018).

- Geradores eólicos: A energia eólica é utilizada para geração de eletricidade por meio da transformação de energia cinética em movimento mecânico rotacional (MENDOZA-VIZCAINO *et al.*, 2016). A geração eólica fornece energia CA que ao se conectar a uma MR, deve-se adequar sua forma à utilizada pelo núcleo da MR, seja CA ou CC. No que tange a MR CC, um conversor de potência é empregado na retificação e adequação da energia gerada em magnitude e caso a MR seja CA, um conversor é igualmente necessário de forma a adequar a energia provida em magnitude e frequência;
- Armazenamento de energia: As fontes de energia renováveis estão sujeitas a oscilações de natureza climática — como ocorre nas fontes solar e eólica —, de modo que seu fornecimento de energia depende diretamente das variações em suas fontes primárias. No caso da energia solar, há geração apenas durante o período diurno, enquanto à noite a produção é interrompida. Já a geração eólica depende da presença e da constância dos ventos. O sistema de armazenamento de energia, por sua vez,

desempenha um papel fundamental na estabilidade da MR, atuando como um elemento compensador - esse armazena energia nos momentos de abundância e a disponibiliza quando há instabilidade ou redução na geração das fontes renováveis;

- Interface ao SEP: Esta interface permite à MR operar nos modos conectado ou ilhado. Estando a MR conectada ao SEP, é possível exportar ou importar energia deste sistema conforme o balanço interno de carga na MR;
- Outros elementos: A MR ainda prevê a conexão a outros conversores de potência com diferentes funções: fornecimento de energia para redes prioritárias e não-prioritárias - nas prioritárias conecta-se circuitos de alimentação essenciais, já nas não-prioritárias, circuitos destinados a recarga de veículos, por exemplo, não-prioritários.

2.2 SISTEMA MULTIAGENTE

A AOP é um paradigma de software que traz conceitos das teorias de inteligência artificial para o domínio principal dos sistemas distribuídos. A AOP modela essencialmente uma aplicação como uma coleção de componentes chamados agentes que são caracterizados, entre outras coisas, por autonomia, proatividade e capacidade de comunicação. Sendo autônomos, podem realizar de forma independente tarefas complexas e muitas vezes de longo prazo. Sendo proativos, eles podem tomar a iniciativa de realizar uma determinada tarefa mesmo sem um estímulo explícito do usuário. Sendo comunicativos, eles podem interagir com outras entidades para ajudar a alcançar os seus próprios objetivos e os dos outros. O modelo arquitetural de uma aplicação orientada a agentes é intrinsecamente ponto a ponto, pois qualquer agente é capaz de iniciar a comunicação com qualquer outro agente ou ser objeto de uma comunicação recebida a qualquer momento. Há aplicações que utilizam comunicação *multicast* (RAHMAN *et al.*, 2015), em que um agente transmite uma mensagem padrão, unitariamente, para os demais. De outra forma, em sistemas multiagentes encontra-se situações em que mensagens idênticas são enviadas em *broadcast* a todos os agentes (ITO *et al.*, 2020). Os sistemas multiagentes estão sendo usados em uma variedade cada vez maior de aplicações, desde sistemas comparativamente pequenos para assistência pessoal até sistemas abertos, complexos e de missão crítica para aplicações industriais. Exemplos de domínios industriais onde os sistemas multiagentes têm sido empregados com sucesso incluem controle de processos, diagnóstico de sistemas, fabricação, logística de transporte e gerenciamento de redes (BELLIFEMINE; GREENWOOD, 2004).

A AOP é adotada no presente trabalho no sentido de se prover um sistema abrangente no âmbito da MR capaz de orquestrar a comunicação entre os agentes integrantes da MR, o MAS. Este coordena a operação de todo o sistema e adere ao conceito de gerenciamento de redes. O MAS disponibiliza ao sistema supervisório dados obtidos por

meio da comunicação com os agentes sob seu domínio, com os quais tal sistema se torna capaz da execução de tarefas destinadas a gerência:

- falhas nos elementos do sistema, incluindo dispositivos eletrônicos, rede de comunicação, sensores diversos e outros elementos monitoráveis;
- desempenho da rede elétrica *on-line* e *off-line*;
- acesso físico, em que operadores são monitorados enquanto adentram instalações físicas da rede;
- outras funcionalidades indiretamente ligadas ao funcionamento da rede elétrica, tais como:
 - acesso lógico, em que o acesso de operadores ao sistema é gerenciado;
 - backup de dados históricos;
 - *hardware* de servidores, armazenamento de dados, refrigeração de *datacenters*, entre outras.

Sob a arquitetura de controle hierárquico, na qual o MAS ocupa as camadas superiores, a operação das MRs depende de uma rede de comunicação caracterizada por baixa latência e alta confiabilidade. Falhas nesse canal de comunicação podem, potencialmente, levar ao colapso de toda a MR. Entretanto, o controle primário autônomo distribuído é capaz de manter a estabilidade da tensão do barramento CC mesmo diante de uma falha total no meio de comunicação. Esse nível de controle concentra-se principalmente em dinâmicas de curta duração, atuando sobre o controle de corrente e tensão transitórias, bem como no compartilhamento instantâneo de potência entre conversores. Para atender às exigências de um tempo de resposta extremamente curto, o controle primário é implementado de forma integrada ao controle local de corrente e tensão, sendo fisicamente alocado nos conversores individuais. Essa característica constitui uma diferença fundamental entre a abordagem hierárquica e os métodos de controle convencionais, tais como controle *Droop* (SHUAI *et al.*, 2018).

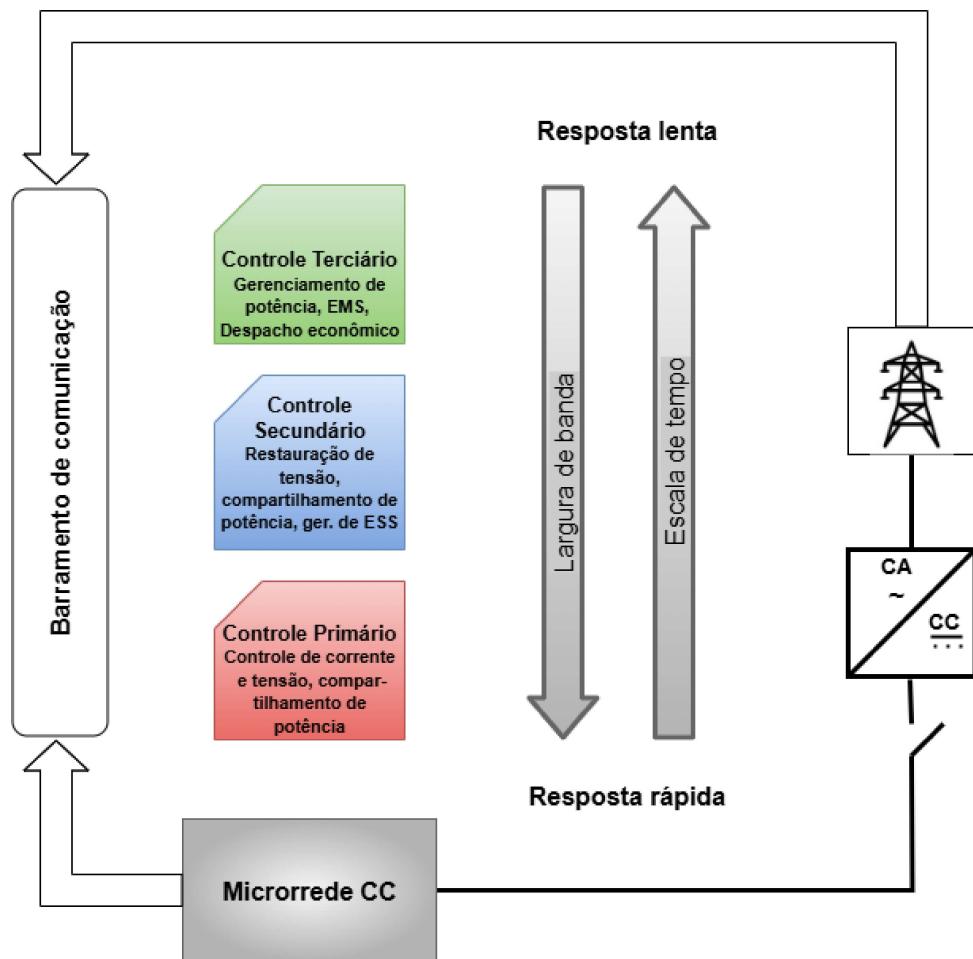
2.3 MÉTODOS DE CONTROLE EM MICRORREDES

As MRs são controladas de forma centralizada, descentralizada ou distribuída, em que o controle centralizado, como a nomenclatura indica, concentra as ações de controle em um ponto no sistema. O controle descentralizado, ou local, é baseado em estratégias de controle vinculadas aos conversores de potência localmente, e, por sua vez, o controle distribuído, compartilha as ações de controle em camadas possibilitando diferentes abordagens a cada camada (HASAN *et al.*, 2023).

2.3.1 Estrutura hierárquica

Uma estrutura de controle hierárquica é fundamentalmente empregada no sentido de se atingir objetivos de controle em uma MR CC, compreendendo três camadas: Controle Primário (CP), Controle Secundário (CS) e Controle Terciário (CT), conforme representado na Figura 2.5. A camada de CP normalmente incorpora loops internos de tensão e corrente em cascata junto com mecanismos de controle *Droop* (QASHQAIE *et al.*, 2025). Esses componentes desempenham um papel crucial na estabilização dos níveis de tensão e corrente e na facilitação da distribuição inicial de corrente e potência. A camada CS concentra-se principalmente na coordenação de regulamentações complementares de tensão e corrente e/ou compartilhamento de energia, ao mesmo tempo em que gerencia o equilíbrio do SoC para o Sistema de Armazenamento de Energia (ESS).

Figura 2.5 – Estrutura de controle hierárquica típica de uma microrrede CC.



Fonte: Adaptado de (MORADI; HEYDARI; ZAREI, 2023).

No topo da hierarquia, a camada de controle terciária envolve-se em funções de longo prazo, tais como otimização, gestão e estratégias de operação econômica. Tradicionalmente, as funções de controle CS e CT são centralizadas no Controlador Central da Microrrede

(MGCC). Quando adequadamente projetada, essa estrutura de controle hierárquica pode fornecer com eficácia funcionalidades básicas e avançadas, garantindo desempenho ideal em vários cenários operacionais (MORADI; HEYDARI; ZAREI, 2023). Nota-se ao analisar a Figura 2.5, que as camadas inferiores trabalham em uma escala de tempo rápida, a qual diminui seguindo para camadas altas, onde a camada que trabalha em resposta mais lenta é a CT. Por outro lado, o consumo de dados no meio de comunicação aumenta à medida que cresce o volume de informações trafegadas, consequência das taxas mais elevadas de troca de dados nas camadas inferiores. Esse fenômeno se manifesta no sentido descendente da estrutura de controle hierárquica. Na Figura 2.5, nota-se uma linha sólida que indica o barramento de potência e uma linha vazada direcionada que representa o barramento físico de comunicação de dados.

Esta tese utiliza do conceito de controle hierárquico, em que os conversores de potência dispõe de controle local, o qual trabalha com dados recebidos do MAS como referência para determinada produção de saída do conversor. O controle local configura-se como CP, e o MAS posiciona-se no CS.

2.3.2 Controle do estado de carga

A estratégia adotada para manter a estabilidade do sistema é baseada no monitoramento do SoC do banco de baterias pela segunda camada de controle (GODFREY *et al.*, 2010), o MAS, uma vez que o sistema multiagente controla a injeção de corrente no barramento CC. A estratégia de controle do SoC no corrente trabalho baseia-se em um controlador Proporcional, Integral E Derivativo (PID) localizado no MAS, conforme descrito na Subseção 3.3.1.2. Outras estratégias de estabilidade podem ser encontradas na literatura, conforme explorado por (LIU *et al.*, 2023). O SoC de uma bateria pode ser descrito pelo método de contagem de Coulomb como segue (HUANG *et al.*, 2017):

$$SoC(\tau) = SoC(t_0) + \frac{\int_{t_0}^{t_0+\tau} \frac{V_{bus}}{R} e^{-\frac{\tau}{RC}} dx}{Q_{nominal}}, \quad (2.1)$$

$$Q_{nominal} = \frac{V_{bus}}{R} * \int_0^{\tau} e^{-\frac{\tau}{RC}} dx. \quad (2.2)$$

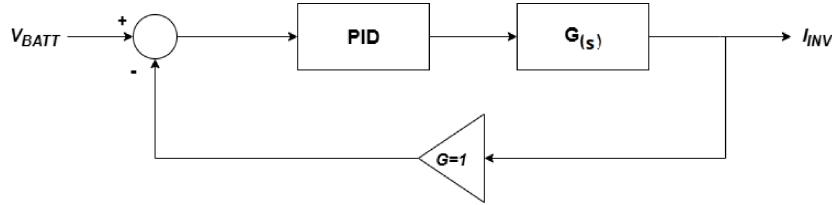
Por outro lado, a estratégia de controle do SoC no corrente trabalho baseia-se em um controlador PID localizado no MAS, conforme descrito na Subseção 3.3.1.2.

O controlador do SoC é situado na segunda camada de controle do sistema (GODFREY *et al.*, 2010) e é constituído por um controlador Proporcional, Integral E Derivativo (PID). A Figura 2.6 ilustra o controle do SoC onde

$$G(s) = \frac{V_{Bat}(s)}{I_{INV}(s)} \quad (2.3)$$

representa a primeira camada de controle do sistema, ou seja, o controle local, sendo que V_{Bat} é o nível de tensão da bateria e I_{INV} a referência de corrente considerada pelo

Figura 2.6 – Controle do Estado de Carga (SoC).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

controle do conversor retificador/inversor localizado na primeira camada de controle. A expressão que define o controlador PID é:

$$C(s) = k_P + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (2.4)$$

onde:

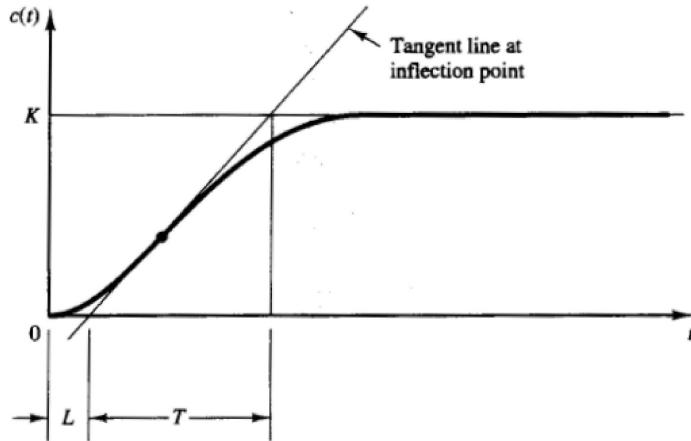
- K_P representa o ganho proporcional, e responde ao erro atual (K_P maior corresponde a resposta mais rápida, mas oferece risco de *overshoot*); Efeito: Reduz o erro em regime permanente, mas pode não eliminá-lo.
- O ganho integral (K_i ou I) atua na eliminação do erro em regime permanente integrando erros passados; Efeito: K_i muito alto causa oscilações; muito baixo retarda a convergência.
- O ganho derivativo (K_d ou D), atua no erro futuro com base em sua taxa de variação (efeito de amortecimento). Efeito: Reduz o *overshoot* e o tempo de estabilização, mas amplifica o ruído.

De forma contínua, o MAS recebe dados operacionais de seus agentes subordinados que são processados para se determinar a necessidade de ajuste na injeção de corrente no barramento CC. Tais ajustes impactam diretamente a tensão da bateria, de acordo com a dinâmica de operação da MR. A comunicação do MAS para o conversor retificador/inversor ocorre por meio do envio de comandos, que são recebidos e aplicados à entrada de referência de corrente do módulo de controle local do respectivo conversor (agente). Tal mecanismo assegura que as estratégias definidas no CS sejam corretamente traduzidas em ações no nível local, contribuindo para a estabilidade e o desempenho global do sistema.

Considerando que a função de transferência do sistema é desconhecida e que a resposta da planta apresenta comportamento lento, optou-se pela adoção de um método de sintonização do controlador que permitisse uma operação satisfatória do sistema. É importante destacar que a dinâmica da planta pode variar em função de parâmetros como o nível de tensão do barramento, a capacidade da carga e outras condições de operação. Assim, o método adotado, curva de reação de Ziegler-Nichols (OGATA, 1997), constitui uma estimativa simplificada, válida apenas para um ponto de operação específico.

O Método da curva de reação de Ziegler-Nichols é desenvolvido a partir da resposta ao degrau em malha aberta. Os ganhos P, I e D são determinados pelos parâmetros L e T, conforme identificação na Figura 2.7. A função de transferência destes sistemas pode ser

Figura 2.7 – Ponto de inflexão.



Fonte: (OGATA, 1997).

aproximada pela seguinte função de transferência transcendental de primeira ordem:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{ke^{-Ls}}{Ts + 1}. \quad (2.5)$$

Onde L, T e K são obtidos do gráfico ilustrado na Figura 2.7. L é o atraso da resposta.

$$\begin{aligned} K_p &= 1,2 \frac{T}{L} \\ T_i &= 2L \\ T_d &= 0,5L \end{aligned} \quad (2.6)$$

O método Relay (Åström–Hägglund) Auto-Tuning (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1984), como uma alternativa robusta, fornece uma estrutura sistemática para o ajuste de controladores PID. O método baseia-se na identificação de características-chave da resposta em frequência do sistema, incluindo o ganho máximo e o período crítico correspondente. Ao explorar essas características, tal método permite a obtenção de parâmetros de controle estáveis e reproduzíveis, tornando-o particularmente adequado para processos nos quais um modelo matemático preciso não está disponível ou é difícil de obter.

O funcionamento do método baseia-se na auto-oscilação (*Relay Feedback*). O método introduz intencionalmente uma oscilação sustentada no sistema em malha fechada, normalmente substituindo temporariamente o controlador por um elemento não-linear do tipo *relay* (um controlador *on-off* com histerese). Isso faz o sistema oscilar em sua frequência crítica.

A partir dessa oscilação, mede-se:

- Ganho crítico (K_u): O ganho do controlador proporcional que levaria o sistema ao limiar da instabilidade;
- Período Crítico (P_u): O período das oscilações sustentadas.

Cálculo dos parâmetros PID: Åström e Hägglund propuseram regras de sintonia (como uma evolução das clássicas regras de Ziegler-Nichols) que usam K_u e P_u para calcular os valores de K_p (ganho proporcional), T_i (tempo integral) e T_d (tempo derivativo). Por exemplo, para um controlador PID, uma regra comum é:

$$K_p = 0.6 \times K_u; \quad (2.7)$$

$$T_i = P_u/2; \quad (2.8)$$

$$T_d = P_u/8. \quad (2.9)$$

2.4 COSSIMULAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

Nos ambientes de pesquisa, a validação de conceitos para redes físicas parte tradicionalmente de simulações computacionais. No entanto, a complexidade inerente a uma rede real, que envolve fatores como latência de comunicação e limitações computacionais, torna a modelagem de um sistema elétrico no contexto de um Sistema de Energia Ciberfísica (CPES) um desafio significativo. Simuladores convencionais frequentemente não conseguem representar adequadamente a infraestrutura física da rede elétrica, os componentes de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), as decisões de múltiplos operadores e agentes de mercado.

Para superar essas limitações, os pesquisadores recorrem a cossimulações, uma abordagem que consiste em acoplar múltiplos simuladores por meio de uma interface de comunicação. Dessa forma, cada simulador pode representar uma dimensão distinta do sistema sob análise, permitindo a investigação de interações e dinâmicas complexas com um nível de detalhe e realismo consideravelmente superior (VOGT; MARTEN; BRAUN, 2018).

Conforme destacado por (SCHWEIGER *et al.*, 2019) em estudo com especialistas da área, a maioria dos simuladores empregados em cossimulações são baseados em conjuntos de equações diferenciais. Os especialistas relataram o uso de simuladores especializados em modelagem de redes, ambientes focados em controladores de software, elementos de hardware dedicados e módulos que integram informações de interfaces homem-máquina.

2.4.1 Arquitetura do ambiente de cossimulação

A arquitetura do ambiente de cossimulação consiste no acoplamento de duas ou mais ferramentas de simulação em um ambiente comum, no qual a troca de dados entre

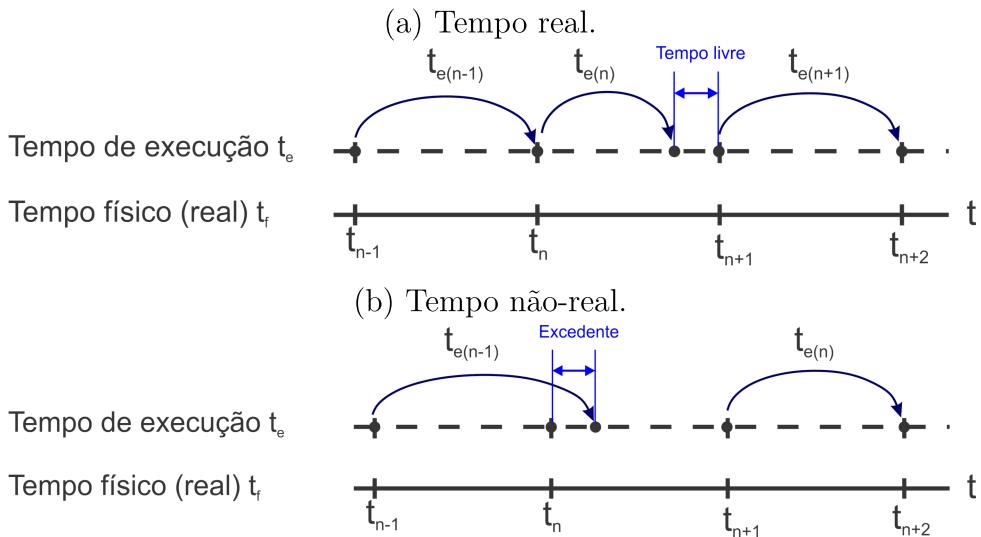
os subsistemas ocorre apenas em instantes discretos de comunicação. Entre dois pontos de comunicação consecutivos, cada subsistema é resolvido de forma independente por seu respectivo solucionador (simulador). O que leva à discussão sobre o intervalo de tempo discreto utilizado para avançar a solução do modelo ao longo do tempo, o passo de simulação.

Duas situações podem surgir dependendo do tempo requerido pela plataforma de simulação para completar o cálculo das saídas de estado para cada passo de tempo, conforme ilustrado na Figura 2.8:

1. Se o tempo de execução, T_e , para a simulação do sistema for menor ou igual ao passo da integração numérica, a simulação é considerada em tempo real, conforme é mostrado na Figura 2.8a;
2. Se T_e for maior que a duração de um ou mais intervalos de tempo, ocorrem excessos de execução, e a simulação passa a ser caracterizada como não em tempo real (offline), conforme ilustrado na Figura 2.8b.

Neste último caso, o passo de tempo pode ser aumentado ou o modelo do sistema pode ser simplificado para executá-lo em tempo real (PULOK; FARUQUE, 2015).

Figura 2.8 – Ilustração de simulação em tempo real e não-real.



Fonte: Adaptado de (PULOK; FARUQUE, 2015).

2.4.2 Ambientes computacionais utilizados

Um simulador é um software ou dispositivo destinado a imitar o comportamento de um sistema físico utilizando modelos matemáticos ou computacionais, dispensando a execução do próprio sistema físico. Simulações imitam fenômenos físicos, como a dinâmica

de correntes e tensões em um ambiente elétrico. Isso permite testar o comportamento do sistema de forma segura, eficiente e econômica, eliminando a necessidade de matérias-primas, equipamentos ou mão de obra em operações reais (KORKEALAAKSO *et al.*, 2007).

2.4.2.1 PSIM

O PSIM (POWER ELECTRONICS SOLUTION PROVIDER, 2023) é um software de simulação voltado para eletrônica de potência e controle de sistemas de energia, amplamente utilizado para análise rápida e precisa de conversores, máquinas elétricas e estratégias de controle.

O PSIM utiliza métodos numéricos otimizados para resolver circuitos chaveados, o que o torna especialmente eficiente em simulações de conversores de potência, inversores, retificadores e sistemas com elevada frequência de chaveamento. Seu ambiente de simulação é baseado em blocos, permitindo a construção de circuitos elétricos e de controle de forma intuitiva. Possui bibliotecas específicas para eletrônica de potência, controle digital, máquinas elétricas, sistemas de energia renovável, micro-redes e eletrificação veicular. Permite a implementação de controladores digitais integrados a circuitos analógicos de potência. E por fim, inclui o Simview, uma ferramenta gráfica para visualização e pós-processamento de sinais simulados (tensões, correntes, potências etc.).

2.4.2.2 PLECS

O PLECS (Plexim GmbH, 2023) é um software de simulação dedicado à modelagem e análise de sistemas elétricos e eletrônicos, especialmente circuitos de potência, permitindo a integração com ambientes em tempo real para o desenvolvimento e teste de estratégias de controle.

O PLECS emprega um solucionador numérico otimizado que trata eventos de comutação de forma contínua e estável, permitindo simulações rápidas mesmo em sistemas com alta frequência de chaveamento. Permite a modelagem conjunta de circuitos elétricos, controles, sistemas térmicos e mecânicos, possibilitando análises eletromecânicas completas. Inclui módulos para controle digital, análise de harmônicos, perdas em semicondutores e estimativa de eficiência.

2.4.2.3 RTDS

O RTDS (RTDS Technologies Inc., 2024) na versão utilizada no presente estudo, possui arquitetura de hardware conhecida popularmente como "A Família Rack". O hardware do RTDS nesta versão é organizado em *racks* (armários) modulares. Cada *rack* contém várias placas de processamento dedicadas:

- Placas de processamento (RPC): Cada RPC contém três processadores de sinais digitais (DSPs) independentes trabalhando em paralelo altamente especializados e personalizados, projetados especificamente para resolver as equações diferenciais dos sistemas de energia com extrema eficiência. Um *rack* padrão (por exemplo, um *Rack 3U*) contém um certo número de unidades de processamento (CPUs) de comunicação e várias placas RPC;
- Processador de Comunicação (CP / TPC): Gerencia a comunicação entre os *racks*, com os painéis de entrada/saída (I/O) e com os computadores de trabalho (workstations);
- Placas de Interface de I/O (GTDI, GTAO, etc.): Fornecem as conexões analógicas e digitais de alto desempenho para interfacear com equipamentos reais (proteções, controladores, conversores). As saídas analógicas (GTAO) convertem os sinais digitais calculados em tensões analógicas. As entradas digitais (GTDI) capturam os sinais de *trip* de relés, por exemplo.
- Cage: A estrutura física que abriga as placas. Os sistemas maiores têm múltiplos *racks* interconectados por fibras ópticas para simular redes grandes.

RSCAD: É o ambiente gráfico de captura de diagramas unifilares no qual o usuário do RTDS constrói a rede elétrica, arrastando e conectando componentes como barras, linhas, transformadores, geradores, cargas, etc. O RSCAD gera o *netlist* (lista de conexões) do sistema.

Runtime: O software que compila o *netlist* criado no RSCAD, distribui o cálculo da simulação entre os diversos processadores (PEs) nos racks e inicia/controle a simulação em tempo real.

O RTDS resolve as equações do sistema elétrico com um passo de simulação em tempo fixo e garante que o cálculo de cada passo seja concluído dentro do tempo físico (ex: $50 \mu s$ para eletrônica de potência, $2 - 50 \mu s$ para sistemas *electromagnetic transient* (EMT)). Isso permite conectar dispositivos reais (relés de proteção, controladores de inversores) ao simulador para testes de integração e validação de forma segura e repetitiva.

2.4.2.4 Integração dos simuladores

No âmbito desta tese, busca-se avaliar a operação integrada dos simuladores mencionados por meio de uma arquitetura de cossimulação. Para que essa integração seja viável, torna-se necessário compatibilizar os passos de simulação entre os diferentes simuladores, de modo a garantir uma operação consistente e confiável em um contexto global. Nesse sentido, optou-se pela utilização de modelos médios na simulação individual dos conversores. Essa escolha, além de viabilizar a compatibilidade entre os passos de

simulação do sistema como um todo, contribui para reduzir o esforço computacional, melhorar a estabilidade numérica e possibilitar a execução de longas sessões de simulação. Tais sessões são fundamentais para reproduzir com fidelidade a dinâmica da MR e evidenciar os eventos de interesse, permitindo assim uma análise mais abrangente e precisa do comportamento do sistema.

2.4.3 Considerações sobre Robustez e Estabilidade em ambientes de cossimulação

A comunicação em um ambiente de cossimulação exerce fundamental importância uma vez que seus elementos comunicam-se, entre si e com o MAS, de forma a trocar informações de leituras e comandos. Caso a rede de comunicação esteja sujeita à ocorrência de distúrbios que eventualmente impactem a boa fluência de dados, isto potencialmente trará reflexos na operação do sistema. Atrasos na comunicação, por exemplo, podem advir de más condições no meio de comunicação.

De acordo com o modelo OSI (DAY; ZIMMERMANN, 1983), a comunicação entre os elementos do arcabouço de cossimulação ocorre na camada de aplicação. Nesse nível, as adversidades provenientes das camadas inferiores manifestam-se como atrasos na propagação de dados entre os agentes e o MAS. Conforme observado em (DANNER; MEER, 2022), a literatura frequentemente negligencia o impacto da comunicação sobre as estratégias de controle ou adota suposições excessivamente rígidas a respeito da rede de comunicação. Há na literatura simuladores de comunicação, a exemplo do NS-3 (ns-3 Consortium, 2023), o qual é simplificado e baseado em filas. Este simulador oferece condições de validar o impacto do atraso de mensagens e da topologia de comunicação em um ambiente de cossimulação.

O *jitter* na camada de aplicação (DAY; ZIMMERMANN, 1983) consiste na variação dos tempos de chegada dos pacotes de dados na aplicação, causada por fatores que não se limitam à latência dos níveis inferiores da rede. Este fenômeno surge de elementos como atrasos internos de processamento da aplicação, flutuações na execução de tarefas em ambientes multiprocessados ou mesmo de técnicas de roteamento específicas da própria camada de aplicação. Para mitigar seus efeitos, podem ser empregadas estratégias como a utilização de *buffers* de *jitter* no receptor que suavizam o fluxo de chegada dos pacotes ou a implementação de mecanismos de agendamento e temporização próprios da aplicação. Contudo, há trabalhos na literatura que estudam outros meios de mitigação do *jitter*: os autores de (BESSANI *et al.*, 2016) propõem um algoritmo de *Just-In-Time Routing* com o objetivo específico de reduzir as influências do *jitter* ao nível da camada de aplicação.

2.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste Capítulo foi apresentado o embasamento teórico a respeito do sistema multiagente, sua mediação ao sistema supervisório e os benefícios oferecidos quando de sua introdução à operação da MR, também apresentado aqui o modelamento da estrutura de comunicação adotada no ambiente do MAS e do ambiente de cossimulação e por fim, o embasamento teórico sobre o controle hierárquico adotado no presente estudo.

No Capítulo 3 será discutida metodologia a ser adotada no sentido de realizar os fundamentos quem embasam a MR CC, o MAS, o ambiente de cossimulação que inclui os simuladores (solucionadores) individuais, a metodologia de controle adotada, e finalmente, propor uma metodologia mitigadora de atrasos na comunicação entre os elementos do sistema.

3 METODOLOGIA

No presente capítulo são apresentados detalhes da metodologia para a implementação do sistema em estudo.

3.1 SISTEMA EM ESTUDO E ARQUITETURA GERAL

O sistema em estudo consiste em um ambiente de cossimulação, no qual a troca de informações entre os subsistemas é gerenciada por uma interface de comunicação desenvolvida em linguagem C, responsável por controlar o acoplamento entre os simuladores individuais por meio do protocolo de comunicação *socket* sobre TCP/IP. Essa interface é integrada a cada simulador, permitindo a coleta de medições e o envio correspondente a outros sistemas, bem como o recebimento e a aplicação de comandos provenientes de camadas superiores de controle ou relativos à operação local de cada subsistema.

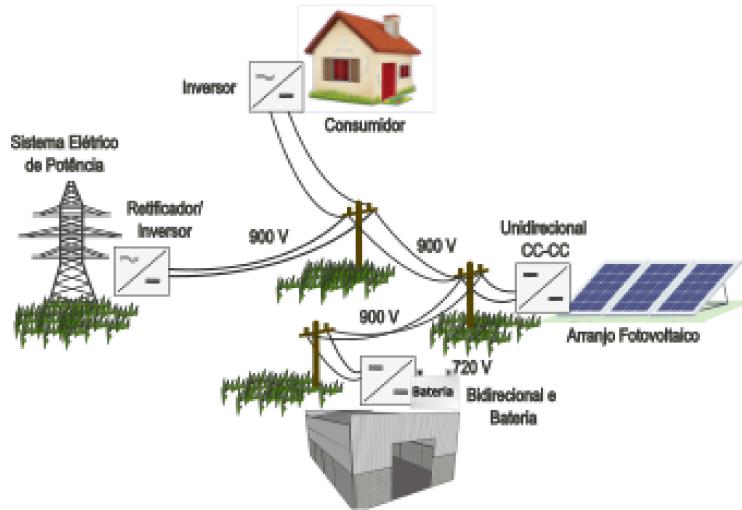
A cossimulação, aliada aos simuladores de sistemas de potência PSIM, PLECS e RTDS comunicando-se via *socket* sobre TCP / IP de forma assíncrona com um sistema multiagente, é utilizada para projetar o sistema energético em estudo. Tal sistema utiliza uma estrutura construída especificamente para a aplicação em pauta utilizando a linguagem de programação Python e protocolo concebido especificamente para este sistema, conforme detalhado na Seção 3.3.1.

O ambiente de cossimulação simula uma pequena vila composta por um consumidor, um arranjo fotovoltaico, um sistema acumulador de energia e conexão ao SEP, com seus respectivos conversores de energia. Para estabelecer uma rede CC estável, a pequena aldeia é dotada de um conversor CC-CC bidirecional, que controla a carga e descarga do banco de baterias e a tensão no barramento CC. Esta é parametrizada no presente estudo em 900 V, assim como o valor da tensão na bateria em 720 V, que é controlada pelo MAS conforme SoC. O sistema está representado na Figura 3.9:

- i. O conversor Bidirecional CC-CC e o banco de baterias são abrigados, ilustrativamente, e um galpão conectado à fiação externa (barramento CC);
- ii. Um conversor retificador/inversor que objetiva a conexão da MR ao SEP;
- iii. Uma unidade de arranjo PV dotado de conversor de energia CC para conectá-lo ao barramento CC;
- iv. Inversores conversor de energia CC para CA, representando a alimentação da unidade consumidora do subsistema que torna a energia adequada para a respectiva casa.

É importante ressaltar que o PV aqui não é controlado pelo MAS pois utiliza o método Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) (ITO; AKAGI, 2004)

Figura 3.9 – Sistema de operação do barramento CC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

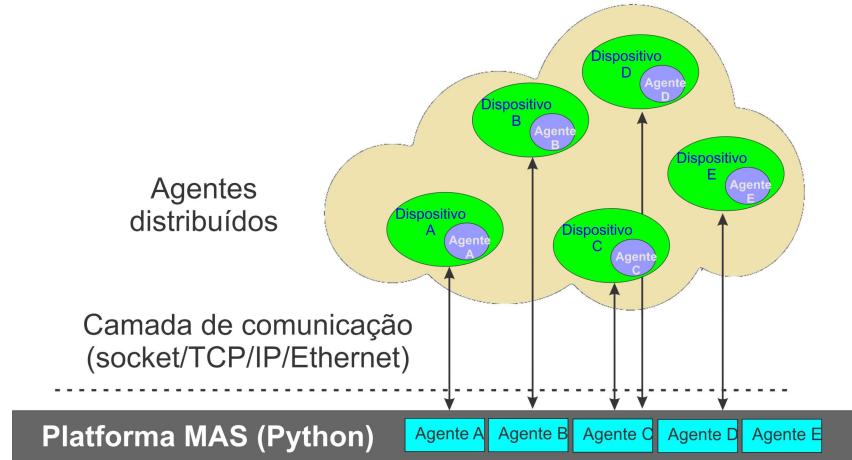
transferindo a energia gerada conforme a insolação incidente, o que dá margem ao controle para definir a corrente a ser injetada no barramento CC pelo conversor Retificador/Inversor. Em caso de sobra de energia demandada pela MR, a energia excedente é enviada para o SEP. Em situação oposta, ou seja, quando a insolação é insuficiente ou inexistente, a cobertura da demanda na MR é realizada por este último conversor.

Nesta tese o conversor Retificador/Inversor recebe continuamente solicitações de ajustes de corrente do MAS devido às variações na demanda de energia do consumidor e bateria. As informações fornecidas pelo sistema multiagente aos agentes visam manter o nível de tensão no banco de baterias dentro da região de operação definida para o SoC. O nível de SoC é controlado por um controlador PID localizado no MAS.

Foi projetado um sistema de controle hierárquico em que seus subsistemas comunicam-se por meio de *socket* sobre TCP / IP em uma arquitetura cliente/servidor, que fornece a infraestrutura de comunicação necessária para conectar todo o ambiente de cossimulação. A rede ethernet foi usada como camada física de conexão de dados, conforme mostrado na Figura 3.10. Nesta Figura os elementos identificados como *Dispositivos* representam os conversores de potência, em que um módulo de comunicação anexo a cada conversor traz a este uma identidade digital, *Agente*.

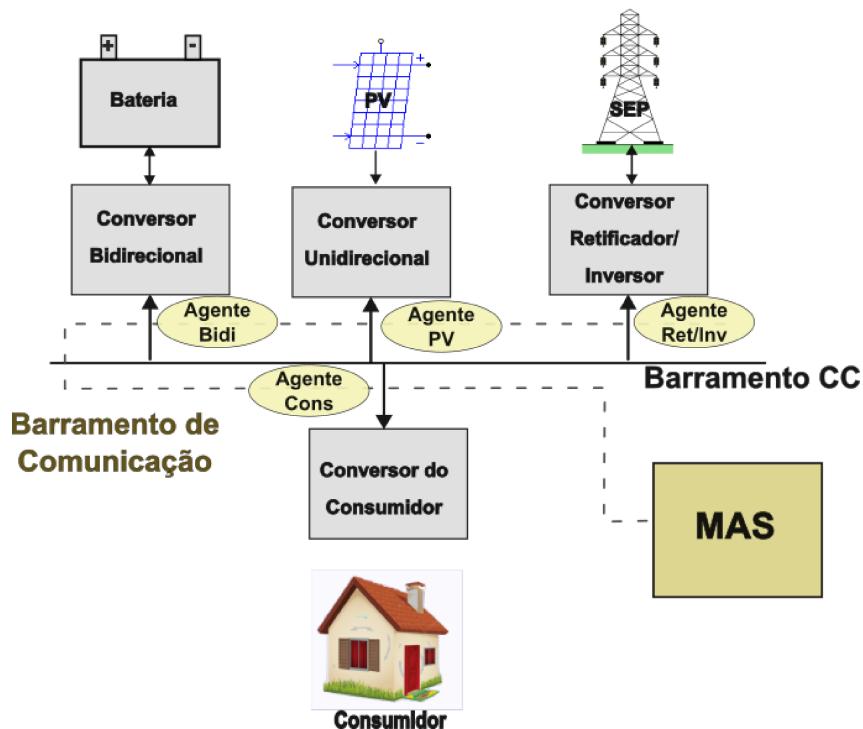
A figura 3.11 mostra o diagrama de blocos do sistema destacando as conexões de alimentação e comunicação. Os conversores de energia: PV; Consumidor; Retificador/Inversor e Bidirecional, são conectados através de um barramento CC. Por outro lado, os agentes: Bidi; PV; Ret/Inv e Cons estão conectados entre si através do barramento de conexão de dados e o MAS. Refere-se aqui ao conversor dotado de interface de comunicação

Figura 3.10 – Conexão entre os elementos do cossimulador.



por agente.

Figura 3.11 – Diagrama de blocos do sistema.

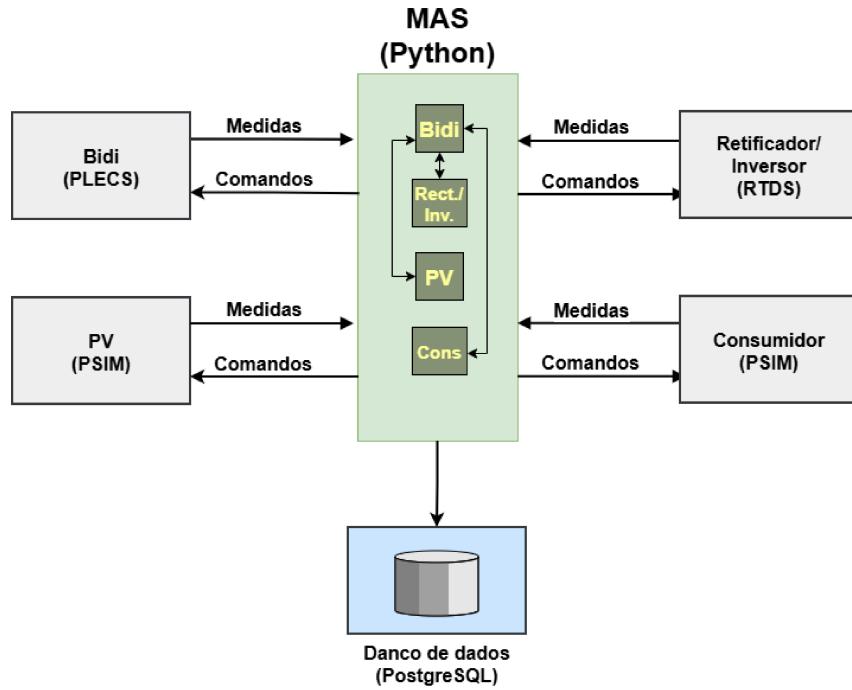


3.2 ESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO E PROTOCOLOS

Simuladores de rede em nível de pacote como OPNET, simulador de rede NS-2, NS-3 e *objective modular network testbed* em C++ (OMNET++) são comumente usados para simular comunicações de redes inteligentes (C SHUM et al, 2018). Essas ferramentas representam o processamento e a transmissão de mensagens como eventos discretos ao

longo de uma linha do tempo lógica. Nesta tese optou-se pela utilização da rede de comunicação existente no ambiente de testes de forma a implementar a comunicação entre os subsistemas. Adicionalmente, o simulador NS-3 é adotado para se obter estimativas de retardo na rede de comunicação em função de diferentes condições nesta rede, a ser detalhado no Capítulo 4. Uma estrutura de sistema multiagente proposta aqui é utilizada para facilitar a comunicação entre subsistemas, conforme ilustrado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Estrutura de comunicação do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nesta figura, os agentes representados são:

- **Bidi:** conversor bidirecional em corrente;
- **Retificador/Inversor:** conversor retificador-inversor conectado, de um lado, à MR e, de outro, ao SEP;
- **PV:** conversor unidirecional em corrente responsável pelo controle dos arranjos fotovoltaicos;
- **Consumidor:** conversor responsável pela alimentação das cargas dos consumidores.

Os agentes listados, por meio do bloco de comunicação, equipam os conversores simulados nos ambientes PLECS, PSIM e RTDS. As medições obtidas nos referidos simuladores são enviadas aos respectivos agentes virtualizados no ambiente do MAS, que, por sua vez, retornam os comandos de controle no sentido oposto.

3.2.1 Protocolo de comunicação

A aplicação do MAS identifica com precisão os agentes por meio de etiquetas (*tags*) pré-definidas, conforme mostrado na Tabela 3.3. Cada agente é configurado com sua própria etiqueta. O protocolo utilizado nesta tese se localiza na camada de aplicação,

Tabela 3.3 – Protocolo de comunicação entre agentes e o MAS.

Campo	Descrição	Tipo de dado	Direção
Timestamp	Tempo do evento	datetime	MAS ← Agente
TAG	Identificação do agente	string	MAS ↔ Agente
Val_1	Medida \ Comando	Float	MAS ↔ Agente
Val_2	Medida \ Comando	Float	MAS ↔ Agente
Val_3	Medida \ Comando	Float	MAS ↔ Agente

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

conforme enunciado no modelo OSI (DAY; ZIMMERMANN, 1983). As mensagens são trocadas periodicamente entre os agentes e o MAS, a qual é inicialmente definida pelo MAS em um valor padrão (nesta tese adotou-se 100 *Hz*).

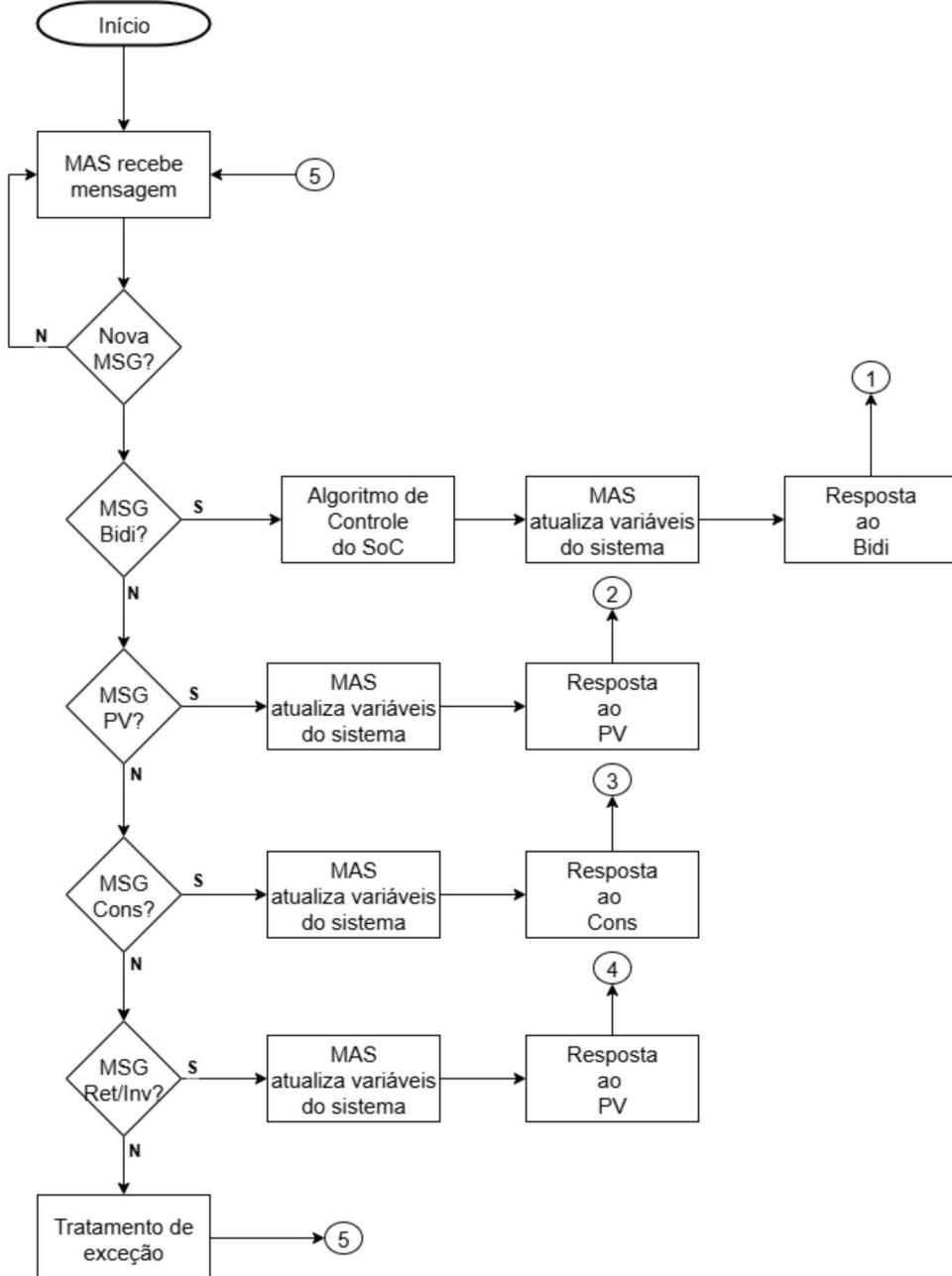
3.2.2 Taxa de atualização do MAS

Os agentes *Bidi*, *INV*, *PV* e *Cons* e o MAS são conectados via barramento de conexão de dados, o que confere ao seu respectivo conversor a capacidade de enviar e receber informações. A rede de comunicações é afetada por diversos fatores que interferem em seu rendimento, tais como ruídos externos, aumento no tráfego de dados gerado por demais usuários e aplicações que compartilham o mesmo meio de comunicação. Caso a fluência de dados seja reduzida devido a fatores prejudiciais à rede de comunicação, o reflexo percebido no patamar de aplicação (DAY; ZIMMERMANN, 1983), onde trafega o protocolo de comunicação da cossimulação, se traduz em retardos no recebimento de informações enviadas pelos agentes ao MAS e vice-versa.

3.3 AMBIENTE DE COSSIMULAÇÃO E INTEGRAÇÃO

A execução da cossimulação segue uma lógica descrita nas Figuras 3.13 e 3.14. O fluxo principal é executado na instância do MAS, o qual permanece em estado de espera até receber uma mensagem de um agente do sistema. O conteúdo das mensagens e a sequência temporal são descritos na Seção 3.3.1. Ao receber uma mensagem o MAS define qual é o emissor e dispara o fluxo correspondente, conforme detalhado no conjunto de fluxos ilustrados na Figura 3.13. Ações são tomadas conforme o emissor da respectiva

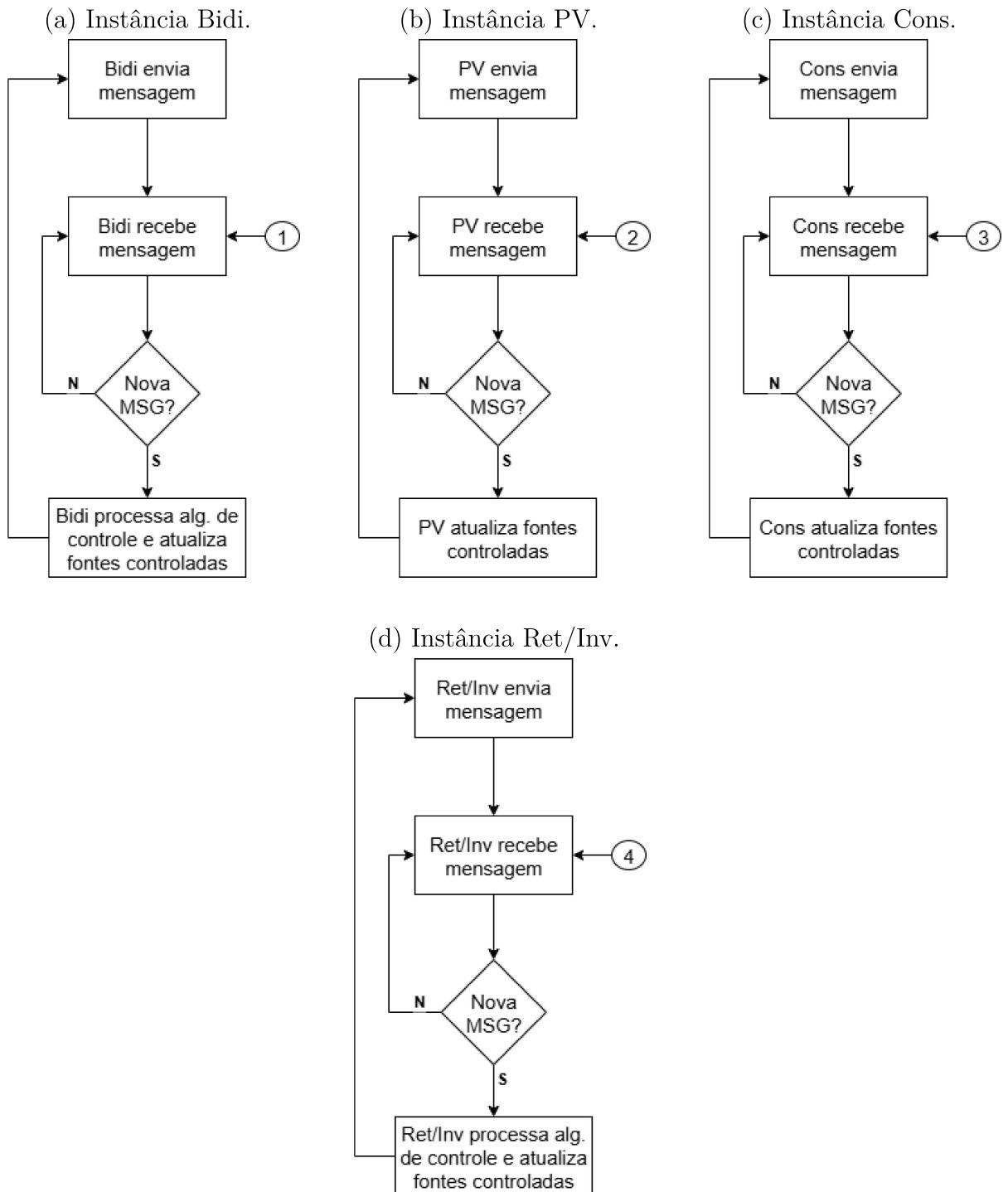
Figura 3.13 – Fluxo principal de execução da cossimulação na instância MAS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

mensagem, por exemplo: ao receber uma mensagem do Bidi, o MAS, primeiramente executa o algoritmo de controle do SoC, descrito na Seção 3.3.1.1, atualiza as variáveis que serão enviadas posteriormente aos demais agentes (conversores), assim como responde ao agente emissor da mensagem em tratamento. Esse por sua vez está em estado de espera pela resposta a uma mensagem enviada por ele contendo as variáveis que portam as leituras realizadas pelos seus sensores, conforme descrito na Tabela 3.4. Ao receber a mensagem enviada pelo MAS em resposta à sua respectiva correspondente, o conversor recebe os comandos que serão aplicados aos seus respectivos algoritmos de controle, assim como, às fontes controladas.

Figura 3.14 – Fluxos secundários de execução da cossimulação nas instâncias dos conversores do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

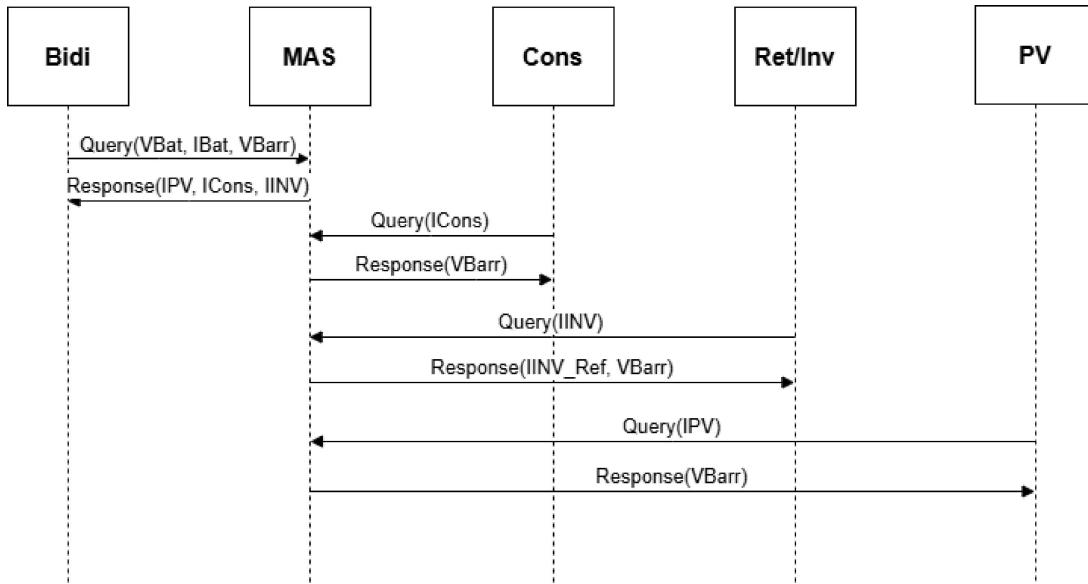
3.3.1 Sistema Multiagentes

De forma a organizar a troca de mensagens entre os elementos do sistema, um fluxo de mensagens, conforme mostrado na Figura 3.15, foi concebido para facilitar a

comunicação entre os subsistemas. As mensagens são trocadas de forma assíncrona, compartilhando informações ou solicitando atualizações de parâmetros para controlar a dinâmica de funcionamento do barramento CC de acordo com parâmetros pré-definidos de operação do sistema. Sendo trocadas de forma assíncrona, o sistema em cossimulação procura respeitar as particularidades de cada conversor individual, pois considera-se aqui que conversores da mesma natureza em uma determinada MR podem advir de aquisições, fornecedores, tecnologias distintas, tendo como possível reflexo, diferentes tempos de resposta ao sistema MAS.

A Figura 3.15 ilustra um exemplo de fluxo de troca de mensagens entre elementos do sistema. São representados agentes físicos (simuladores) e o Sistema Multiagentes (MAS). Agentes virtuais (réplicas dos agentes físicos que são abrigados no MAS) trocam mensagens entre si e os agentes físicos. Nomes de agentes e barras verticais representam início ou fim de mensagens indicadas por setas direcionais com as variáveis transportadoras das informações correspondentes. Os campos no sentido físico para o MAS contêm medidas coletadas pelos agentes, enquanto no sentido oposto, do MAS para agentes físicos, contêm comandos. Os primeiros são tomados pelos agentes como parâmetros a serem aplicados em fontes controladas ou referências para os algoritmos de controle individuais conforme o agente, conforme detalhado na Tabela 3.4. Os campos identificados no fluxo de mensagens

Figura 3.15 – Exemplo de fluxo de mensagens do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

são trabalhados nos simuladores PSIM e PLECS por meio de um bloco funcional próprio deste simulador, Biblioteca de Link Dinâmico (DLL), gerado pelo autor em linguagem C. O simulador RTDS possui a placa GTNET que dispõe de protocolo *socket* disponível para configuração através de sua interface gráfica, o RSCAD.

A Tabela 3.5 identifica os pinos do bloco funcional utilizado nos simuladores para

Tabela 3.4 – Descrição das variáveis do sistema.

Conversor	Fonte Controlada	Sensor	Referência
Buck PV	V_{Barr}	I_{PV}	Interna (MPPT)
Bidi	I_{PV} , I_{INV} , I_{Cons}	V_{Barr} , I_{Bat} , V_{Bat}	Interna (V_{Barr})
Retificador/Inversor	V_{Barr}	I_{INV}	$I_{INV-Ref}$
Consumidor	V_{Barr}	I_{Cons}	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

ativar os respectivos blocos de comunicação, arquivo DLL no PSIM e PLECS e placa GTNET no RTDS. Nesta tabela, as variáveis representam, respectivamente:

Tabela 3.5 – Tabela de identificação dos pinos do bloco de comunicação de um agente.

Agente	Simulador	No. Term.	Entrada	No. Term.	Saída
Bidi	PLECS	0	I_{Bat}	0	I_{INV}
		1	V_{Bat}	1	Aberto
		2	V_{Barr}	2	I_{Con}
		3	I_{Barr}	3	Aberto
		4	Relógio		
Ret/INV	RTDS	0	Relógio	0	$I_{INV-ref}$
		1	TAG	1	$T_{Amostra-ref}$
		2	I_{INV}	2	Aberto
		3	V_{Barr}	3	Aberto
		7	$T_{Amostra}$		
PV	PSIM	0	I_{PV}	0	$T_{Amostra-ref}$
		4	$T_{Amostra}$	3	V_{Barr}
Con	PSIM	0	I_{Con}	0	$T_{Amostra-ref}$
		4	$T_{Amostra}$	3	V_{bar}

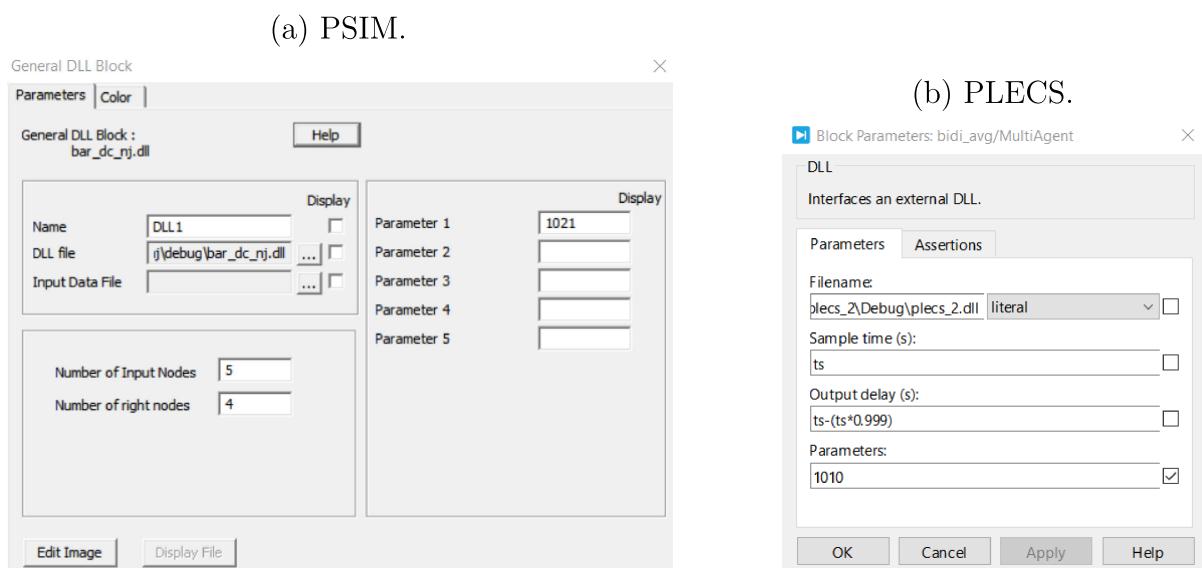
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- I_{Bat} e V_{Bat} : a corrente e a tensão medidas na bateria do sistema;
- I_{Barr} e V_{Barr} : a corrente e a tensão medidas no barramento CC;
- I_{PV} : a corrente gerada pelo arranjo fotovoltaico;
- I_{Con} : a corrente consumida pelo consumidor;
- I_{INV} : a corrente fornecida ou consumida pelo retificador/inversor;
- referências fornecidas pelo MAS para controle:
 - V_{Barr} : tensão do barramento controlada pelo conversor bidirecional;
 - $I_{INV-ref}$: corrente controlada pelo conversor retificador/inversor para fornecimento ao barramento CC ou exportada para o SEP.

As colunas identificadas por *No.* *Term.* na Tabela 3.5 indicam o número do terminal do bloco DLL para entrada ou saída ou placa GTNET (RTDS).

O bloco funcional DLL localiza o arquivo DLL escrito na linguagem de programação C no caminho de arquivo especificado mostrado na Figura 3.16. O Parâmetro 1 na Figura 3.16a (*Parameter 1*) é usado pelo sistema multiagente como uma etiqueta de identificação do agente específico. O número de nós de entrada definido como 5 e, como saída, definido como 4 padroniza a compilação da DLL para todos os agentes componentes do sistema que utilizam o simulador PSIM. O parâmetro (*Parameters*) na Figura 3.16b, transporta a identificação do agente no simulador PLECS. Neste, o parâmetro *ts* indica o tempo de amostragem para o código da DLL que implementa o mecanismo de ajuste do Tempo de Atualização (TA) do Sistema Multiagentes (MAS) pelo agente, a ser detalhado na Seção 3.5.1

Figura 3.16 – Blocos DLL.

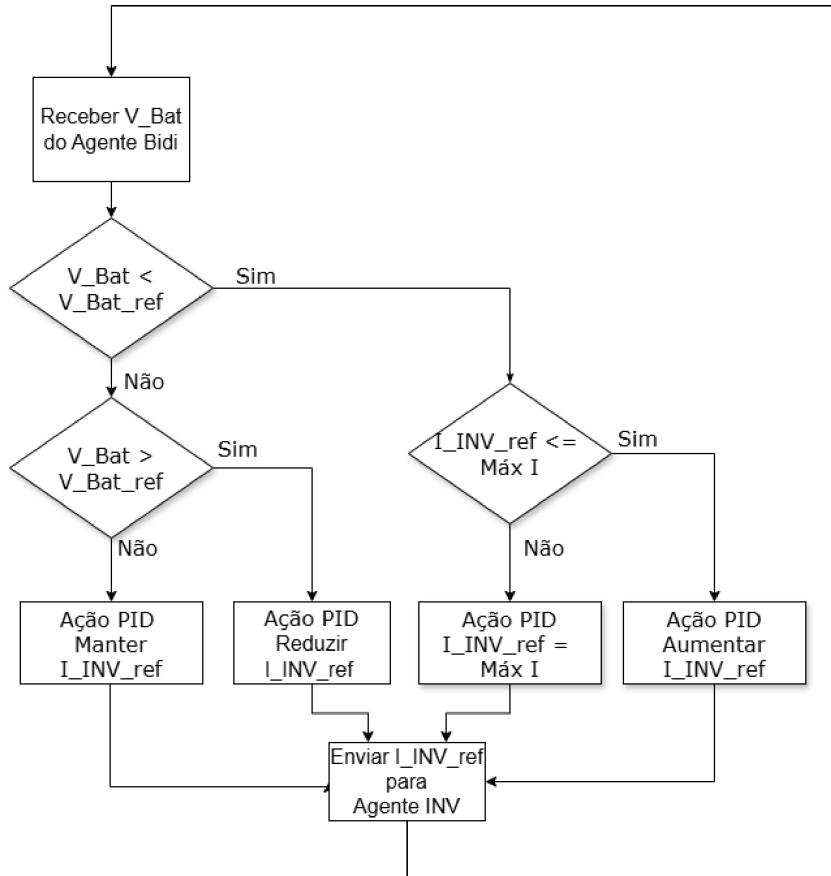


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De forma a se implementar o controle do segundo patamar na estrutura hierárquica da arquitetura de cossimulação, foi concebido um algoritmo que trabalha com variáveis populadas pelas leituras realizadas pelos agentes do sistema, que segundo sua lógica, gera ações de controle transmitidas aos agentes por meio de comandos. Tal algoritmo de controle é ilustrado na Figura 3.17, cujas variáveis são identificadas na Tabela 3.6.

O MAS além de controlar o SoC também registra todas as informações trafegadas entre os conversores e o próprio MAS em banco de dados Postgres (PSQL, 2023).

Figura 3.17 – Algoritmo de controle do MAS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 3.6 – Descrição das variáveis do algoritmo de controle do MAS.

Nome	Descrição
V_{Bat}	medição de tensão na bateria
V_{Bat_ref}	tensão de referência para a bateria
I_{INV_ref}	referência de corrente ao agente INV
Máx_I	máxima capacidade de corrente do sistema

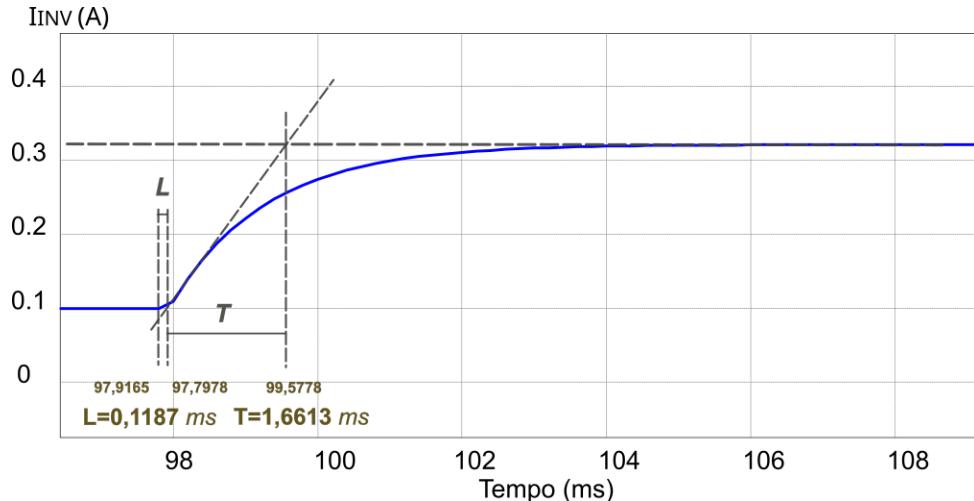
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3.1.1 Definição do controlador localizado no segundo patamar de controle (PID)

Seguindo a estrutura de controle hierárquico, o primeiro patamar de controle é localizado nos conversores individuais de potência. No segundo patamar, conforme exposto na Seção 2.3.1, situa-se o controle do SoC realizado por meio de um controlador PID localizado no ambiente do MAS.

A Figura 3.18 ilustra o resultado do teste realizado no caso em estudo.

Figura 3.18 – Caso em estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

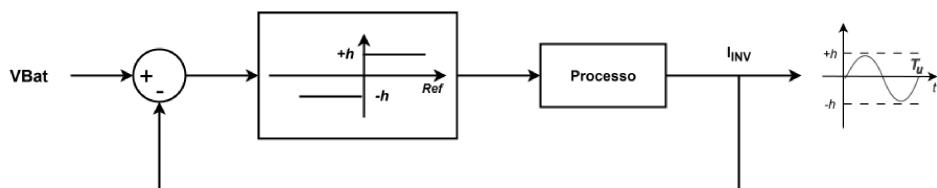
A função de transferência do controle PID é dada por 3.1:

$$\begin{aligned}
 PID &= K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \\
 &= 1,2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5 L s \right) \\
 &= 0,6 T \frac{\left(s + \frac{1}{L s} \right)^2}{s}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Segundo observa-se na Figura 3.18, o sistema em estudo não se enquadra nesse método (Figura 2.7) por não apresentar uma das características fundamentais para sua aplicação, que é a oscilação sustentável à aplicação de um degrau na entrada do sistema em malha aberta.

O método *Relay* (Åström–Hägglund) *Auto-Tuning* (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1984) complementa o método Ziegler-Nichols (OGATA, 1997) de forma a se obter parâmetros adicionais, conforme segue, a serem aplicados na Equação 2.6. A Figura 3.19 ilustra o sistema em malha fechada utilizado para se obter os parâmetros necessários no método *Relay*. Neste método substitui-se o PID temporariamente por um controlador de histerese

Figura 3.19 – Método de Åström-Hägglund (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1984).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

(liga/desliga) (BOUZID *et al.*, 2015) que força oscilações sustentadas. A partir da amplitude e do período da oscilação, obtém-se K_u e T_u (OGATA, 1997), em malha fechada, mas sem

a necessidade de aumentos manuais de ganho, como em Ziegler-Nichols. Como vantagem, este método é, portanto, mais rápido e mais reproduzível do que o método por tentativa e erro.

Seja expressão 3.2 a definição do ganho crítico (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1984)

$$K_u = \frac{4h}{\pi A}, \quad (3.2)$$

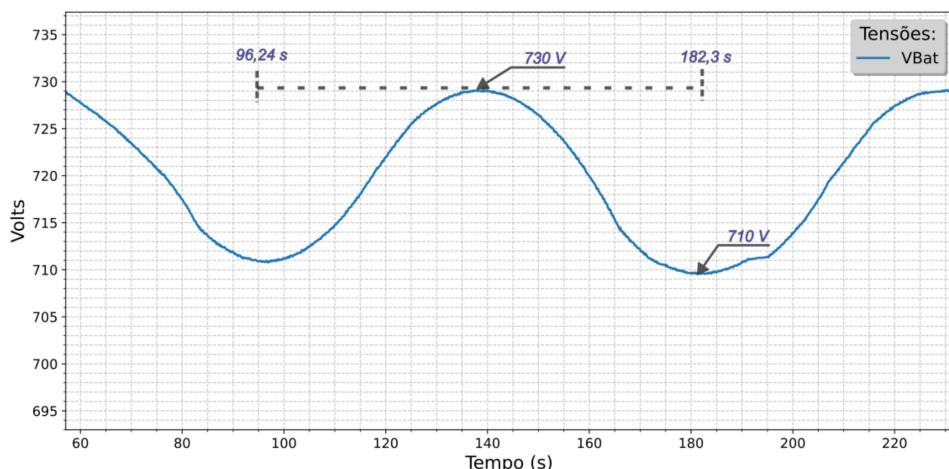
em que h é a banda de histerese ($\pm h$), T_u o período de oscilação e A o valor de pico da oscilação, conforme ilustrado na Figura 3.19.

3.3.1.2 Controlador do SoC

A sintonia do controlador PID utilizado no âmbito desta tese envolve o ajuste dos três ganhos K_p , K_i e K_d , característicos deste tipo de controlador. Tal ajuste é realizado no sentido de se obter a resposta desejada do sistema.

A Figura 3.20 ilustra o caso adotado na presente tese. A amplitude da oscilação pico

Figura 3.20 – Oscilação do sistema em malha fechada utilizando controlador por histerese destacando as grandezas numéricas envolvidas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

a pico é dada por $A_{PP} = 730 - 710 = 20 V$, sendo que a tensão de pico é $A = A_{PP}/2 = 10 V$. O controlador de histerese adotado nesta tese, como discutido na Subseção 2.3.2, utilizou $h = 5 V$. A partir da Equação 3.2 e substituindo-se os valores obtidos por inspeção na Figura 3.20, chega-se ao ganho crítico

$$K_u = \frac{4 \times 5}{\pi \times 10} = 0,63662. \quad (3.3)$$

Por outro lado, o período de oscilação crítico é igualmente obtido sendo $T_u = 86,06 s$.

Tabela 3.7 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols com base em Ganho Crítico K_{CR} (K_u) e Período Crítico P_{CR} (P_u) (Segundo Método) (OGATA, 1997).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{CR}$	∞	0
PI	$0,45K_{CR}$	$\frac{1}{1,2}P_{CR}$	0
PID	$0,6K_{CR}$	$0,5P_{CR}$	$0,125P_{CR}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As equações de Ziegler-Nichols são então encontradas na Tabela 3.7 e utilizadas na definição de K_p , T_i e T_d . A partir de 3.1, obtém-se os ganhos individuais do controlador PID.

$$\begin{aligned} K_p &= 0,38197 \\ K_i &= \frac{0,0089}{s} \\ K_d &= 4,1091 \text{ s} \end{aligned} \tag{3.4}$$

3.4 ABORDAGEM COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO FIXA

Conforme introduzido na Seção 2.4.3, a comunicação exerce fundamental importância no ambiente de cossimulação uma vez que seus componentes comunicam-se entre si e, portanto, necessitam de um meio de comunicação com baixa latência na transmissão dos dados.

3.4.1 Fundamentação Teórica

Os agentes integrantes do ambiente de cossimulação da MR enviam e recebem dados para outros agentes e o MAS, conforme discorrido na Subseção 3.3.1. Tal comunicação ocorre em um meio de comunicação sujeito a intempéries capazes de causar distúrbios que, potencialmente, resultam em perda na qualidade de comunicação. A latência no envio e recebimento de pacotes de dados pode interferir na estabilidade da MR.

3.4.1.1 Teste de *throughput* para definição da taxa de atualização do MAS

Um procedimento de teste foi estabelecido para avaliar o rendimento do link de comunicação, replicando o tráfego de dados típico dentro do ambiente de cossimulação. Este é composto por dois computadores: um executando os clientes *socket* (SClient), e o outro, o servidor *socket* (SServer), conforme detalhado na Tabela 3.8. Os computadores estão conectados por rede local WiFi. Um pacote composto por 480 bytes foi enviado pelos clientes e outro de 220 bytes foi retornado do servidor para cada cliente individualmente, 200 vezes. Cada bloco de teste foi repetido por 5 clientes distintos, simultaneamente, ao servidor *socket*. O teste foi repetido para as taxas de atualização conforme Tabela 3.9, sendo

Tabela 3.8 – Infraestrutura de equipamentos.

Nome	Sistema	Endereço IP
SClient	Intel(R) Core(TM) i5-2450M CPU @ 2.50 GHz	192.168.15.8
SServer	11 th Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.4 GHz	192.168.15.5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

o *throughput* de dados avaliado no final como a média de todas as séries de transmissão e recepção dos blocos de dados por todos os clientes. O Tempo de Atualização (TA) (Hz) é

Tabela 3.9 – Avaliação do rendimento do link *socket/TCP/IP*.

Taxa de amostragem (TA)(Hz)	Throughput (kbps)	Méd. Perc. (%)	Perc. de congestion. (%)
800	218	1,896	100
100	172	232.9	87.9
50	218	28.9	37.3
10	201	0	1.0

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

testado buscando-se o mínimo *Perc. de congestion. (%)* (percentual de congestionamento) observado. A coluna *Méd. Perc. (%)* indica a porcentagem em que o *Tempo de Espera (TE)* do cliente é maior que o inverso do TA, sendo que *Méd. Perc. (%)* reduz proporcionalmente seguindo a redução do TA. A Equação 3.5 descreve o cálculo da coluna *Méd. Perc. (%)*. Os resultados negativos foram zerados, pois indicam que, em média, o sistema de comunicação sofreu pequenos congestionamentos e, portanto, foram desconsiderados.

$$MedPerc = \left(\frac{TE_{med}}{\frac{1}{TA}} - 1 \right) * 100 \% \quad (3.5)$$

A Tabela 3.10 detalha os registros de uma amostra de sessões de simulação reais executadas em diferentes TAs, onde a primeira coluna identifica o TA para a respectiva sessão de simulação. Cada amostra de sessão de simulação possui um registro de tempo exato de início e de término expresso em *s*. As colunas *Tempo de simulação (TS) (s)* e *Tempo real (TR) (s)* representam os carimbos de data e hora registrados pelo simulador e o tempo do mundo real (tempo físico) registrado pelo *prompt* da ferramenta de linha de comando do Python no início e no final de cada amostra de uma sessão de simulação, respectivamente. O Tempo Real (TR) é gerado pelo cliente *socket*. Conforme representado na Tabela 3.10, existe uma diferença discernível entre o Tempo de Simulação (TS) e o TR. A relação entre TS e TR é apresentada na coluna *Delta (ms)*. Uma vez que os agentes enviam medições para o MAS e aguardam sua resposta, o Tempo de Ida e Volta (RTT) aumenta quando o tempo de atualização dos agentes para o MAS é mais rápido. Tal fato destaca o desempenho do sistema de comunicação sendo afetado de alguma forma quando o TA fica

mais rápido. Não só a degradação das condições da rede podem interferir no sistema de simulação, mas também a capacidade de processamento computacional.

Tabela 3.10 – Retardo no tempo de simulação em diferentes taxas de atualização.

Taxa de atualização (Hz)	Tempo de simulação (TS)(s)	Tempo real (TR)(s)	Delta (ms)	Razão
800 Início	0.18625	0.967431	TS 1.25	12.56
	0.18750	0.983142	TR 15.7	
100 Início	0.530	0.153695	TS 10	10.73
	0.540	0.261012	TR 107.3	
50 Início	0.840	0.428062	TS 20	8.59
	0.860	0.599804	TR 172	
10 Início	2.20	0.892934	TS 100	8,32
	2.30	1.724819	TR 832	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.4.2 Limitações da abordagem com taxa fixa

Conforme discutido na Seção 2.4.3, a qualidade do meio de comunicação exerce influência direta — positiva ou negativa — sobre a estabilidade do sistema da MR. Quando a qualidade desse meio se deteriora, observa-se um aumento na latência associada aos processos de transmissão e recepção de dados trocados entre os agentes e o MAS. Essa elevação de latência compromete o processo de envio e resposta entre os componentes da cossimulação e, consequentemente, a eficiência do controle do sistema.

Considerando que os agentes são programados para enviar informações de leitura ao MAS em uma taxa de atualização fixa, eventuais atrasos na rede podem ocasionar defasagens temporais indesejadas. Em situações mais severas, essa defasagem pode provocar instabilidade no sistema, prejudicando a regulação das variáveis controladas e a coordenação global dos agentes.

3.5 ABORDAGEM COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO ADAPTATIVA

Com o intuito de mitigar os efeitos que a degradação da qualidade do meio de comunicação possa exercer sobre a estabilidade da MR, propõe-se um método baseado em uma estratégia de atualização adaptativa entre os elementos do sistema. O princípio de funcionamento fundamenta-se na observação de que, em condições de alta latência, um volume excessivo de trocas de dados entre os elementos tende a congestionar o canal de comunicação, agravando ainda mais os atrasos existentes.

Dessa forma, foi desenvolvido um algoritmo adaptativo destinado a ajustar dinamicamente a taxa de atualização dos agentes em relação ao MAS, reduzindo a frequência de

envio de informações sempre que forem detectados atrasos significativos na rede. Essa abordagem busca preservar a estabilidade global do sistema, evitando sobrecarga no meio de comunicação e assegurando uma operação mais robusta e eficiente.

3.5.1 Fundamentação Teórica do Algoritmo Adaptativo

Para garantir uma comunicação robusta em condições de rede de comunicação sob efeitos prejudiciais à fluência de dados, foi desenvolvido e implementado no Sistema Multiagentes (MAS) um mecanismo de Tempo de Atualização (TA) dinâmico. Essa estratégia permite que o MAS regule individualmente a frequência de comunicação de cada agente, com base nos tempos de tráfego das mensagens observados, visando manter tanto a confiabilidade da comunicação quanto a estabilidade geral do sistema.

Seja cada agente $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ associado a um TA $TA_k^i \in \mathbb{R}^+$ no instante discreto k . O TA representa o intervalo esperado entre mensagens consecutivas recebidas do agente i e é definido como o inverso da frequência de atualização f_k^i :

$$TA_k^i = \frac{1}{f_k^i}. \quad (3.6)$$

O MAS monitora o intervalo de tempo real entre duas mensagens sucessivas como:

$$\Delta t_k^i = t_k^i - t_{k-1}^i, \quad (3.7)$$

onde t_k^i e t_{k-1}^i são os instantes de recepção da mensagem atual e da anterior do agente i , respectivamente.

O algoritmo adaptativo é responsável por ajustar dinamicamente o TA com base na comparação entre o intervalo observado Δt_k^i e o tempo configurado TA_k^i . A regra de atualização é definida da seguinte forma:

$$TA_{k+1}^i = \begin{cases} \max(TA_k^i - \alpha, TA_{\min}), & \text{if } \Delta t_k^i \leq TA_k^i, \\ \min(TA_k^i + \alpha, TA_{\max}), & \text{if } \Delta t_k^i > TA_k^i, \end{cases} \quad (3.8)$$

onde:

- $\alpha > 0$: tamanho do passo de adaptação (em segundos);
- $TA_{\min}, TA_{\max} \in \mathbb{R}_{>0}$: limites inferior e superior do TA.

O algoritmo é inicializado com um valor padrão,

$$TA_0^i = TA_{\text{default}}, \quad (3.9)$$

e impõe a seguinte restrição:

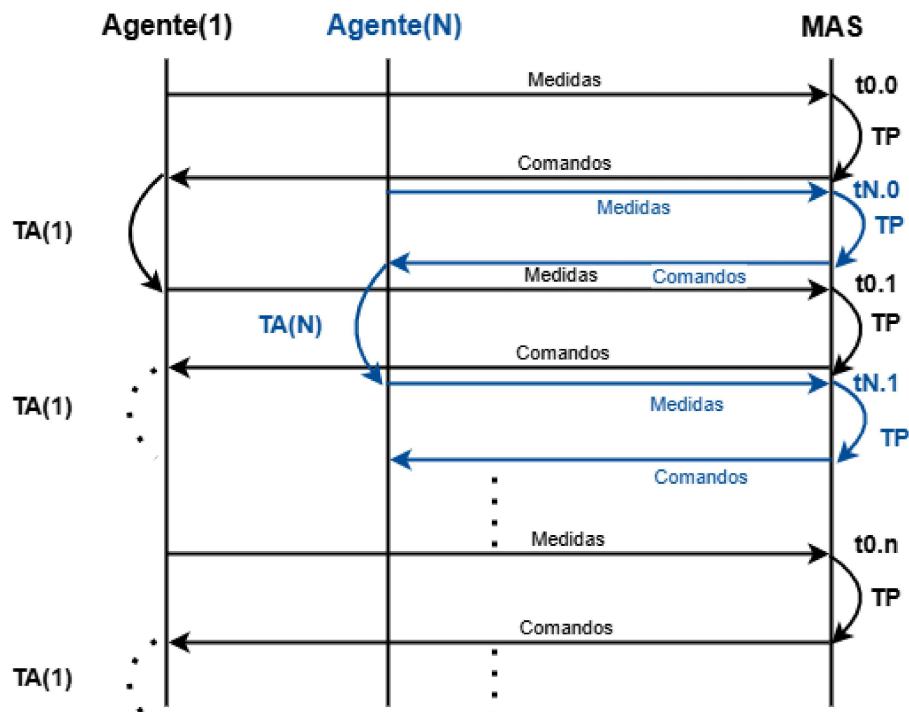
$$TA_{\min} \leq TA_k^i \leq TA_{\max}, \quad \forall k \in \mathbb{N}. \quad (3.10)$$

3.5.2 Mecanismo de Ajuste Dinâmico

O mecanismo opera de forma independente para cada agente, permitindo taxas de comunicação heterogêneas no sistema. Quando o intervalo observado Δt_k^i é menor ou igual à taxa configurada TA_k^i , o MAS reduz o TA (aumenta a frequência de atualização), favorecendo a capacidade de resposta. Por outro lado, quando $\Delta t_k^i > TA_k^i$, o TA é aumentado, reduzindo a carga de comunicação e evitando sobreposição ou congestionamento de mensagens.

O protocolo de comunicação baseia-se em uma arquitetura cliente-servidor (STEEN, 2007), onde o MAS (servidor) processa e responde sequencialmente às mensagens dos agentes, garantindo determinismo e prevenindo conflitos de acesso simultâneo. A Figura 3.21 ilustra o processo de regulação do TA. Para cada agente i , o MAS registra os *timestamps* $t_i^{(k-1)}$ e $t_i^{(k)}$, correspondentes a duas mensagens sucessivas.

Figura 3.21 – Mecanismo de ajuste do TA com base em atrasos de comunicação específicos do agente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O intervalo medido Δt_k^i determina se o TA TA_k^i deve ser aumentado ou reduzido, conforme a Equação (3.8). O diagrama também indica:

- TA (1 … n): taxas de atualização atuais de cada um dos n agentes;
- TP: tempo de processamento requerido pelo MAS para cada ciclo de comunicação;
- $t0.0$ e $t0.1$: *timestamps* do Agente 1, com $\Delta t = t0.1 - t0.0$;

- $tN.0$ e $tN.1$: *timestamps* análogos do Agente N .

Esse nível de granularidade permite ao MAS avaliar o desempenho da comunicação de cada agente e agir proativamente para mitigar instabilidades ou latência. Por exemplo, se o MAS detectar que $\Delta t_k^1 > TA_k^1$, o algoritmo instrui o Agente 1 a reduzir sua frequência de atualização aumentando seu período de atualização, ajudando a manter a sincronização e a evitar a saturação do canal de comunicação.

3.6 LIMITAÇÕES DESTA ABORDAGEM

A metodologia explorada aqui apresenta algumas limitações que precisam ser consideradas. A topologia adotada, estruturada em um controle hierárquico organizado em diferentes camadas, depende fortemente da disponibilidade de uma rede de comunicação estável, confiável e com baixa latência. Nesse arranjo, a camada de controle local estabelece sua vinculação com a camada superior exclusivamente por meio da rede de comunicação, o que torna esse elo um ponto crítico para o desempenho global do sistema. Em caso de degradação, atraso ou falha nesse meio pode-se comprometer a eficiência da estratégia de controle, impactando diretamente a estabilidade da MR e a coordenação entre os agentes envolvidos.

Conforme observado na Subseção 4.1.4, houve a necessidade de se adaptar o simulador para que a estabilidade fosse mantida na tensão do barramento CC. Este fato indica que uma restrição física foi atingida no sistema, tal que o TA de 100 ms, apesar de ter sido a melhor encontrada para as presentes condições na rede de comunicação, não é factível sem a realização de uma adaptação no sistema de armazenamento de energia. Há de se destacar que o TA sendo fixo, degradações na rede de comunicação podem impactar a fluência dos dados ao ponto de comprometer a estabilidade do sistema.

Outro ponto a ser considerado no caso de falha total na comunicação é de que os elementos da MR perderiam a capacidade de se comunicar passando a trabalhar com referências congeladas ou padrões, sendo que se a falha se prolongar demasiadamente, ações de interrupção do fornecimento de energia pela MR teriam que ser tomadas por segurança. Operação *offline*. Redundâncias nos canais de comunicação teriam que ser providas de forma a mitigar esse risco.

3.7 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste Capítulo foram modelados os conversores utilizados no cossimulador, bidirecional em corrente, unidirecional em corrente, o controlador do MAS e o conversor retificador/inversor. Também discutida aqui a estrutura de cossimulação adotada incluindo a estrutura de comunicação que conecta dos elementos do sistema, além da estrutura proposta para o MAS.

De forma a mitigar a possível interferência na capacidade tráfego de dados no desempenho geral do sistema, uma metodologia de adaptação é concebida no âmbito desta tese, conforme detalhado na Seção 3.5.1.

4 RESULTADOS

Os resultados experimentais obtidos no âmbito desta tese demonstram a capacidade do sistema em manter, de forma eficaz, tanto a tensão do barramento, regulada pelo conversor bidirecional, quanto o nível de tensão da bateria, controlado pelo Sistema Multiagentes (MAS). Tais resultados evidenciam a importância dos mecanismos de coordenação e supervisão empregados, os quais dependem diretamente do adequado desempenho da infraestrutura de comunicação.

Nesse contexto, a rede de comunicação desempenha papel fundamental para garantir o funcionamento adequado do sistema em estudo. Dessa forma, torna-se imprescindível considerar as condições da rede empregada, a fim de adotar estratégias que assegurem a operação estável do sistema.

O estudo desenvolvido contempla duas abordagens distintas, sendo a segunda uma evolução da primeira. Inicialmente, analisa-se o Tempo de Atualização (TA) com valor fixo, seguido da avaliação do TA adaptativo. É importante observar que duas topologias distintas são utilizadas para avaliar os TAs, fixo na Seção 4.1, e adaptativo na Seção 4.2, e posteriormente, na Seção 4.4 uma topologia comum é adotada para testes comparativos entre as duas abordagens.

4.1 ABORDAGEM COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO FIXA

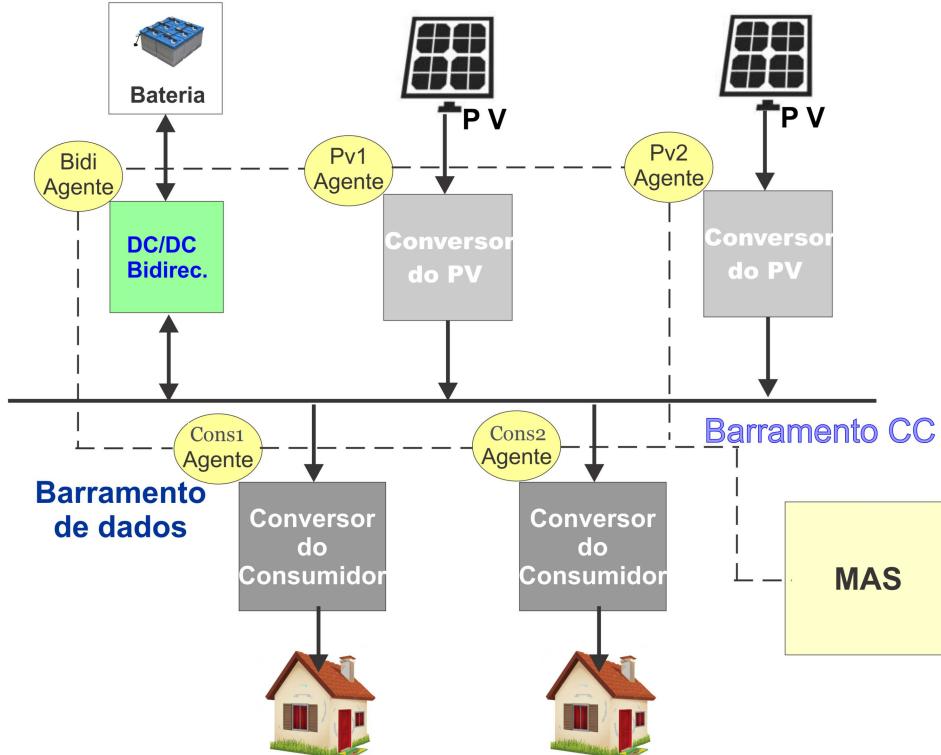
Em ambas abordagens, Frequência de Atualização (FA) fixa e adaptativa, os subsistemas do ambiente de cossimulação comunicam-se por meio de *socket* sobre TCP / IP em uma arquitetura cliente/servidor, que fornece a infraestrutura de comunicação necessária para conectar todo o ambiente de cossimulação. Nesta primeira abordagem, o simulador PSIM é adotado como plataforma única de simulação individual para cada um dos conversores de potência.

A Figura 4.22 apresenta o diagrama de blocos do sistema, destacando as conexões de alimentação e comunicação. Os conversores de energia — PV, Consumidor e Bidirecional — são interligados por meio de um barramento CC.

Por sua vez, os agentes Bidi, PV_n e $Cons_n$, para $n = 1, e, 2$ comunicam-se entre si e com o MAS através do barramento de dados.

Nesta primeira abordagem, avalia-se o SoC da bateria dentro da faixa operacional definida pelos limites máximo e mínimo de variação da tensão em seus terminais, correspondentes, respectivamente, a 99% e 97% da tensão nominal. As tensões no barramento CC, nos terminais da bateria e o fornecimento de corrente pelo sistema fotovoltaico (PV) são analisados sob diferentes TAs entre MAS e agentes, observando-se a dinâmica do sistema para os seguintes valores:

Figura 4.22 – Diagrama de blocos do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- 800 Hz;
- 100 Hz;
- 50 Hz;
- 10 Hz.

Nessa configuração, baseada em TA fixo, o sistema é submetido a experimentos com o objetivo de verificar a estabilidade da tensão do barramento sob distintas condições de operação, incluindo o regime normal e a ocorrência de variações no consumo de energia pelos consumidores.

Ao se definirem as taxas de atualização entre os agentes e o MAS, conforme listadas anteriormente, obtém-se os respectivos tempos de atualização:

- $t_{800 \text{ Hz}} = \frac{1}{800} = 1,25 \text{ ms};$
- $t_{100 \text{ Hz}} = \frac{1}{100} = 10,0 \text{ ms};$
- $t_{50 \text{ Hz}} = \frac{1}{50} = 20,0 \text{ ms};$
- $t_{10 \text{ Hz}} = \frac{1}{10} = 100,0 \text{ ms}.$

Dessa forma, eventos cuja dinâmica ocorra em escalas de tempo superiores aos períodos de atualização definidos, como variações na irradiação solar, são adequadamente tratados pela dinâmica natural do sistema. Em contrapartida, variações abruptas no consumo de energia, caracterizadas por degraus de carga, tendem a ocorrer entre instantes de atualização, o que justifica a escolha do maior tempo de atualização em 100 ms. Com essa configuração, assegura-se a preservação da estabilidade do sistema.

Com o objetivo de avaliar diferentes condições de funcionamento do sistema, são definidos modelos específicos a serem empregados nas simulações.

4.1.1 Modelos de Simulação Utilizados na Abordagem com TA Fixa

O sistema em estudo utilizou conversores simulados em modelo chaveado, cujo modelamento encontra-se descrito no Apêndice. Para avaliação dos resultados nesta abordagem são utilizados, basicamente, três tipos de conversores no ambiente de cossimulação, a saber:

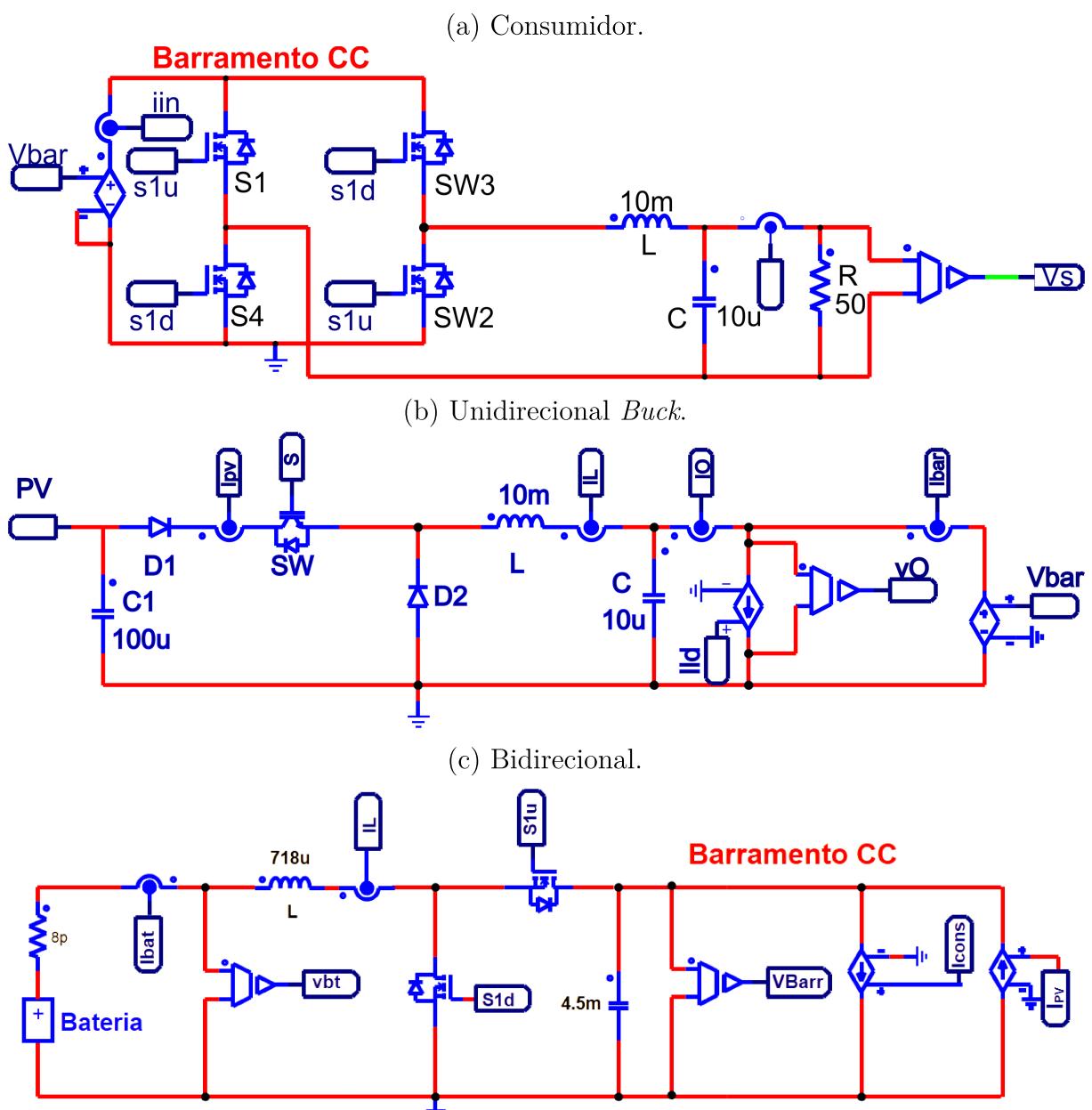
- bidirecional em corrente, cujas principais atuações são:
 - regulação da tensão no barramento CC;
 - controle de carga e descarga do sistema de armazenamento de energia, o banco de baterias;
 - informação da tensão no barramento CC;
- unidirecional em corrente na configuração *Buck*, é responsável:
 - pelo controle dos painéis solares;
 - por injetar corrente no barramento CC segundo uma referência de corrente;
 - pela informação do valor de corrente injetada no barramento CC;
- e, por fim, o inversor CC/CA, que é responsável:
 - pela alimentação das carga, ou seja, os consumidores conectados ao barramento CC;
 - pela informação de corrente consumida pela carga.

A cossimulação trabalha com instâncias independentes do único simulador adotado nesta abordagem do estudo, o PSIM, cujos diagramas de simulação são mostrados na Figura 4.23. Por instâncias independentes, entende-se cópias do mesmo programa rodando com diferentes configurações, por exemplo: instância 1 - conversor bidirecional, instância 2 - conversor do consumidor, assim por diante.

De forma a prover a continuidade do barramento CC entre todas as instâncias, foi adotada uma estratégia baseada em fontes controladas. A tensão no barramento CC é

então uma referência aplicada a uma fonte controlada de tensão nos conversores do PV (V_{Barr} na Figura 4.23b) e nos consumidores (V_{Barr} na Figura 4.23a). A corrente no barramento é implementada através de uma referência aplicada a uma fonte controlada de corrente nos conversores do PV (I_{ld} na Figura 4.23b) e bidirecional (I_{PV} na Figura 4.23c). De forma similar, as correntes consumidas nos consumidores são utilizadas no conversor bidirecional como referência a uma fonte de corrente (I_{cons} na Figura 4.23c) que drena corrente do barramento CC. As informações utilizadas como referências em cada conversor são passadas pelo MAS conforme demonstrado na Seção 3.3.1. A bateria

Figura 4.23 – Conversores utilizados no ambiente de cossimulação na fase preliminar.

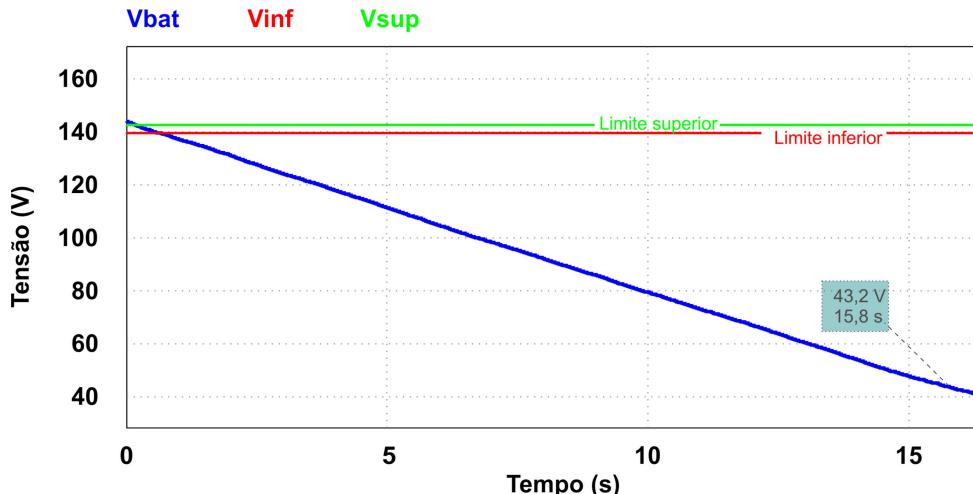


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

que representa o sistema de armazenamento é implementada através de um capacitor, cuja capacidade é definida em $0,8 F$ com tensão inicial conforme a tensão nominal adotada, em série com um resistor que representa uma resistência interna da bateria no valor de $50 m\Omega$. Nesta abordagem adotou-se a tensão nominal da bateria em $144,0 V$.

A Figura 4.24 mostra a curva de descarga da bateria adotada no ambiente de cossimulação. As curvas V_{inf} e V_{sup} representam, respectivamente, os limites utilizados

Figura 4.24 – Curva de descarga da bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

para controle do SoC. A curva V_{bat} ilustra a tensão nos terminais da bateria pelo tempo de descarga, expresso em segundos (s). Nesta simulação utilizou-se uma carga controlada consumindo $9,5 A$ de forma a se ter uma aproximação do comportamento do co-simulador em uma condição de alto consumo de corrente pelos consumidores. No instante $15,8 s$ a tensão da bateria atinge o patamar de 30% , ponto em que o circuito de controle do conversor bidirecional passa a apresentar instabilidade no controle da tensão de barramento.

4.1.2 Parâmetros adotados no sistema

De forma a se obter dados numéricos a serem utilizados na cossimulação, são definidos parâmetros de operação do sistema conforme listados na Tabela 4.11.

Conversor unidirecional em corrente.

Conversor bidirecional em corrente, Tabela 4.12. Os parâmetros listados nas Tabelas 4.11 e 4.12 foram definidos, por simplicidade, em função dos inversores monofásicos utilizados para suprir os consumidores com $127 VCA$ a partir de uma tensão no barramento de $180 VCC$.

Tabela 4.11 – Lista de parâmetros utilizados no conversor unidirecional em corrente.

Parâmetro	Unidade	Valor
Tensão de entrada(V_0)	Volt	270,0
Tensão de saída (V_s)	Volt	180,0
Corrente de saída (I_0)	Ampere	4,5
<i>Ripple</i> na tensão	%	0,1
<i>Ripple</i> na corrente	%	20
Máxima potência de entrada	WP	270
Frequência de chaveamento	kHz	10

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 4.12 – Lista de parâmetros utilizados no conversor bidirecional em corrente.

Parâmetro	Unidade	Valor
Tensão de entrada(V_0)	Volt	144
Tensão de saída (V_s)	Volt	180,0
Corrente de saída (I_0)	Ampere	9
<i>Ripple</i> na tensão	%	0,1
<i>Ripple</i> na corrente	%	20
Capacidade	kW	1,62
Frequência de chaveamento	kHz	10

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.1.3 Resultados obtidos com a taxa de atualização (TA) fixa

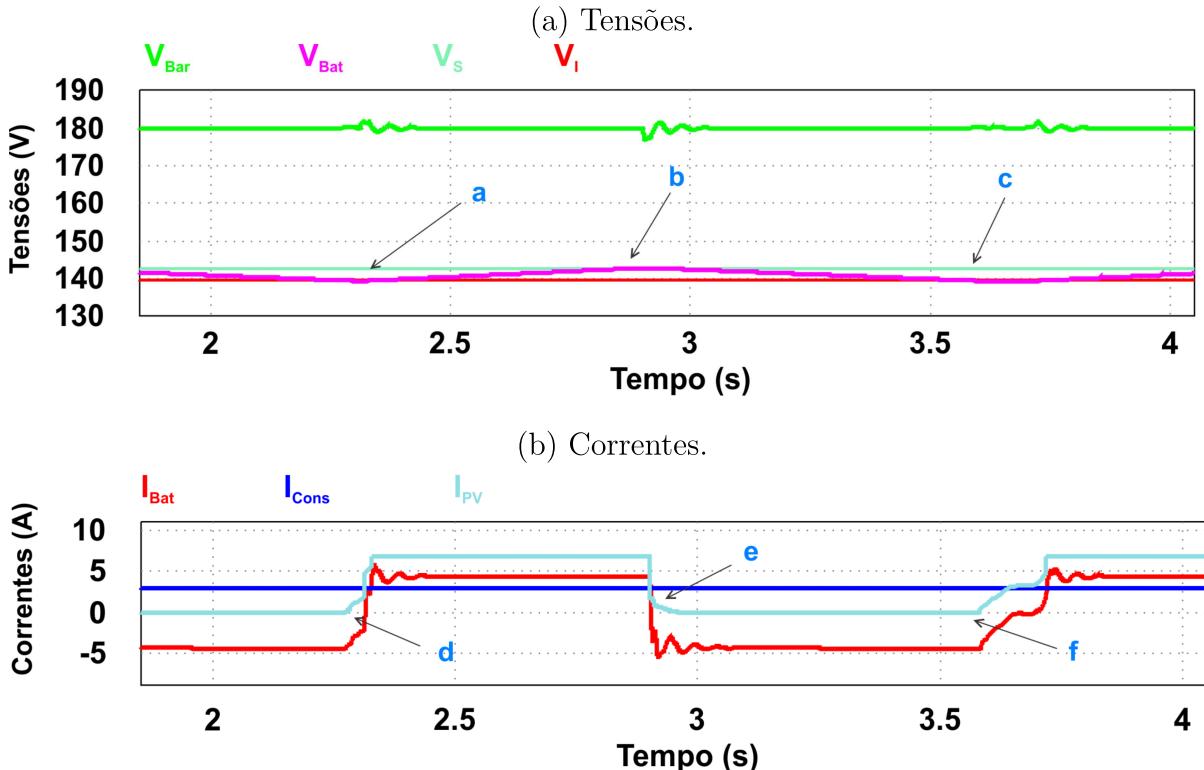
A Figura 4.25 foi gerada com recursos do próprio simulador PSIM (*Simview*) e apresenta o resultado obtido por meio do ambiente de cossimulação aqui proposto e ilustra o comportamento do conversor CC bidirecional controlando a carga e descarga da bateria sob comando do MAS, de modo que a tensão nos terminais da bateria se situe dentro da faixa SoC, de acordo com o caso em estudo. Foi adotada, nesta sessão de simulação, o TA em 1,25 ms. A Figura 4.25a mostra a tensão do barramento e da bateria ao longo do tempo:

- A curva V_{Bat} exibe o comportamento da tensão da bateria oscilando entre os limites superior e inferior do SoC sob a coordenação do MAS:
 - Nos instantes 2,24 s e 3,53 s, destacados pelos rótulos *a* e *c*, a tensão da bateria cai abaixo do limite inferior quando o MAS comanda os agentes fotovoltaicos a injetarem acréscimos de corrente no barramento CC;
 - No instante 2,85 s, destacado pelo rótulo *b*, a tensão da bateria excede o limite superior quando o MAS comanda os agentes fotovoltaicos a reduzirem a injeção de corrente no barramento CC;
- V_{Bar} indica a tensão no barramento CC estável em 180 V_{CC} ;

- V_S e V_I representam a parte superior e inferior do SoC, respectivamente.

Os tempos reportados referem-se àqueles registrados pelos simuladores individuais. A

Figura 4.25 – Resultados obtidos no conversor bidirecional CC-CC.



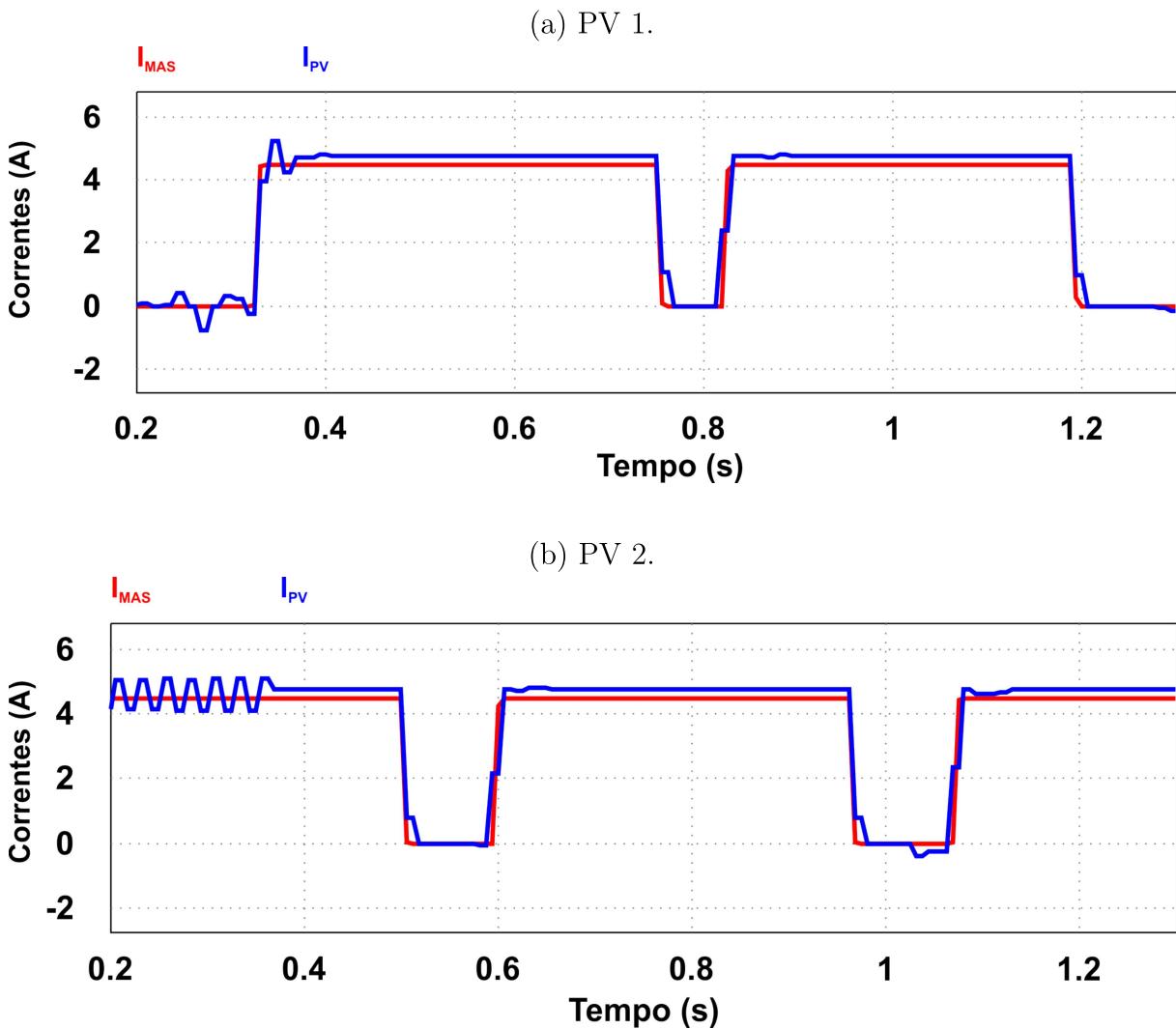
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.25b mostra o consumo total pelos consumidores, o fornecimento de corrente dos conversores fotovoltaicos e a flutuação de corrente na bateria:

- I_{PV} representa a corrente total gerada pelos painéis fotovoltaicos:
 - Nos instantes 2,27 s e 3,58 s, identificados pelos rótulos *d* e *f*, os agentes fotovoltaicos respondem ao comando do MAS para injetar corrente no barramento CC, curva I_{PV} , resultando em uma mudança na operação da bateria de descarga para carga, curva I_{Bat} ;
 - No instante 2,9 s, identificado pelo rótulo *e*, ocorre a situação oposta, pois o MAS comanda os agentes fotovoltaicos a reduzirem a injeção de corrente no barramento CC;
- I_{Bat} ilustra a flutuação da corrente da bateria ao longo do tempo;
- I_{Cons} representa o total de corrente consumida pelos consumidores.

A Figura 4.26 apresenta os gráficos de operação dos elementos do subsistema fotovoltaico. A Figura 4.26a mostra a corrente de saída do primeiro conversor controlador do PV (I_{PV}) que representa a corrente de saída do respectivo conversor, e (I_{MAS}), que denota os comandos recebidos pelo agente enviados pelo sistema multiagente ao longo de tempo e serve como referência de saída para o algoritmo de controle do conversor.

Figura 4.26 – Resultados da operação do conversor controlador dos arranjos fotovoltaicos.



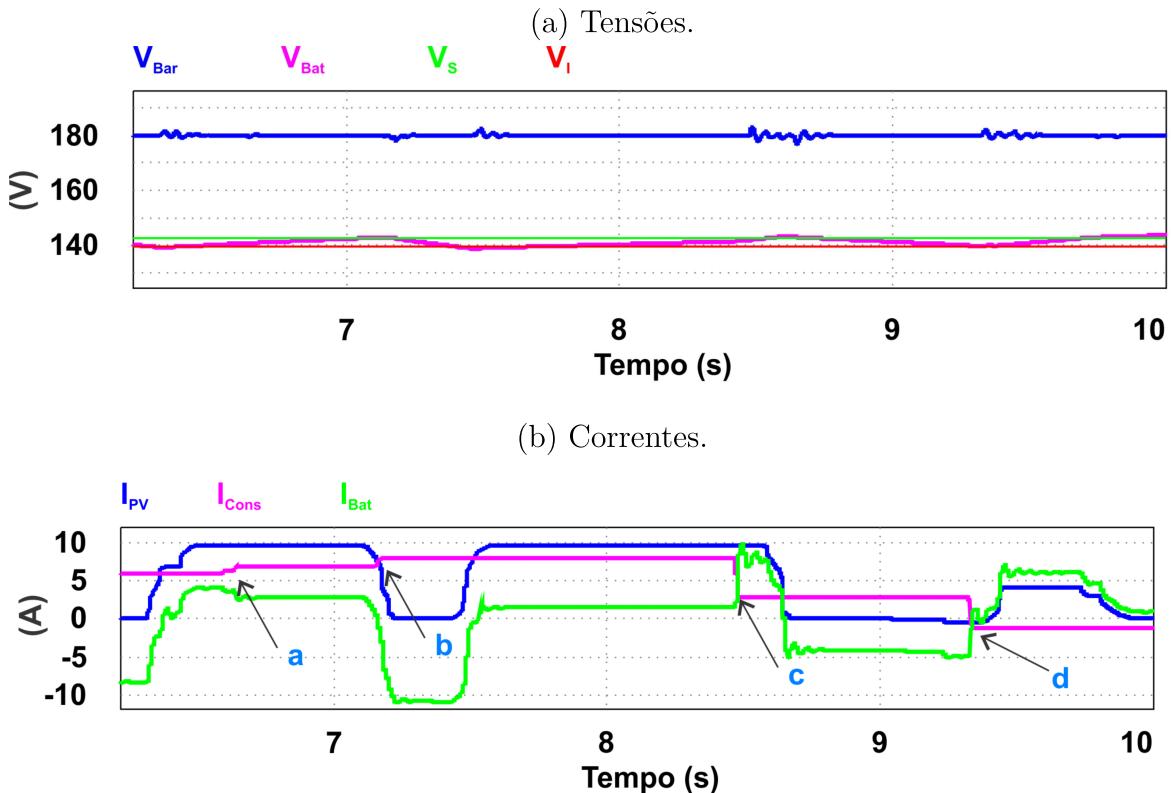
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Constata-se diferentes escalas de tempo para eventos comuns quando comparados os gráficos gerados pelos simuladores individuais configurados para os conversores bidirecional (Figura 4.25b) e unidirecional (Figura 4.26). Este fato decorre da capacidade de cada conversor simulado em executar os cálculos necessários dentro de cada passo de simulação, caracterizando a natureza da simulação como Não-Tempo Real (NTR), conforme ilustrado na Seção 2.4.

4.1.4 Efeitos e Limitações Observados

A Figura 4.27 é resultado de sessão de simulação registrada pelo conversor bidualacional e ilustra o comportamento do sistema quando há variações não previstas nos consumidores. A taxa de atualização fixa é adotada em 800 Hz . Destaca-se, na Figura

Figura 4.27 – Eventos observados com variações nos consumidores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

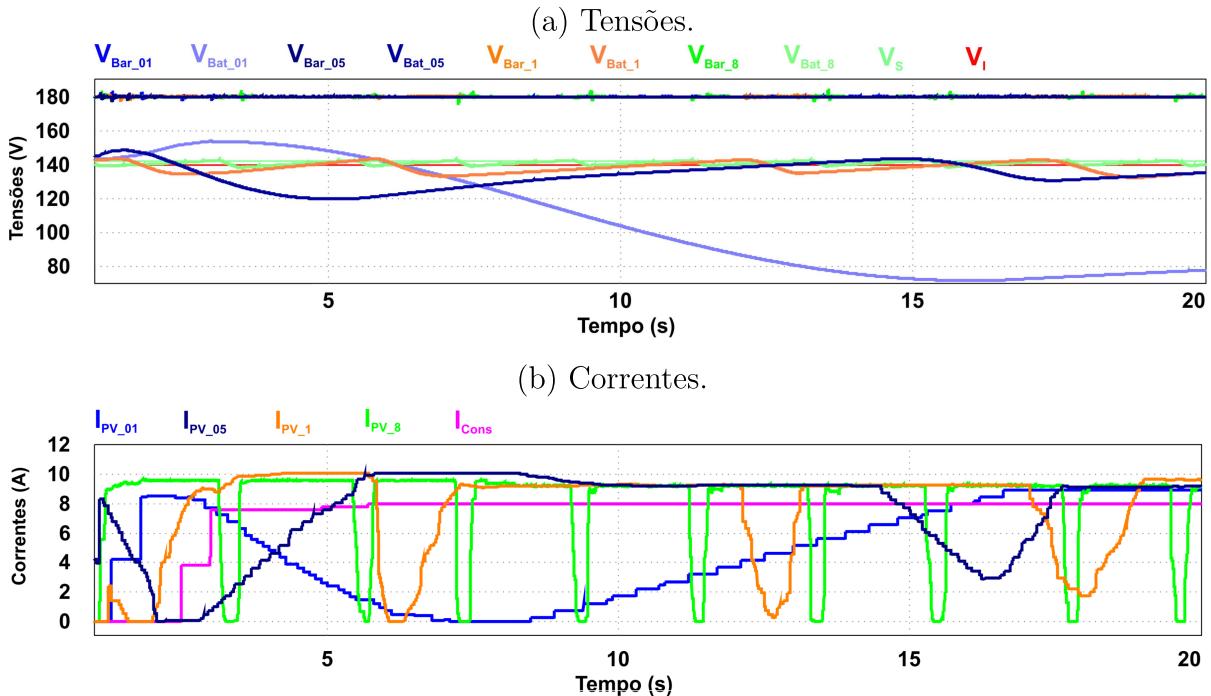
4.27a, pequenas oscilações na tensão do barramento CC coincidentemente com os eventos identificados na Figura 4.27b, em que o consumo nos consumidores oscila:

- a - de $6,0 A$ para $7,0 A$ no instante $6,58 s$;
- b - de $7,0 A$ para $8,0 A$ no instante $7,16 s$;
- c - de $8,0 A$ para $2,8 A$ no instante $8,47 s$;
- d - de $2,8 A$ para $0,0 A$ no instante $9,32 s$.

A maior oscilação proporcional na tensão do barramento CC ocorreu durante o evento c, em que a variação foi registrada na ordem de $5,05 V$ o que representa $2,8\%$ da tensão nominal.

A Figura 4.28 ilustra o resultado de uma sessão de simulação registrada pelo conversor bidirecional, assim como o comportamento do sistema quando a FA é adotada em: 10 Hz, 50 Hz, 100 Hz e 800 Hz, respectivamente. A nomenclatura adotada para as

Figura 4.28 – Comportamento do sistema à diferentes taxas de atualização.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

curvas ilustradas na Figura 4.28 é listada na Tabela 4.13. Por inspeção da Figura 4.28,

Tabela 4.13 – Nomenclatura das curvas da Figura 4.28.

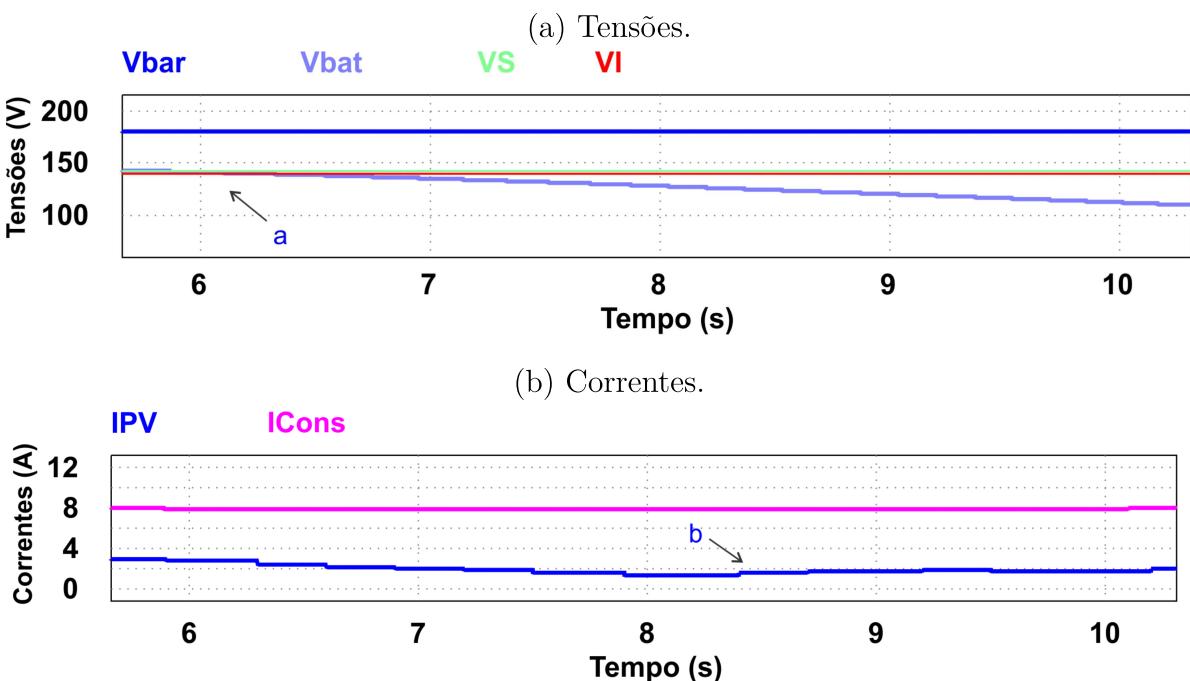
FA	Nome	Descrição
10 Hz	V_{Bat_01}	Tensão nos terminais da bateria
	V_{Bar_01}	Tensão no barramento CC
	I_{PV_01}	Corrente proveniente do arranjo fotovoltaico
50 Hz	V_{Bat_05}	Tensão nos terminais da bateria
	V_{Bar_05}	Tensão no barramento CC
	I_{PV_05}	Corrente proveniente do arranjo fotovoltaico
100 Hz	V_{Bat_1}	Tensão nos terminais da bateria
	V_{Bar_1}	Tensão no barramento CC
	I_{PV_1}	Corrente proveniente do arranjo fotovoltaico
800 Hz	V_{Bat_8}	Tensão nos terminais da bateria
	V_{Bar_8}	Tensão no barramento CC
	I_{PV_8}	Corrente proveniente do arranjo fotovoltaico
Todas	I_{Cons}	Corrente consumida nas unidades consumidoras

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

nota-se que a resposta do sistema à variações na tensão da bateria na FA em 10 Hz é relativamente lenta. Este fato contribui para que a descarga da bateria, em sua configuração conforme adotada no presente trabalho, seja rápida ao ponto do conversor bidirecional perder o controle sobre a tensão de saída. Desta forma, a simulação na FA de 10 Hz demandou um aumento na capacidade da bateria. O circuito que simula a bateria teve seu capacitor alterado de $0,8\text{ F}$ para $1,2\text{ F}$. Com isto o tempo de descarga da bateria quando da interrupção de fornecimento de energia pelo conversor controlador do arranjo fotovoltaico passa a ser compatível com a FA de 10 Hz .

A Figura 4.29 ilustra o comportamento do sistema quando a FA é adotada pelo sistema em 10 Hz . Os eventos registrados sob as etiquetas *a* e *b* nas figuras 4.29a e 4.29b

Figura 4.29 – Eventos observados à taxa de atualização de 10 Hz .

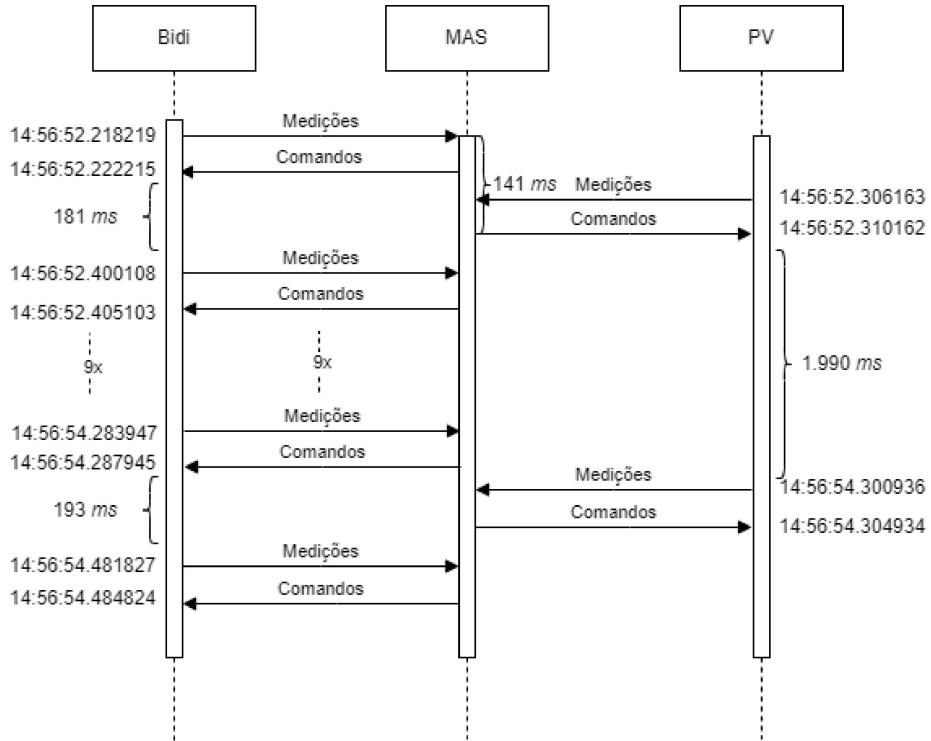


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

indicam os pontos em que a tensão da bateria cai abaixo do limite inferior do SoC e a respectiva ação resultante do conversor controlador dos arranjos fotovoltaicos, quando percebida pelo Bidi: $V_{B\text{at}} = 139,59\text{ V}$ em $t = 6,32\text{ s}$, menor que V_I . A resposta do PV chegou ao Bidi em $t = 8,41\text{ s}$. Verifica-se um atraso de $2,9\text{ s}$.

O fluxo de mensagens expresso na Figura 4.30 ilustra a troca de mensagens entre os agentes Bidi e PV com o MAS. Os tempos registrados pelo MAS de cada um dos envios constam na Figura, os quais são fieis ao tempo físico, ou seja, aquele registrado pelo relógio. Nota-se maior espaçamento temporal entre as mensagens trocadas entre PV e MAS em comparação àquelas trocadas entre Bidi e MAS. A discrepância na magnitude da diferença do tempo decorrido entre atualização do Bidi para o MAS e a respectiva

Figura 4.30 – Fluxo de mensagens trocadas entre Bidi, PV e MAS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

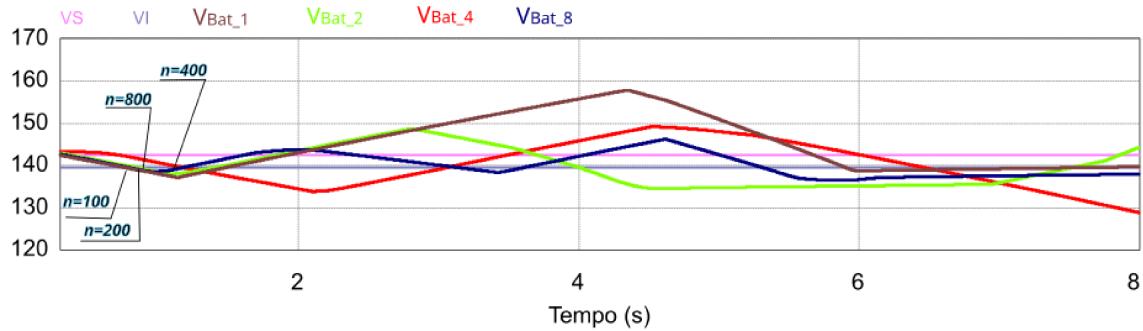
do PV para o MAS denota a natureza NTR dos conversores simulados com PSIM, caso contrário, tal diferença seria igual ao inverso da FA que no presente caso é de 0,1 s em ambos. Outro ponto a se observar é a FA entre o Bidi e o MAS, esta ocorre em média a, aproximadamente, 10,6 vezes mais rapidamente do que a mesma entre PV e MAS, sendo que o passo de simulação nesta sessão foi estabelecido em $1 \times 10^{-5} \text{ s}$ nos conversores bidirecional (agente Bidi) e unidirecional (agente PV).

A Figura 4.31 ilustra o comportamento do conversor bidirecional CC-CC, principal controlador da bateria e do barramento CC, em taxas de amostragem de 100, 200, 400 e 800 Hz, representadas por $_n$, em que $n = 1, 2, 4$ e 8 vezes 100 Hz. A Figura fornece informações sobre o impacto de diferentes frequências de amostragem no comportamento geral do sistema. As curvas são identificadas com suas respectivas taxas de amostragem de simulação, revelando três observações principais:

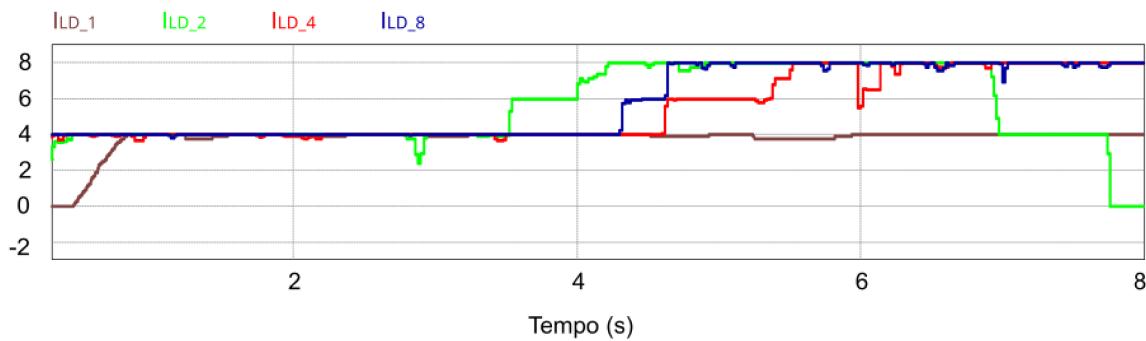
1. Frequências de amostragem mais baixas resultam em respostas mais lentas do sistema:
 - a) As curvas de tensão da bateria V_{Bat_n} apresentam desvios mais acentuados além dos limites superior e inferior do SoC, especialmente em taxas de amostragem mais baixas;
 - b) Quando a tensão da bateria ultrapassa o limite inferior do SoC, o MAS solicita mais potência aos agentes PV. As curvas V_{Bat_n} , analisadas em conjunto com

Figura 4.31 – Curvas do conversor CC-CC bidirecional para diferentes taxas de amostragem.

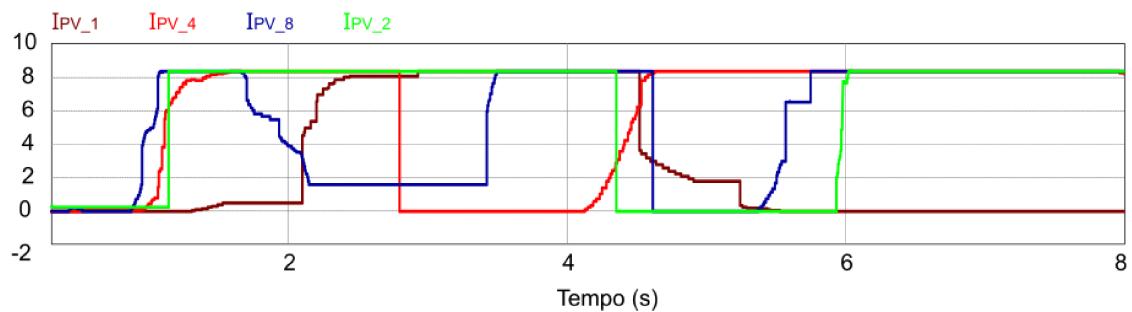
(a) Tensões na bateria.



(b) Correntes dos consumidores.



(c) Correntes dos PVs.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

I_{PV_n} , mostram o atraso na ação do PV na visão do Bidi, conforme detalhado na Tabela 4.14;

2. Relação entre taxa de amostragem e flutuação da tensão do barramento CC: taxas de amostragem mais elevadas resultam em maior flutuação da tensão do barramento CC. O MAS comunica alterações ao Bidi mais rapidamente à medida que estas ocorrem, expondo o controle primário à variações mais significativas. A curva V_{Bat_8} apresenta a maior oscilação (2,34%), seguida por V_{Bat_4} (1,55%), V_{Bat_2} (0,56%) e

Tabela 4.14 – Atraso de reação do agente PV na visão do Bidi de acordo com a taxa de amostragem.

n	Tempo do Evento (s)	Tempo de Reação de $I_{PV}(n)$ (ms)
800	1,09	60,2
400	1,08	66,5
200	0,88	74,9
100	0,86	127,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

V_{Bat_1} (0,36%). Estes eventos estão registrados nos instantes 10,0 s, 1,1 s, 1,34 s e 6,2 s, respectivamente.

4.2 ABORDAGEM COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO ADAPTATIVA

Diante das limitações da Frequência de Atualização (FA) fixa, nesta Seção analisa-se uma abordagem adaptativa, que ajusta automaticamente seu valor conforme as variações nas condições da rede de comunicação.

O algoritmo adaptativo, descrito na Seção 3.5, ajusta dinamicamente a Frequência de Atualização (FA) dos agentes em relação ao MAS. Quando atrasos significativos são detectados na rede, o algoritmo reduz a frequência de envio de informações. Essa estratégia atua no sentido de preservar a estabilidade global do sistema evitando a sobrecarga do meio de comunicação (FERNANDES *et al.*, 2024b) e assegurando uma operação mais robusta e eficiente. De forma a simular a operação do sistema, introduz-se a arquitetura utilizada nos experimentos.

A Figura 4.32 apresenta os elementos físicos que compõem o sistema, juntamente com a identificação das respectivas estações computacionais responsáveis por cada componente.

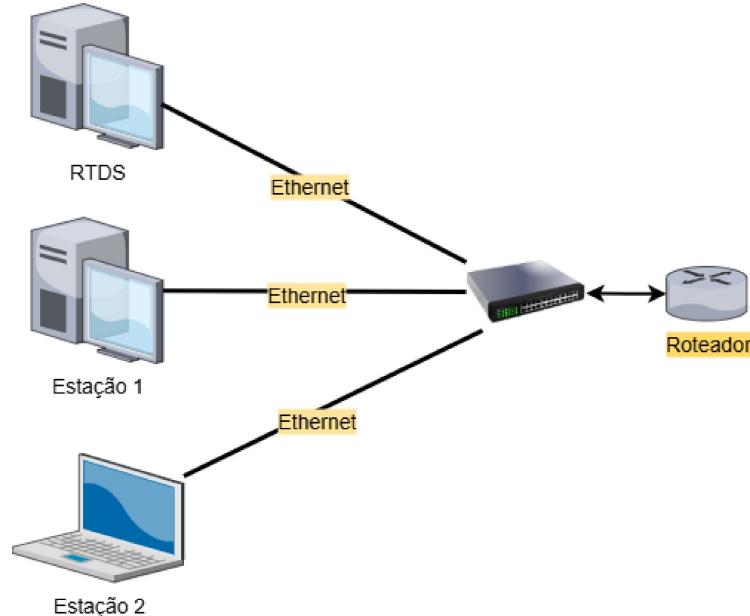
As configurações detalhadas dos computadores que executaram os simuladores estão listadas na Tabela 4.15, permitindo uma visão mais clara da infraestrutura computacional utilizada. A rede de comunicação do sistema é composta por equipamentos como *switch* e roteador, os quais realizam a conexão física entre os diversos elementos do sistema, garantindo a troca eficiente de dados entre os agentes e o MAS.

Tabela 4.15 – Hardware utilizado no experimento.

Nome	Processador	Veloc. Clock	Memória RAM
RTDS	PB5, GTNET, GPC	1,7 GHz (PB5)	-
Estação 1	Intel(R) Core(TM) i5-1135G7	2,40 GHz	8.00GB
Estação 2	Intel(R) Core(TM) i7-3770	3,40 GHz	24.0GB

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.32 – Elementos físicos do sistema cossimulador.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A alocação dos simuladores assim como instâncias independentes do mesmo simulador é listada na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Alocação dos simuladores por estação.

Nome	Simulador	Instância
RTDS	RTDS (RSCAD)	-
Estação 1	MAS	1
	PSIM	1 (PV) e 2 (Cons)
Estação 2	PLECS	1 (Bidi)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.1 Modelos de Simulação Utilizados na Abordagem com TA Adaptativa

Os simuladores mencionados são utilizados na implementação, essencialmente, de quatro tipos de conversores, conforme descrito na Seção 2.4:

- bidirecional em corrente, cujas principais atuações são:
 - regulação da tensão no barramento CC;
 - controle de carga e descarga do sistema de armazenamento de energia, o banco de baterias;
 - informação da tensão no barramento CC;
- retificador/inversor é responsável por:

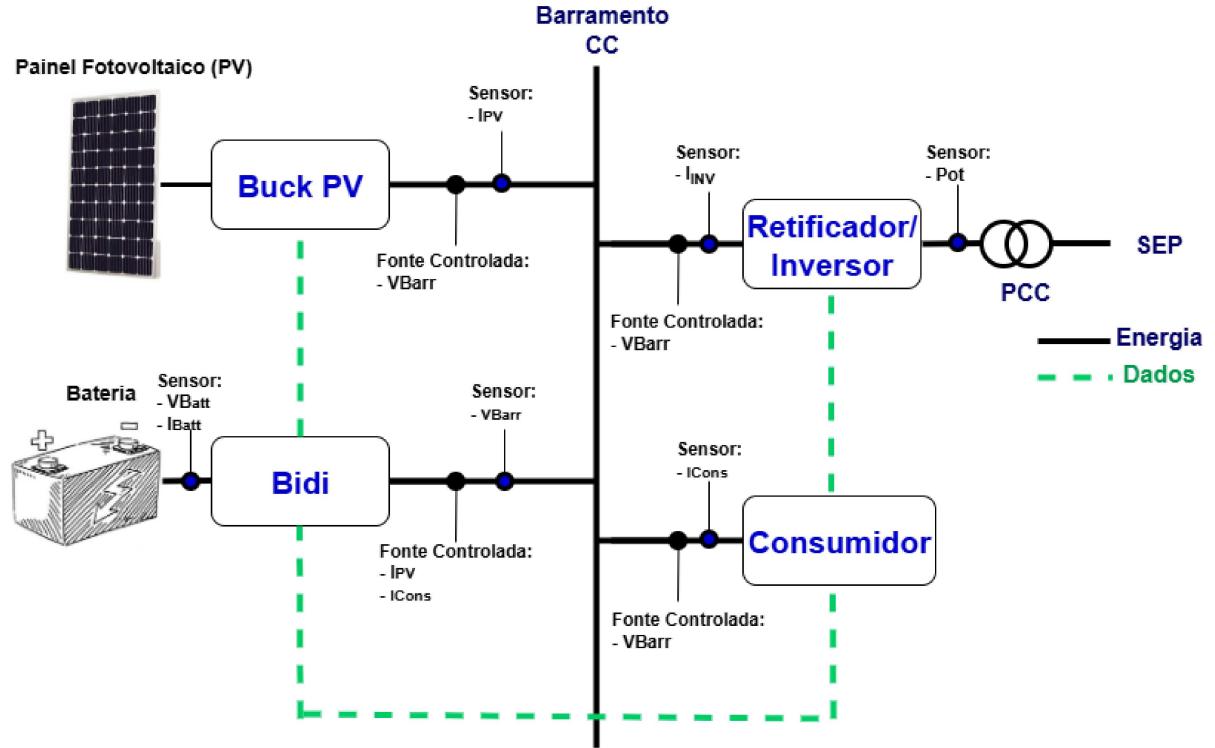
- injetar ou extrair corrente no barramento CC;
- exportar energia excedente para o SEP;
- importar energia complementar do SEP para o barramento CC;
- pela informação do valor de corrente injetada no barramento CC;
- unidirecional em corrente na configuração *Buck*, é responsável:
 - pelo controle dos painéis solares;
 - por injetar corrente no barramento CC segundo a irradiação solar em MPPT;
 - pela informação do valor de corrente injetada no barramento CC;
- e, por fim, o inversor CC/CA, que é responsável:
 - pela alimentação da carga, ou seja, o consumidor conectado ao barramento CC;
 - pela informação de corrente consumida pela carga.

A cossimulação trabalha com instâncias independentes do simulador PSIM na simulação dos conversores *Buck PV* e inversor, com o PLEC para o bidirecional e RTDS para o retificador/inversor. De forma a prover a continuidade do barramento CC entre todas as instâncias, foi adotada uma estratégia baseada em fontes controladas ilustradas na Figura 4.33. A tensão e as correntes no barramento CC são então referências aplicadas à fontes controladas de tensão e corrente nos conversores do sistema. As leituras dos sensores coletadas por cada conversor individual são compartilhadas com o MAS, o qual, por sua vez, redistribui essas informações aos demais conversores (agentes) do sistema. A variável V_{Barr} , apresentada na Figura 4.33, corresponde ao valor da tensão do barramento CC medido pelo agente bidirecional (Bidi).

A corrente no barramento CC é obtida a partir da totalização, realizada pelo MAS, das correntes I_{INV} , I_{PV} e I_{Cons} , cujas medições são fornecidas pelos respectivos agentes. As informações utilizadas como referências em cada conversor são disponibilizadas pelo MAS, conforme descrito na Seção 3.3.1. A bateria que representa o sistema de armazenamento é implementada através de um capacitor, cuja capacidade é definida em $24 F$ com tensão inicial conforme a tensão nominal adotada, em série com um resistor que representa uma resistência interna da bateria no valor de $50 m\Omega$, como é mostrado na Figura 4.34. Os terminais ilustrados com os ícones "bat+" e "bat-" indicam os respectivos pontos de conexão do subcircuito da bateria com o circuito principal do simulador. Nesta tese adota-se a tensão nominal da bateria em $720,0 V$.

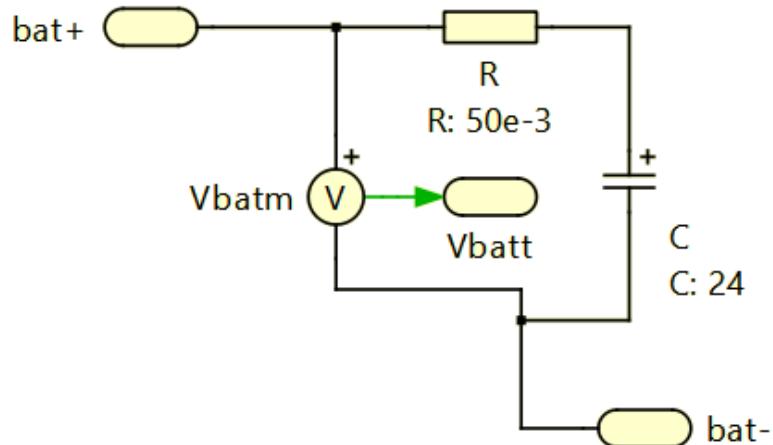
A Figura 4.35 mostra a curva de descarga da bateria adotada no ambiente de cossimulação. A curva V_{Bat} ilustra a tensão nos terminais da bateria pelo tempo de descarga, expresso em segundos (s). Nesta simulação utilizou-se uma carga controlada consumindo $40 A$ de forma a se ter uma aproximação do comportamento do cossimulador

Figura 4.33 – Continuidade do barramento CC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.34 – Subcírculo da bateria.

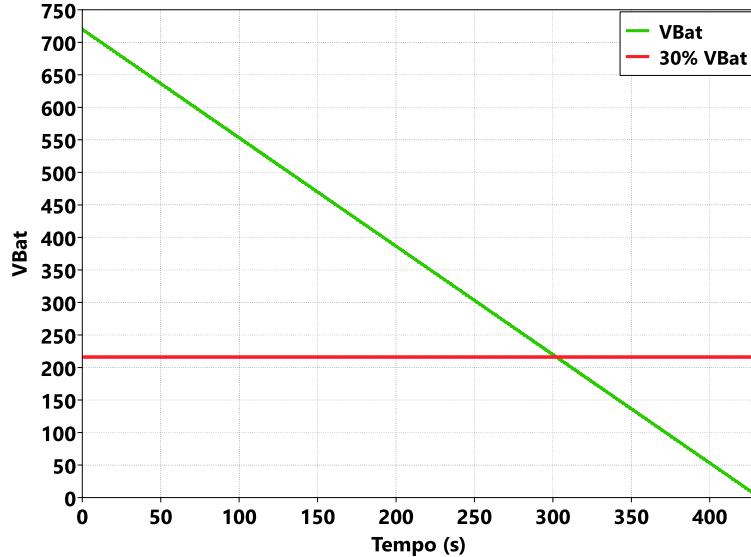


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

em uma condição de alto consumo de corrente pelos consumidores. No instante $t = 303\text{ s}$ a tensão da bateria atinge o patamar de 30%, ponto em que o circuito de controle do conversor bidirecional apresenta instabilidade na manutenção da tensão do barramento dentro do valor de referência.

A partir da Equação 2.2 chega-se à capacidade nominal de armazenamento da

Figura 4.35 – Curva de descarga da bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

bateria $Q_{nominal} = 57,9 \text{ kAs}$, obtido através de uma corrente drenada da bateria no valor de $I_{bat} = 40 \text{ A}$. A corrente foi drenada através de um resistor de $R = 18 \Omega$ tendo-se a tensão inicial da bateria em 720 V . No instante $t = 429 \text{ s}$ o nível de tensão da bateria atinge 0 V , totalmente descarregada. A energia é dada pela Equação 4.1 como

$$E = Q_{nominal} \times V_{bus} \text{ J.} \quad (4.1)$$

Substituindo $Q_{nominal}$ da Equação 2.2 na Equação 4.1, a capacidade da bateria em kWh é dada por

$$\begin{aligned} E &= 57,9 \text{ k C} \times 900 \text{ V} \\ &= 52,11 \text{ MJ} \\ &= 121,47 \text{ kWh}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

A partir da Equação 2.1, chega-se ao SoC de

$$\begin{aligned} SoC(303) &= SoC(0) - \frac{Q(303)}{Q(429)} * 100\% \\ &= 100\% - \frac{30,56}{52,11} \\ &= 41,2\% \end{aligned} \quad (4.3)$$

no instante $t = 303 \text{ s}$. Analogamente, no instante 303 s , $Q_{nominal} = 30,56 \text{ kAs}$.

Foram desenvolvidos no âmbito desta tese a base teórica e cálculos detalhados sobre a construção dos conversores utilizados no ambiente de cossimulação, os quais são encontrados no Apêndice. A seguir são encontrados os valores utilizados na configuração nos conversores utilizados nesta tese.

4.2.2 Parâmetros adotados no sistema

A modelagem dos conversores de potência utilizados nesta tese é encontrada no Capítulo A com base nos parâmetros definidos: parâmetros de operação do conversor unidirecional em corrente em modelo médio, Tabela 4.17; parâmetros de operação do

Tabela 4.17 – Lista de parâmetros utilizados no conversor unidirecional, em corrente em modelo médio.

Parâmetro	Unidade	Valor
Tensão de entrada(V_0)	Volt	1350,0
Tensão de saída (V_s)	Volt	900,0
Corrente de saída (I_0)	Ampère	35,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

conversor bidirecional em corrente em modelo médio na Tabela 4.18 e parâmetros de

Tabela 4.18 – Lista de parâmetros utilizados no conversor bidirecional em corrente em modelo médio.

Parâmetro	Unidade	Valor
Tensão de entrada(V_0)	Volt	720,0
Tensão de saída (V_s)	Volt	900,0
Corrente de saída (I_0)	Ampère	40,0
Capacidade	kW	36

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

operação do conversor retificador/inversor em modelo médio na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Lista de parâmetros utilizados no conversor retificador/inversor em modelo médio.

Parâmetro	Unidade	Valor
Tensão de entrada CC (V_{CC})	Volt	900,0
Tensão de entrada CA (V_{Linha})	Volt	491,0
Tensão de saída CC (V_{CC})	Volt	900,0
Tensão de saída CA (V_{Linha})	Volt	491,0
Corrente de saída CC (I_{CC})	Ampère	40,0

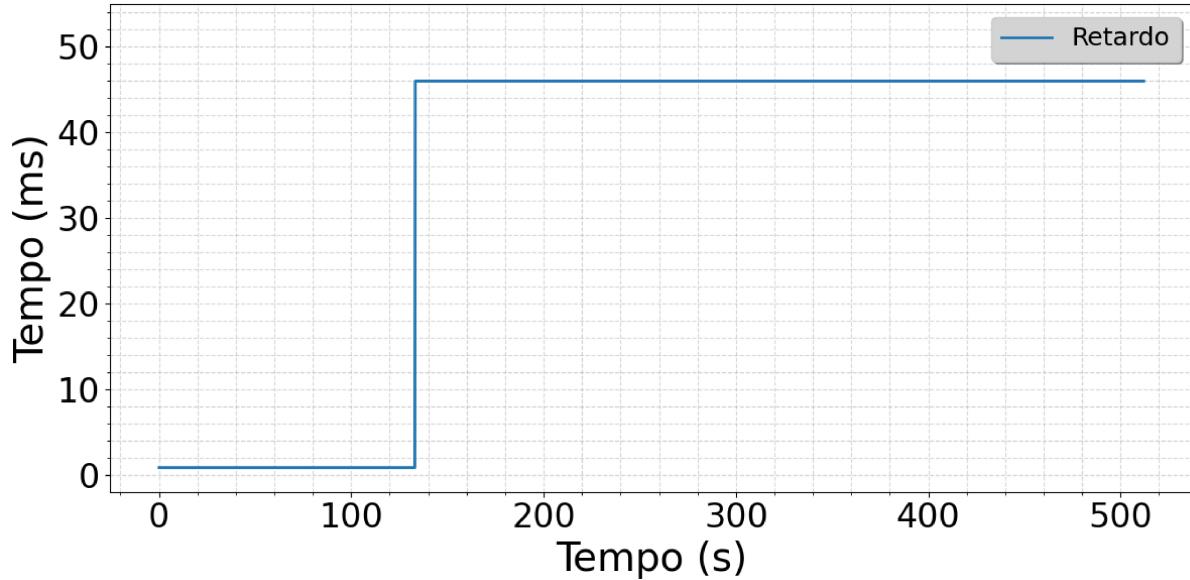
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.3 Atrasos simulados no meio de comunicação

Condições adversas de rede podem levar à degradação do canal de comunicação e a um consequente aumento nos atrasos de propagação das informações trocadas entre os elementos do sistema. Para avaliar esses cenários, utilizou-se o simulador NS-3 (ns-3 Consortium, 2023), responsável por modelar o desempenho da rede de comunicação e

fornecer ao sistema informações de atraso, de modo a permitir a análise de seu impacto. A Figura 4.36 apresenta o atraso de comunicação parametrizado no simulador, mais especificamente na camada de controle superior, entre os agentes e o MAS. O *script*

Figura 4.36 – Simulação de retardo na rede de comunicação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

de simulação do NS-3, `wifi-spectrum-per-example.cc` (NS-3 Consortium, 2023), foi executado com o objetivo de validar o referido atraso adotado no ambiente de cossimulação, utilizando os parâmetros listados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Parâmetros utilizados na sessão de simulação NS-3.

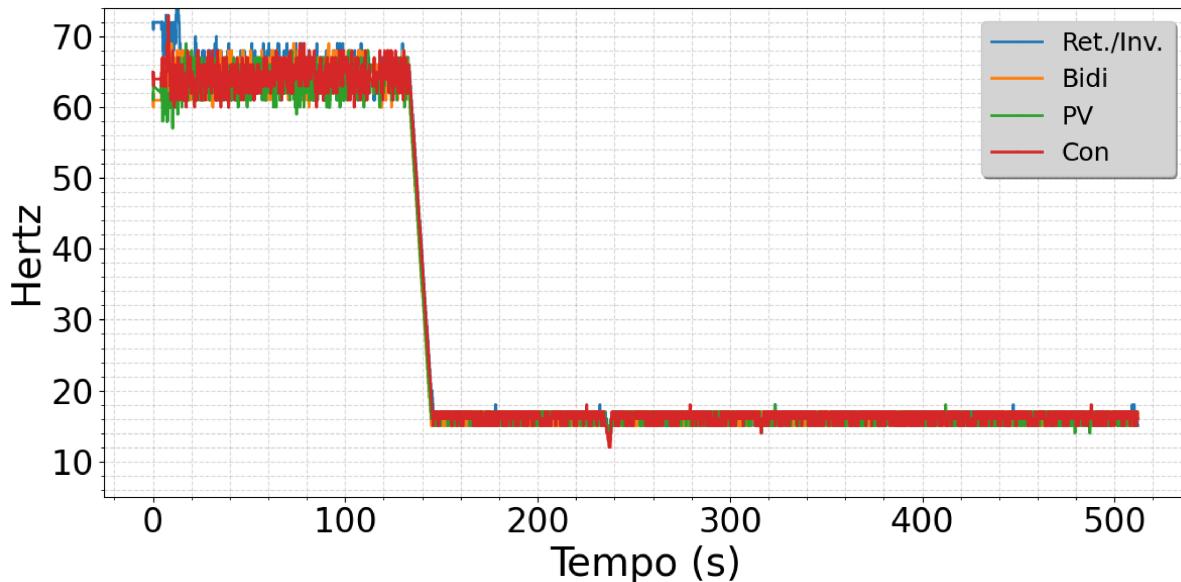
Parâmetro	Valor
Tipo de WiFi	ns3::SpectrumWifiPhy
Distância	50 m
Potência de Transmissão	1 dBm (1,3 mW)
Taxa de Dados	7,2 Mb/s
Vazão	5 Mb/s
Largura de Banda do Canal	20 MHz
Força do Sinal	-79,74 dBm
Nível de Ruído	-93,97 dBm

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com a incidência de retardos no meio de comunicação, observa-se um aumento significativo no RTT quando ocorrem retransmissões de pacotes. Em condições normais de operação, os valores de RTT se mantêm em torno de 0,84 ms. Entretanto, em cenários com retransmissões, o RTT pode alcançar até 46 ms. Esse resultado evidencia o impacto das retransmissões na latência de comunicação dentro da rede, sendo esse pico utilizado para

simular uma saturação momentânea do canal de comunicação. Foi adotada nesta sessão de simulação a FA básica em 100 Hz , a qual é dinamicamente ajustada pelo algoritmo adaptativo da FA no decorrer da sessão de simulação, conforme ilustrado na Figura 4.37. Apesar dessa degradação temporária, não foi verificada perda de sincronização. Essa resiliência é atribuída ao sequenciamento determinístico das mensagens realizado pelo servidor do MAS, aliado à redução adaptativa das taxas de atualização. Em conjunto, esses mecanismos garantem o desempenho confiável do sistema mesmo em condições adversas de rede. Os tempos reportados referem-se àqueles registrados pelos simuladores individuais. O parâmetro de latência, em ms , é aquele obtido na simulação ilustrada na Figura 4.36.

Figura 4.37 – Frequências de atualização dos agentes ao MAS na presença de latência no meio de comunicação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.4 Diferenças de parametrização em relação à TA fixa

O sistema é avaliado sob duas abordagens distintas: a taxa de atualização fixa e a taxa de atualização adaptativa. Na estratégia de taxa fixa, a frequência de amostragem permanece constante, independentemente das condições do meio de comunicação. Assim, quando ocorre aumento de retardo na rede por motivos diversos - incidência de ruído, *jitter*, perdas de sincronismo, conflitos no uso do meio de comunicação pelos diversos usuários, entre outros -, o sistema tende a sofrer degradações de desempenho, já que a taxa fixa não compensa a perda de qualidade do canal. Como consequência, a eficiência global do sistema se mantém, em média, inferior àquela obtida com a taxa de atualização adaptativa, que ajusta dinamicamente a frequência de envio de informações de acordo com

as variações do retardo no meio de comunicação, garantindo maior robustez e desempenho operacional.

As simulações dos sistemas nas duas abordagens apresenta parametrizações distintas, a saber:

- A Tabela 4.21 lista as principais características do sistema em uma primeira abordagem em TA fixo:

Tabela 4.21 – Parâmetros utilizados em uma primeira abordagem da MR em ambiente de cossimulação.

Parâmetro	valor	unidade
Tensão de barramento	180	V
Tensão da bateria	144	V
Conversor Bidirecional	1	Unidade
Conversor Unidirecional	2	Unidade
Consumidor	2	Unidade
Conexão ao SEP	0	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- A Tabela 4.22 lista as principais características do sistema em uma segunda abordagem em TA fixo:

Tabela 4.22 – Parâmetros utilizados em uma segunda abordagem da MR em ambiente de cossimulação.

Parâmetro	valor	unidade
Tensão de barramento	900	V
Tensão da bateria	720	V
Conversor Bidirecional	1	Unidade
Conversor Unidirecional	1	Unidade
Consumidor	1	Unidade
Conexão ao SEP	1	Unidade

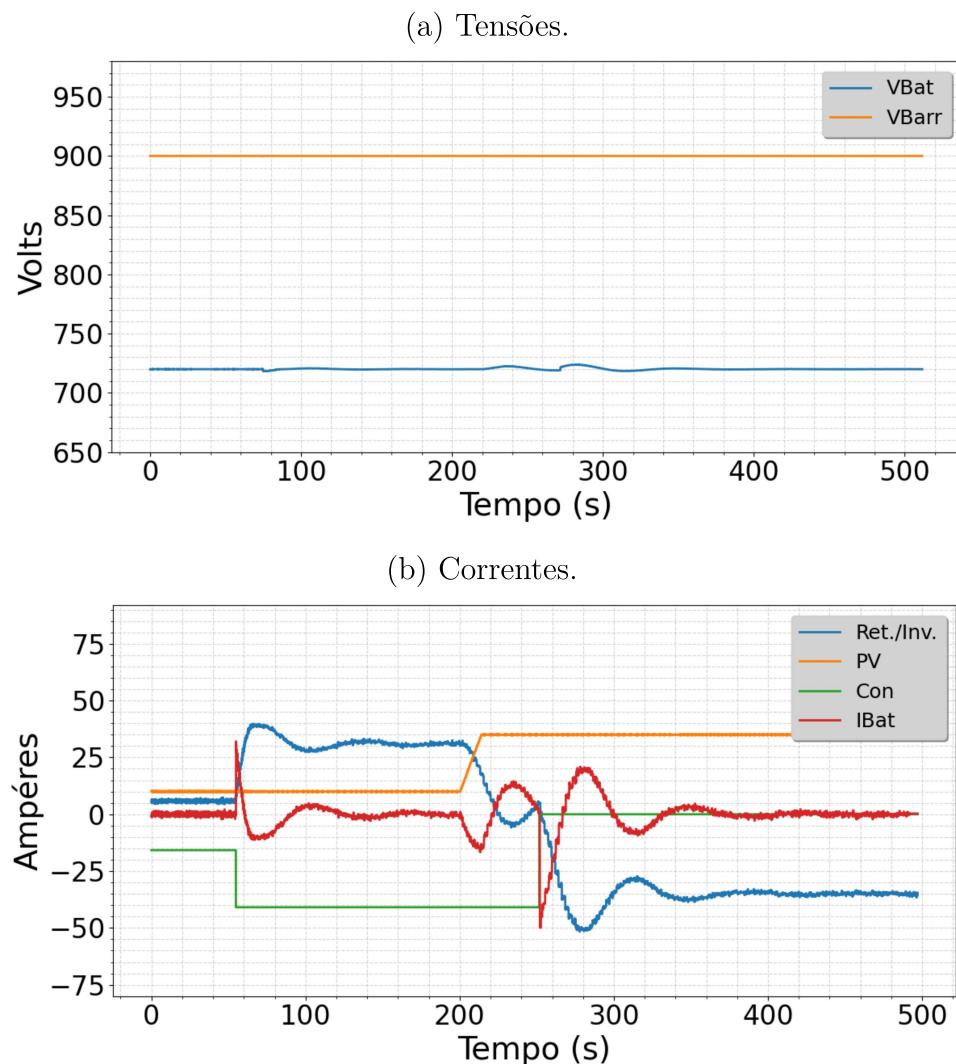
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3 RESULTADOS GERAIS COM TAXA DE ATUALIZAÇÃO ADAPTATIVA

A presente Seção apresenta os resultados obtidos no ambiente de cossimulação considerando o método de TA adaptativo em operação. Para isso, são realizadas simulações utilizando o sistema de Corrente Contínua para Corrente Alternada (CC-CA), projetado para converter de forma eficiente a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos em energia utilizável para a pequena vila hipotética descrita na Seção 3.1, além de realizar, de maneira dinâmica, a importação ou exportação de energia para o SEP.

A Figura 4.38, gerada por meio do banco de dados do MAS, apresenta o resultado obtido no ambiente de cossimulação aqui proposto e ilustra o comportamento sistema. Como destaque, o conversor CC-CC bidirecional em corrente (Agente Bidi) controla a carga e descarga da bateria como resultado da ação do MAS sobre o conversor retificador/inversor (Agente INV) que faz a interface com o SEP. A tensão nos terminais da bateria é mantida nas proximidades do valor de referência definido no caso em estudo, 720 V, conforme ilustrado na Figura 4.38a. Esta Figura mostra as tensões do barramento e da bateria ao

Figura 4.38 – Resultados obtidos no ambiente de cossimulação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

longo do tempo:

- A curva V_{Bat} exibe o comportamento da tensão da bateria sob a coordenação do MAS, o qual comanda o INV a importar ou exportar energia do barramento CC ao SEP seguindo a dinâmica do sistema;
- V_{Barr} indica a tensão no barramento CC estável em 900 V controlada pelo Bidi.

A Figura 4.38b apresenta as componentes de corrente que circulam no barramento CC, abrangendo o consumo do consumidor, o fornecimento de corrente pelos conversores fotovoltaico e retificador/inversor, além da corrente de carga e descarga da bateria, como detalhado a seguir:

- *Ret./Inv.* ilustra a atuação do retificador/inversor (INV) na dinâmica da corrente do barramento CC, que opera com base nos comandos recebidos do nível superior de controle, isto é, do MAS. Nos intervalos de tempo entre 4 s e 244 s e entre 263 s e 272 s, quando a dinâmica do sistema resulta momentaneamente em excedente de energia, o retificador/inversor exporta potência para o SEP. ; Nota-se no instante 329 s o acréscimo de exportação de energia do SEP, uma vez que neste mesmo instante houve uma súbita redução de consumo pelo *Con.*;
- *PV* representa a corrente gerada pelo conversor controlador do painel fotovoltaico:
 - Inicialmente o *PV* gera 10 A simulando uma determinada conversão resultante da insolação solar presente;
 - No instante 181 s simula-se crescimento da insolação solar resultando na transição de 10 A para 35 A no barramento CC devido à ação do MPPT, resultando em uma mudança na dinâmica do sistema, em que a corrente rapidamente absorvida pela bateria contribui na estabilidade do sistema, seguida pela ação do MAS ao comandar o INV na redução de fornecimento de energia para o barramento CC;
- *Con* representa a corrente consumida pelo conversor controlador (Agente Con) do consumidor:
 - Inicialmente o consumo de energia pelo consumidor em 16 A salta para 40,5 A no instante 29 s, o que provoca ações coordenadas no sistema: primeiramente pelo controle local do conversor CC bidirecional em corrente que provê energia ao barramento CC proveniente da bateria, seguido pelo controle superior (MAS) que comanda o INV a importar energia do SEP;
 - No instante 328 s há uma queda brusca no consumo de energia pelo *Con* o que provoca ação rápida do Bidi seguido pelo MAS que comanda o INV à exportar energia para o SEP, no sentido de manter o sistema estável;
- I_{Bat} ilustra a flutuação da corrente da bateria ao longo do tempo.

4.4 COMPARAÇÃO DIRETA ENTRE TA FIXO E ADAPTATIVO

Em análise comparativa entre os métodos de comunicação com taxa de atualização fixa e adaptativa, verifica-se diferenças relevantes no desempenho do sistema. No método

de Tempo de Atualização (TA) fixo, o comportamento depende diretamente da frequência de atualizações escolhida: taxas elevadas podem sobrecarregar o meio de comunicação, enquanto taxas reduzidas prejudicam a resposta dinâmica do controle. A escolha é, portanto, um método empírico. Já o TA adaptativo ajusta automaticamente a frequência de atualização conforme as condições instantâneas de latência no meio de comunicação, selecionando de forma autônoma o valor mais apropriado. Dessa forma, o sistema mantém operação estável e robusta, mesmo sob variações no atraso da comunicação entre os elementos do sistema.

Na abordagem adaptativa, a frequência de atualização é limitada no escopo desta tese entre 1 Hz e 100 Hz , faixa que se mostrou adequada às condições da rede utilizada no ambiente laboratorial.

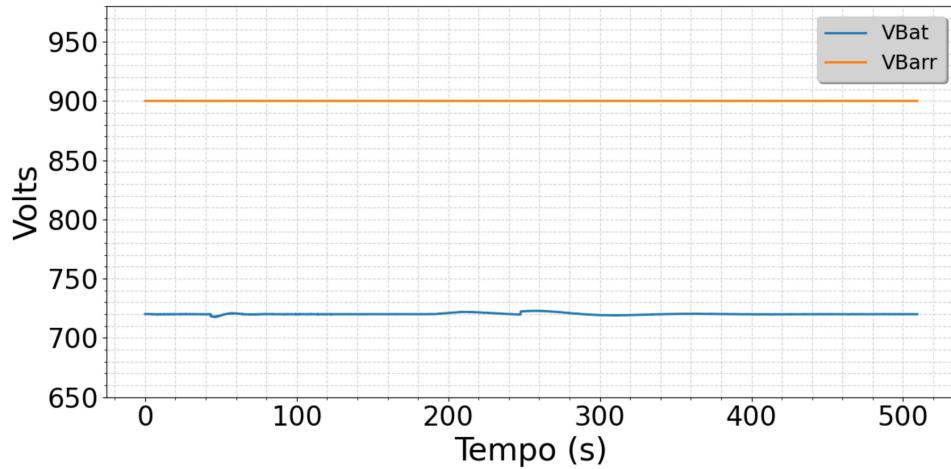
Para validar a eficácia da solução proposta, realiza-se uma comparação entre as abordagens de TA fixo e adaptativo. Para isso, os parâmetros de ambos os métodos são compatibilizados conforme apresentado na Tabela 4.22, incluindo a arquitetura dos conversores listados nesta Tabela. Os resultados obtidos a seguir permitem uma comparação direta com aqueles apresentados na Seção 4.3.

A Figura 4.39 ilustra o cenário em que a MR opera com um TA fixo, utilizado como referência para comparação com o cenário discutido na Figura 4.38. Os mesmos parâmetros da rede de comunicação apresentados na Tabela 4.20 foram aplicados neste cenário como base para a definição do atraso no meio de comunicação. Uma taxa de atualização fixa de 30 Hz foi escolhida como ponto de operação representativo, adequada para lidar com as dinâmicas do sistema associadas aos atrasos de comunicação, tanto antes quanto após uma variação abrupta. As Figuras 4.39b e 4.38b ilustram, respectivamente, os cenários com taxa de atualização adaptativa e fixa, em que são comparados em termos de seus tempos de acomodação após uma variação súbita de carga. Uma mudança na carga do consumidor aciona uma resposta imediata da bateria (T_1 e T_2 na Tabela 4.23), enquanto o retificador/inversor requer os intervalos de tempo necessários para atingir seus novos pontos de operação em regime permanente, ST_1 e ST_2 , dentro da margem operacional de 5%. Esses tempos de acomodação refletem o atraso de coordenação introduzido pelo MAS quando opera sob taxas de atualização adaptativa e fixa. Com base na razão entre os tempos de acomodação antes e depois da variação no atraso do meio de comunicação em ambos os cenários, é importante observar que a tensão do barramento CC permanece estável, conforme observado na Figura 4.36. A Tabela 4.23 resume os tempos de acomodação observados para ambos os métodos, listando na coluna *Média* a variação média dos tempos de acomodação entre eventos ocorridos antes e depois da mudança nas condições de atraso de comunicação, representadas por T_1 e T_2 .

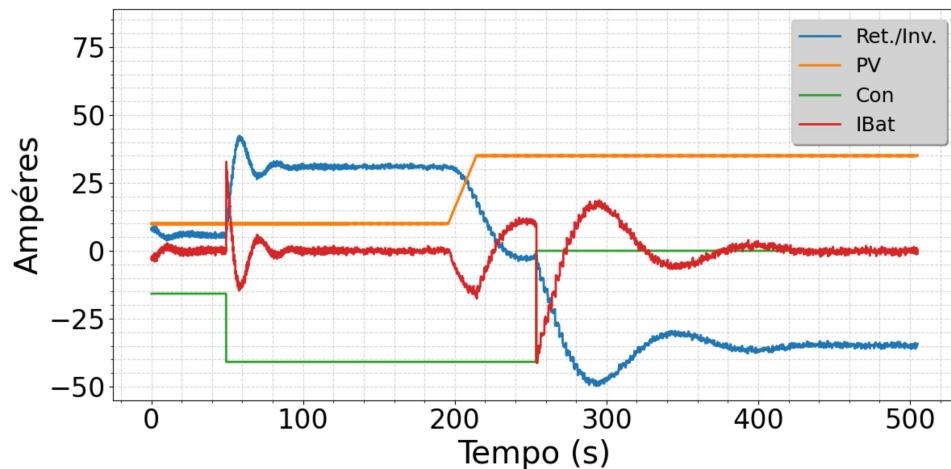
De modo geral, os resultados demonstram que a estratégia de taxa de atualização adaptativa proporciona um desempenho dinâmico superior em comparação com a

Figura 4.39 – Sistema operando sob taxa de atualização fixa.

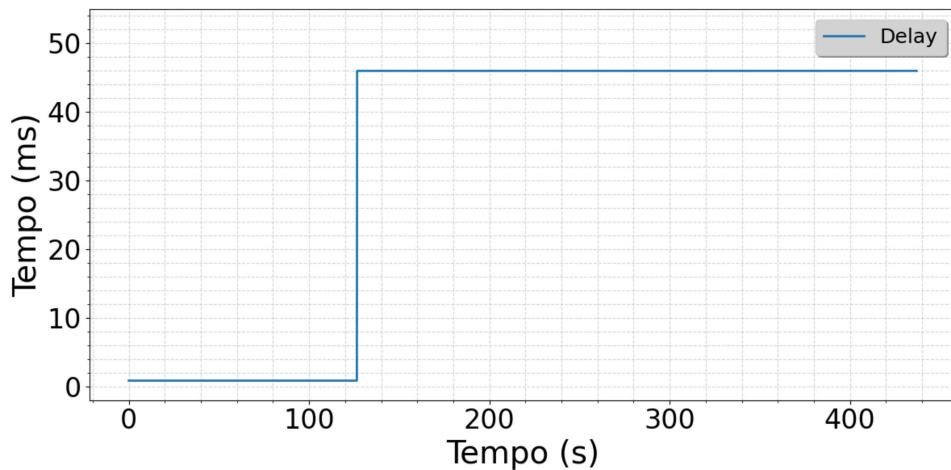
(a) Perfis de tensão.



(b) Perfis de corrente.



(c) Perfil de atraso do canal de comunicação, definido com base na simulação NS-3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 4.23 – Comparaçāo entre taxas de atualizaçāo adaptativa e fixa.

Método	Figura	T1 (s)	ST1 (s)	T2 (s)	ST2 (s)	Média
Adaptativa	4.38b	54	138,0	252	349,7	90,9 s
Fixa	4.39b	43	92,6	247	393,2	98,0 s

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

abordagem de taxa fixa usada como referência. Embora ambos os métodos mantenham a estabilidade de tensão e corrente, o método adaptativo reduz significativamente o tempo médio de acomodação ao longo da operação, durante a ocorrência de eventos transitórios, garantindo uma coordenação mais rápida entre os agentes e uma resposta mais eficiente dos sistemas de inversor e bateria. Ao ajustar dinamicamente a frequência de comunicação sob diferentes condições de rede — incluindo cenários degradados —, a abordagem proposta mitiga o impacto dos atrasos e aumenta a eficiência do controle distribuído em ambientes de MRs.

4.5 ANÁLISES DE CONTINGÊNCIA

A energia elétrica é um recurso essencial para o funcionamento da sociedade, sendo indispensável para a operação contínua de sistemas produtivos, serviços públicos e infraestrutura crítica. Nesse contexto, torna-se fundamental que a MR disponha de mecanismos de contingência capazes de assegurar a continuidade do serviço mesmo em condições adversas, como falhas de componentes ou perturbações na rede. Tais mecanismos devem resguardar tanto a integridade dos elementos do sistema quanto a segurança de seus usuários, contribuindo de forma decisiva para a resiliência operacional da Microrrede (MR).

4.5.1 Cenários de Contingência Considerados

Considerando a importância da energia elétrica para a manutenção das atividades sociais e produtivas, a MR deve incorporar mecanismos de contingência que garantam sua operação contínua, mesmo diante de eventos que possam comprometer seu desempenho.

Entre os principais fatores capazes de afetar a estabilidade da MR, destacam-se:

- O meio de comunicação, composto por dispositivos eletrônicos sujeitos a intempéries, cujas instalações estão sujeitas a eventos climáticos capazes de causar danos e interromper o canal de comunicação;
- O canal de comunicação, cuja qualidade de transmissão pode ser degradada por interferências eletromagnéticas, resultando em aumento de erros, perda de pacotes ou, em casos extremos, até a interrupção total do enlace;
- O conversor de potência, componente suscetível a falhas que podem comprometer seu funcionamento e, consequentemente, interromper a comunicação com o MAS.

Alguns mecanismos de detecção de falhas são comumente adotados na indústria, tal como o Protocolo Simples de Gerenciamento de Rede (SNMP) (GORALSKI, 2017), que é um protocolo padrão da família TCP/IP usado para gerenciar e monitorar dispositivos de rede, como servidores, roteadores e *switches*. Entretanto, nesta tese adotou-se o princípio da ausência de comunicação: uma vez que o MAS deixa de receber comunicação por um período de tempo tal que configure queda no canal de comunicação, ações contingenciais são tomadas. Dentre as variáveis monitoradas pelo sistema, destaca-se a tensão no barramento CC, uma vez que esta é compartilhada com outros componentes da MR.

O controle da tensão no barramento CC na MR depende fortemente do segundo nível de controle, situado no MAS, e do conversor retificador/inversor. O MAS controla o SoC da bateria através de comandos para injetar ou extraír energia do barramento CC enviados a este conversor. Desta forma, contingenciar a operação do MAS e do conversor retificador/inversor é importante para manter condições mínimas de operação da MR e preservar a segurança de seus elementos e usuários. Na Seção 4.5 são simulados dois cenários de contingência:

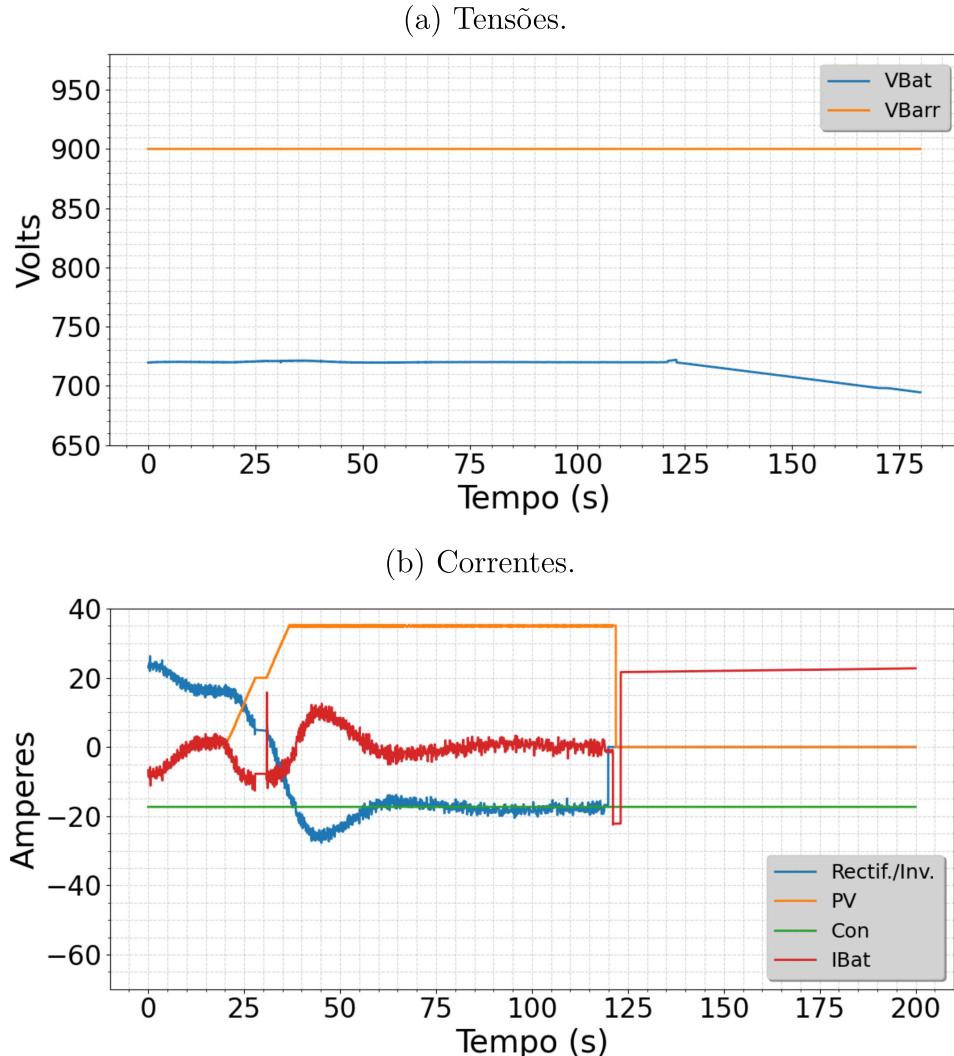
1. A comunicação entre o conversor retificador/inversor e o MAS é perdida;
2. A operação ilhada é ativada na MR.

4.5.2 Falhas de Comunicação

A Figura 4.40 ilustra o cenário em que ocorre uma queda na comunicação entre o agente ret/inv e o MAS. No instante 121 s observa-se na Figura 4.40a o declínio da tensão nos terminais da bateria do sistema, resultado da ação tomada pelo MAS em que é comandado ao agente PV que interrompa o fornecimento de energia para o barramento CC. As correntes, neste mesmo instante, são observadas na Figura 4.40b:

- A curva Retif./Inv. mostra a interrupção do fornecimento de corrente pelo conversor retificador/inversor na ocorrência da falha;
- A curva PV, igualmente, ilustra a interrupção no fornecimento de corrente ao barramento CC;
- A curva Con indica o funcionamento normal do consumidor que continua a consumir carga do barramento durante o evento de falha na comunicação ocorrido no instante 121 s;
- A curva IBat destaca a inversão sofrida no sentido da corrente em seus terminais na ausência de fornecimento de corrente pelos conversores citados, o que é usado pelo conversor bidirecional em corrente para manter a estabilidade da tensão no barramento.

Figura 4.40 – Cenário de contingência em caso de falha na comunicação.



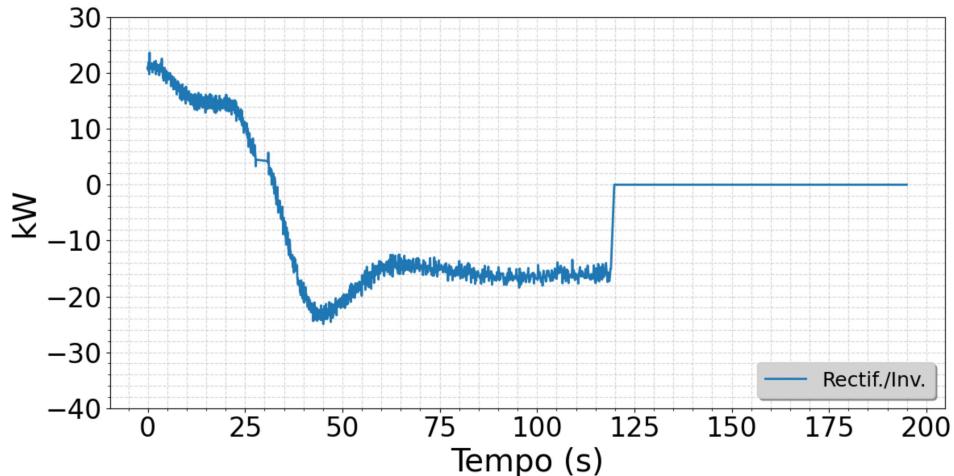
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 4.41 mostra o comportamento do retificador/inversor na conexão com o SEP na ocorrência de queda na comunicação no instante 121 s. Em virtude do risco de desestabilização da tensão no barramento CC, uma vez que o MAS perde a capacidade de controlar a injeção ou exportação de energia deste barramento, esta ação se faz necessária.

4.5.3 Operação em Modo Ilhado

Em outro cenário de falha, o conversor retificador/inversor apresenta falha interna submetendo a MR ao funcionamento em modo ilhado (PINHEIRO, 2020). A Figura 4.42a ilustra o comportamento das tensões observadas pelo conversor bidirecional em corrente, em que, no instante 100 s ocorre o ilhamento. É então observado o início da elevação da tensão nos terminais da bateria do sistema. De forma a evitar-se a perda de controle da tensão no barramento pelo conversor bidirecional em corrente, adota-se

Figura 4.41 – Comportamento do Retificador/Inversor em caso de falha na comunicação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

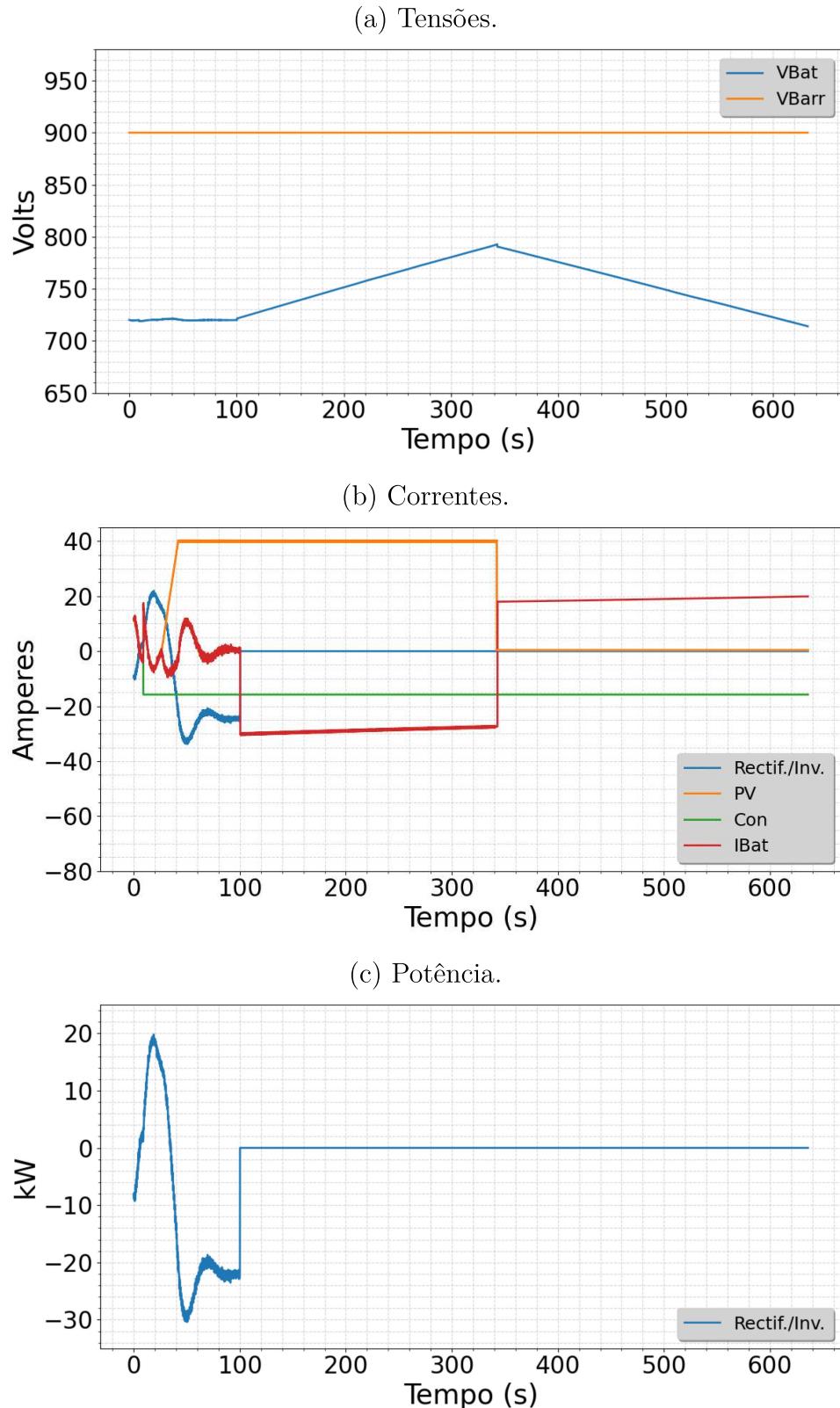
a observação de limite de tensão V_{Bat} máxima pelo MAS. No presente estudo de caso, adotou-se o valor de 10 % incrementais em relação à tensão nominal da bateria, ou seja: $V_{Bat} = 720 * 1,1 V$. No instante 342 s tal limite é atingido o que ocasiona uma reação do MAS, em que é comandado ao agente PV que desative a injeção de corrente no barramento CC pelo conversor unidirecional em corrente. Desta forma, preserva-se a estabilidade do sistema até que a operação da MR seja reestabelecida ou que a tensão da bateria atinja o mínimo tolerado. A Figura 4.42b ilustra o comportamento das correntes no decorrer do tempo em que ocorre o ilhamento do sistema em função de uma falha no conversor retificador/inversor. A Figura 4.42c ilustra o comportamento do sistema na conexão com o SEP.

4.6 RESPOSTA SOB CONDIÇÕES CRÍTICAS

A Microrrede (MR) em estudo possui duas fontes de energia, em que uma delas trabalha sob coordenação do MAS, o retificador/inversor, e a outra, o *PV*, trabalha de forma autônoma por meio do algoritmo MPPT. O cenário a seguir explora a situação em que uma das fontes, o *PV*, varia sua produção em função de variação na irradiação solar.

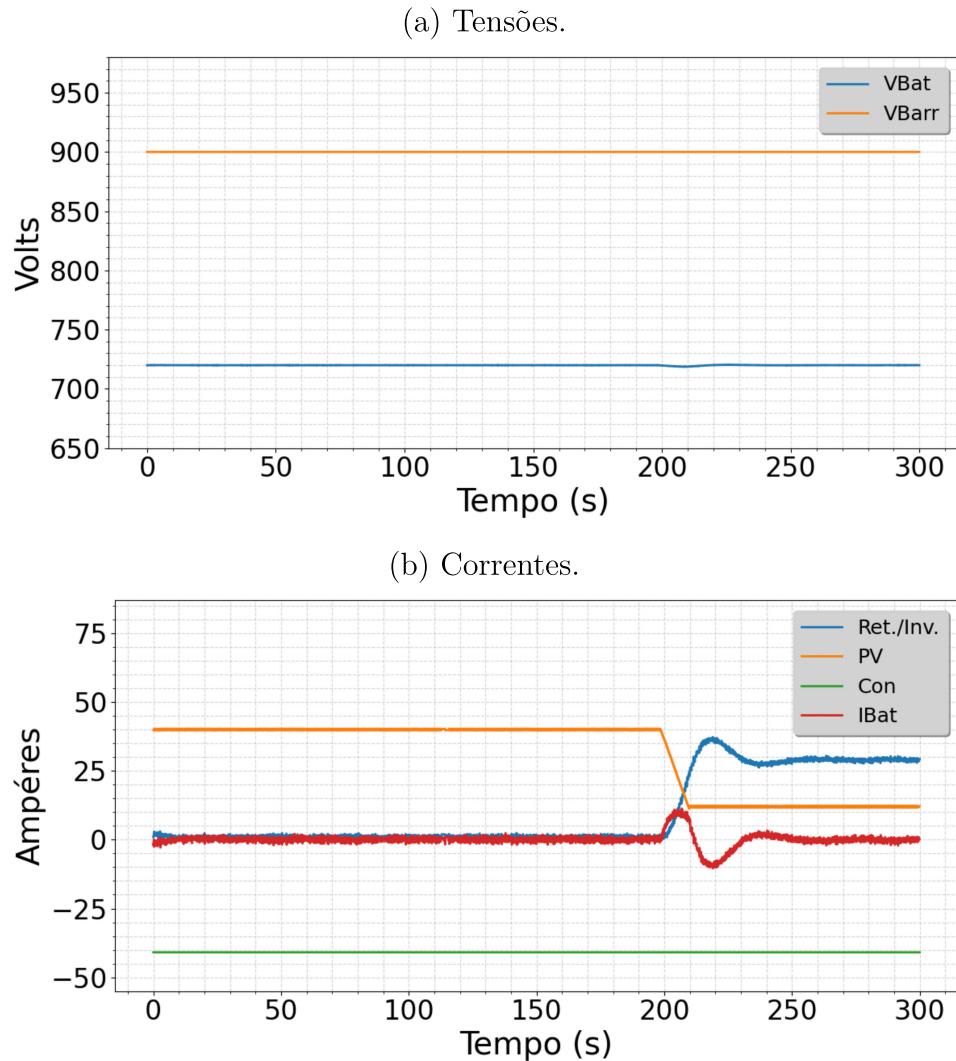
A Figura 4.43 ilustra o cenário em que a corrente gerada pelo arranjo fotovoltaico diminui devido a uma redução simulada na irradiação solar ocorrida no instante $t = 199 s$, quando a saída do *PV* cai de 40,5 A para 12,7 A. Em resposta à coordenação do MAS, o Inversor altera o estado da MR de equilíbrio energético para importação de potência do SEP. A Figura 4.43a mostra o comportamento da tensão no barramento CC, V_{Barr} , e a tensão nos terminais da bateria, V_{Bat} , estáveis durante a ocorrência do evento. A Figura 4.43b ilustra o comportamento das correntes em uma janela de 300 s mostrando as oscilações em *PV*, *Ret./Inv.* e I_{Bat} quando a irradiação solar é reduzida. Observa-se a rápida ação do conversor bidirecional devido à sua conexão à bateria e a ação do

Figura 4.42 – Cenário de contingência na operação da MR ilhada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.43 – Variações no ambiente de cossimulação na presença de evento na geração solar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

retificador/inversor sob comando do MAS no momento em que passa a importar energia do SEP.

4.7 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste Capítulo foi explorada uma metodologia para definição de uma Frequência de Atualização (FA) que permita boa fluência das informações sobre atualizações entre os elementos do sistema. A metodologia de Tempo de Atualização (TA) adaptativo foi comparado com um cenário semelhante, porém utilizando-se TA fixo. Analisou-se casos de contingência na ocorrência de falha na comunicação e também, falha que provocou o ilhamento do sistema.

Por outro lado, foram apresentados os resultados obtidos para o sistema em estudo

sob condições variáveis de consumo e geração de energia. O comportamento observado permaneceu dentro do esperado, mantendo-se estável mesmo diante dos eventos simulados, os quais objetivaram submeter o sistema a diferentes condições operacionais.

5 Conclusões e considerações finais

Esta tese propôs e detalhou a construção de um ambiente de cossimulação que se vale do potencial sinérgico de ferramentas individuais de simulação. A metodologia de construção integra de forma coesa quatro componentes principais: um Sistema Multiagentes (MAS), responsável pela orquestração de agentes autônomos; dois diferentes simuladores que trabalham ambientes computacionais de baixa capacidade, PSIM e PLECS, e por último, um Simulador Digital em Tempo Real (RTDS), para projetar e testar conversores de potência utilizados no âmbito do ambiente de cossimulação. Tais conversores, dotados de capacidade de comunicação, são vistos no ambiente multiagentes como agentes autônomos. O sistema em estudo simulou uma Microrrede (MR) Corrente Contínua (CC) conectada ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) composta de geração solar fotovoltaica, consumidor, sistema de armazenamento de energia e a interface com o SEP.

Como destacado na revisão bibliográfica apresentada na Seção 1.1, esta tese baseia-se na lacuna existente na literatura quanto à metodologia aqui proposta. Buscou-se, portanto, mitigar os efeitos adversos ao sistema decorrentes de tempos de resposta inadequados entre seus componentes, bem como das limitações na taxa efetiva de transmissão de dados devido a más condições no meio de comunicação. Nesse contexto, esta tese apresenta um algoritmo desenvolvido especificamente para reduzir tais fatores no ambiente de cossimulação, contribuindo para maior robustez e eficiência do sistema. Dado o comportamento estocástico da rede de comunicação, obtém-se um Tempo de Atualização (TA), de forma automática, que permite uma boa fluência do fluxo de informações entre os componentes do sistema. Os resultados de dois sistemas simulares utilizando metodologias distintas de TA foram comparados, sendo um deles com TA fixo e outro com TA adaptativo. Os resultados obtidos comprovam que o sistema que utilizou o TA adaptativo apresentou melhor desempenho que seu par comparado em uma rede sujeita a atrasos na comunicação.

Em outra perspectiva, esta tese investigou o controle hierárquico aplicado a sistemas eletrônicos de energia, com foco nos conversores de energia e no Sistema Multiagentes (MAS). Os resultados apresentados no Capítulo 4 comprovam a eficácia da abordagem aqui adotada.

5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Em uma Microrrede (MR) é esperado que haja a introdução de novos conversores à qualquer tempo, seja em ambientes estáticos, como a MR descrita neste estudo, mas que por vezes tem sua capacidade expandida ou reduzida, ou em outros cuja a dinamicidade pode chegar a novas entradas ou saídas de conversores em minutos. Por exemplo, em um estacionamento de *shopping center* onde oferece-se estações de carregamento de veículos elétricos. Portanto, neste trabalho identificou-se a necessidade do desenvolvimento de um

controle adaptativo no patamar superior, ou seja, no MAS. Como trabalhos futuros, é proposto:

- o desenvolvimento de um controlador adaptativo que permita que a MR mantenha-se estável na adição de novos conversores;
- a evolução do atual sistema MAS para receber, de forma aleatória, a introdução de novos conversores sob sua coordenação;
- a expansão da MR, assim como está na versão apresentada até aqui, com maior número de conversores: consumidores, controladores de painéis fotovoltaicos e geradores eólicos;
- a introdução de novos simuladores ao sistema, a exemplo do Typhoon HIL e do Opal-RT.

REFERÊNCIAS

- ABHISHEK, A.; RANJAN, A.; DEVASSY, S.; VERMA, B. K.; RAM, S. K.; DHAKAR, A. K. Review of hierarchical control strategies for dc microgrid. **IET Renewable Power Generation**, v. 14, n. 10, p. 1631–1640, 2020. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-rpg.2019.1136>.
- AGLET COMMUNITY. **Aglet Software Framework – Official Website**. 2023. Disponível em: <http://aglets.sourceforge.net/>.
- ALSEYAT, J.-D. P. A. Multi-agent system using jade for distributed dc microgrid system control. **North American Power Symposium (NAPS)**, Wichita, KS, USA, p. 1–5, 2019.
- ANDERSSON, H. A co-simulation approach for hydraulic percussion units. **Linköping University**, Sept 2018.
- AOS Group. **JACK - Agent Oriented Software (AOS)**. 2023. Disponível em: <http://www.agent-software.com/>.
- ASIF, M. **Chapter 3 - Sustainable energy transition in the 21st century**. [S.l.]: Academic Press, 2022.
- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. **Automatica**, v. 20, n. 5, p. 645–651, 1984.
- ATEF, A. S. D.; BARAKA, H. An architecture of distributed co simulation backplane. **42nd Midwest Symposium on Circuits and Systems**, v. 2, p. 855 to 858, 1999.
- AUNG, H. N.; KHAMBADKONE, A. M.; SRINIVASAN, D.; LOGENTHIRAN, T. Agent-based intelligent control for real-time operation of a microgrid. **2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India**, p. 1–6, 2010.
- AZEROUAL, M.; LAMHAMDI, T.; MOUSSAOUI, H. E.; MARKHI, H. E. Intelligent energy management system of a smart microgrid using multiagent systems. **Archives of Electrical Engineering**, Polish Academy of Sciences, vol. 69, n. No 1, p. 23–38, 2020.
- BADDIPADIGA, B. P. R.; PRABHALA, M. F. V. A. K. A family of high-voltage-gain dc-dc converters based on a generalized structure. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 10, p. 8399–8411, 2018.
- BELLIFEMINE, G. C. F.; GREENWOOD, D. **Developing Multi-Agent Systems with Jade**. [S.l.]: Wiley, 2004.
- BESSANI, A.; NEVES, N. F.; VERÍSSIMO, P.; DANTAS, W.; FONSECA, A.; SILVA, R.; LUZ, P.; CORREIA, M. Jiter: Just-in-time application-layer routing. **Computer Networks**, v. 104, p. 122–136, 2016. ISSN 1389-1286. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128616301475>.

- BOUZID, A. M.; GUERRERO, J. M.; CHERITI, A.; BOUHAMIDA, M.; SICARD, P.; BENGHANEM, M. A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 751–766, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211500026X>.
- BT Intelligent Agent Research. **Zeus**. 2023. Disponível em: <http://www.opensource.org/>.
- C SHUM et al. Hla based co-simulation framework for multiagent based smart grid applications. **2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**, p. 1–6, 2014.
- C SHUM et al. Co simulation of distributed smart grid software using direct execution simulation. **IEEE Access**, v. 6, p. 20531–20544, 2018.
- CLARIVATE. **Web of Science**. 2023. Disponível em: <https://www.webofscience.com/>.
- COMMUNITY, F. O. **ASDK**. 2023. Disponível em: <http://aglets.sourceforge.net/>.
- DANNER, D.; MEER, H. de. Max-consensus protocol to determine the regulated node in distributed voltage regulation. **Energy Informatics**, v. 5, n. Suppl 1, p. 15, 2022. <Https://energyinformatics.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s42162-022-00211-w>. Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1150863062>.
- DAY, J.; ZIMMERMANN, H. The osi reference model. **Proceedings of the IEEE**, v. 71, n. 12, p. 1334–1340, 1983.
- DIMEAS, N. D. H. A. L. Operation of a multiagent system for microgrid control. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 852060, p. 1447–1455, Aug 2005.
- DIMENSIONS, D. S. . R. S. I. **Dimensions**. 2023. Disponível em: <https://www.dimensions.ai/>.
- ECK, N. J. van; WALTMAN, L. **VOSviewer: A computer program for bibliometric mapping**. 2010. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>.
- EDRINGTON, C. S.; STEURER, M.; LANGSTON, J.; EL-MEZYANI, T.; SCHODER, K. Role of power hardware in the loop in modeling and simulation for experimentation in power and energy systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 103, n. 12, p. 2401–2409, 2015.
- ELSEVIER. **Scopus**. 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/>.
- FARROKHABADI, M.; CAÑIZARES, C. A.; SIMPSON-PORCO, J. W.; NASR, E.; FAN, L.; MENDOZA-ARAYA, P. A.; TONKOSKI, R.; TAMRAKAR, U.; HATZIARGYRIOU, N.; LAGOS, D.; WIES, R. W.; PAOLONE, M.; LISERRE, M.; MEEGAHAPOLA, L.; KABALAN, M.; HAJIMIRAGHA, A. H.; PERALTA, D.; ELIZONDO, M. A.; SCHNEIDER, K. P.; TUFFNER, F. K.; REILLY, J. Microgrid stability definitions, analysis, and examples. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 35, n. 1, p. 13–29, 2020.
- FARUQUE, M. D. O.; STRASSER, T.; LAUSS, G.; JALILI-MARANDI, V.; FORSYTH, P.; DUFOUR, C.; DINAVAHI, V.; MONTI, A.; KOTSAMPOPOULOS, P.; MARTINEZ, J. A.; STRUNZ, K.; SAEEDIFARD, M.; WANG, X.; SHEARER, D.; PAOLONE,

- M. Real-time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, v. 2, n. 2, p. 63–73, 2015. <Https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6687318/7174593/07138557.pdf>. Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1061293603>.
- FERNANDES, D. L.; FERREIRA, A. A.; SILVA, L. R. M.; OLIVEIRA, J. G. d. Refined update frequency selection in multi-agent systems. **XXV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2024)**, 2024.
- FERNANDES, D. L.; LEOPOLDINO, A. L. M.; SANTIAGO, J. d.; VERGINIS, C.; FERREIRA, A. A.; OLIVEIRA, J. G. d. Distributed control on a multi-agent environment co-simulation for dc bus voltage control. **EPSR**, 2024.
- FOUNDATION, P. S. **Python programming language**. 2022. Disponível em: <https://www.python.org/pzf/>.
- GODFREY, T.; MULLEN, S.; GRIFFITH, D. W.; GOLMIE, N.; DUGAN, R. C.; RODINE, C. Modeling smart grid applications with co-simulation. **2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications**, p. 291–296, 2010.
- GORALSKI, W. **Chapter 28 - Simple Network Management Protocol**. Second edition. Boston: Morgan Kaufmann, 2017. 707-729 p. ISBN 978-0-12-811027-0. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012811027000028X>.
- HAMMONS L L LAI, K. P. W. T. International practices in distributed generation. **IEEE Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**, p. 1–7, 2008.
- HAPSARI, A. P. N.; KATO, T.; TAKAHASHI, H.; SASAI, K.; KITAGATA, G.; KINOSHITA, T. Multiagent-based microgrid with electric vehicle allocation planning. **2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)**, p. 436–437, 2013.
- HART, D. W. **POWER ELECTRONICS**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-338067-4.
- HASAN, M.; MIFTA, Z.; SALSABIL, N. A.; PAPIYA, S. J.; HOSSAIN, M.; ROY, P.; CHOWDHURY, N.-U.-R.; FARROK, O. A critical review on control mechanisms, supporting measures, and monitoring systems of microgrids considering large scale integration of renewable energy sources. **Energy Reports**, v. 10, p. 4582–4603, 2023. ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723015445>.
- HUANG, C.; WENG, S.; YUE, D.; DENG, S.; XIE, J.; GE, H. Distributed cooperative control of energy storage units in microgrid based on multi-agent consensus method. **Electric Power Systems Research**, v. 147, p. 213–223, 2017. ISSN 0378-7796. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877961730086X>.
- ITO, Y.; KAMAL, M. A. S.; YOSHIMURA, T.; AZUMA, S. ichi. Pseudo-perturbation-based broadcast control of multi-agent systems. **Automatica**, v. 113, p. 108769, 2020. ISSN 0005-1098. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109819306326>.

- ITO, Y. Z. H. Y.; AKAGI. Dc microgrid based distribution power generation system. v. 3, p. 1740–1745, 2004.
- JUNIOR, L. C. G. d. F. M. E. T. S. State-of-the-art, challenges and trends for the sustainable generation, distribution and use of electricity. **Brazilian Applied Science Review**, 2020.
- KAZICKOVÁ, T.; BUHNOVA, B. Ict architecture for the smart grid: Concept overview. **Smart Cities Symposium Prague (SCSP)**, p. 1–4, 2016.
- KAZIMIERCZUK, M. K. **Pulse width Modulated DC DC Power Converters**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-77301-7.
- KAZMI A LATIF, I. A. J. H.; PALENSKY, P.; GAWLIK, W. A flexible smart grid co-simulation environment for cyber-physical interdependence analysis. **Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), Vienna, Austria**, 2016.
- KORKEALAAKSO, P. M.; ROUVINEN, A. J.; MOISIO, S. M.; PEUSAARI, J. K. Development of a real-time simulation environment. **Multibody System Dynamics**, v. 17, n. 2, p. 177–194, apr 2007. ISSN 1573-272X. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11044-007-9040-z>.
- KUMAR, A. A.; PRABHA, N. A. A comprehensive review of dc microgrid in market segments and control technique. **Helion**, v. 8, n. 11, p. e11694, 2022. [Http://www.cell.com/article/S2405844022029826/pdf](http://www.cell.com/article/S2405844022029826/pdf). Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1152788100>.
- LASSETER, R.; PAIGI, P. Microgrid: a conceptual solution. In: **2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 6, p. 4285–4290 Vol.6.
- LE T L NGUYEN, Q. T. T. Y. B. M. T.; HOANG, T. A co-simulation approach for validating agent-based distributed algorithms in smart grid. **IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Palermo, Italy, 2020**, p. 529–534, 2020.
- LEOPOLDINO, A. L. M.; FERNANDES, D. L.; POMILIO, J. A.; OLIVEIRA, J. Gonçalves de; FERREIRA, A. A. Off-the-shelf low-cost wireless communication structure applied to microgrids power converters. In: **2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–5.
- LI, C.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Multiagent-based distributed control for operation cost minimization of droop controlled dc microgrid using incremental cost consensus. **IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, p. 005202–005205, 2015.
- LIU, H.; GAO, H.; GUO, S.; CAI, H. Coordination of a flywheel energy storage matrix system: An external model approach. **IEEE Access**, v. 9, p. 34475–34486, 2021.

- LIU, X.-K.; WANG, Y.-W.; LIU, Z.-W.; HUANG, Y. On the stability of distributed secondary control for dc microgrids with grid-forming and grid-feeding converters. **Automatica**, v. 155, p. 111164, 2023. ISSN 0005-1098. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109823003254>.
- MAHELA, O. P.; KHOSRAVY; GUPTA, N.; KHAN, B.; ALHELOU, H. H.; MAHLA, R.; PATEL, N.; SIANO, P. Comprehensive overview of multi-agent systems for controlling smart grids. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 8, n. 1, p. 115–131, 2020.
- MALIK, P.; CHANDEL, S. S.; GUPTA, R. Potential and performance assessment of solar photovoltaic systems across diverse climatic conditions: A comprehensive analysis. **Energy for Sustainable Development**, v. 89, p. 101851, 2025. ISSN 0973-0826. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082625002017>.
- MENDOZA-VIZCAINO, J.; SUMPER, A.; SUDRIA-ANDREU, A.; RAMIREZ, J. Renewable technologies for generation systems in islands and their application to cozumel island, mexico. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 348–361, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116302295>.
- MOHSENI-BONAB, S. M.; HAJEBRAHIMI, A.; KAMWA, I.; MOEINI, A. Transmission and distribution co-simulation: a review and propositions. **IET Generation Transmission & Distribution**, v. 14, n. 21, p. 4631–4642, 2020. Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1131204894>.
- MORADI, M.; HEYDARI, M.; ZAREI, S. F. An overview on consensus-based distributed secondary control schemes in dc microgrids. **Electric Power Systems Research**, v. 225, p. 109870, 2023. ISSN 0378-7796. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623007587>.
- MORSTYN, T.; SAVKIN, A. V.; HREDZAK, B.; AGELIDIS, V. G. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a dc microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 5, p. 4735–4743, 2018.
- NGUYEN T T DANG, L. H. G.; BUDINSKA, I. Agent platform evaluation and comparison. **Slovakia, Tech Rep Pellucid 5FP IST 2001 34519**, p. 1–11, 2002.
- NGUYEN YVON BESANGER, Q. T. T. V. H.; NGUYEN, T. L. On conceptual structuration and coupling methods of co-simulation frameworks in cyber-physical energy system validation. **Energies**, v. 10, 2017.
- ns-3 Consortium. **NS-3: A discrete-event network simulator**. 2023. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>.
- NS-3 Consortium. **NS-3 Network Simulator**. 2023. <https://www.nsnam.org>. Version 3.37. Accessed: 2024-11-01.
- OGATA, K. Modern control. In: _____. Third. [S.l.]: Prentice Hall, 1997. cap. 10, p. 670–679.

OSORIO, D. S. C. What is controller hardware-in-the-loop simulation, or c-hil? **Typhoon HIL**, 2024. Disponível em: <https://www.typhoon-hil.com/blog/what-is-controller-hardware-in-the-loop-c-hil-simulation/>.

Özhan Atmaca; Erdeniz Erol; Tariq Kamal; Murat Karabacak. **Design of an H-Bridge Bidirectional DC-DC Converter with LCL Filter for High Power Battery Applications**. [S.l.]: DSpace@Piri Reis, 2019. 238-241 p.

PINHEIRO, L. V. **Contribuição de um Sistema de Armazenamento de Energia por meio de Baterias para Regulação dos Níveis de Tensão de um Sistema de Distribuição com Alta Penetração Fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado) — UFJF, 2020.

Plexim GmbH. **PLECS — Simulation Tool for Power Electronics**. Zurich, Switzerland: Plexim GmbH, 2023. Disponível em: <https://www.plexim.com>.

POWER ELECTRONICS SOLUTION PROVIDER. **POWERSIM (Version 9.1)**. 2023. Disponível em: <https://powersimtech.com/>.

PSQL, T. P. G. D. G. **PostgreSQL**. 2023. Disponível em: <https://www.postgresql.org/>.

PULOK, M. K. H.; FARUQUE, M. O. Real-time dynamic state estimation using synchrophasor data. In: **2015 North American Power Symposium (NAPS)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

QASHQAIE, F.; SAGHAFI, H.; SADEGHI, R.; FANI, B.; GUERRERO, J. M. Restraining non-sinusoidal v/i output via adaptive droop control in autonomous ac microgrids. **Electric Power Systems Research**, v. 247, p. 111770, 2025. ISSN 0378-7796. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779625003621>.

RAFIQUE, Z.; KHALID, H. M.; MUYEEN, S. M. Communication systems in distributed generation: A bibliographical review and frameworks. **IEEE Access**, v. 8, p. 207226–207239, 2020. [Https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/8948470/09253656.pdf](https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/8948470/09253656.pdf). Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1132523153>.

RAHMAN, M.; MAHMUD, M.; POTA, H.; HOSSAIN, M. A multi-agent approach for enhancing transient stability of smart grids. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 67, p. 488–500, 2015. ISSN 0142-0615. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514007650>.

RAJU, L.; RATHNAKUMAR, R.; PONNIVALAVAN, S.; THAVAM, L. D.; MORAIS, A. A. Micro-grid grid robustness management using multi agent systems. In: **2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 38–43.

RANA, R. *et al.* Modelling and simulation approaches for local energy community integrated distribution networks. **IEEE Access**, v. 10, p. 3775–3789, 2022.

RTDS Technologies Inc. **RTDS Simulator**. Winnipeg, Manitoba, Canada: RTDS Technologies Inc., 2024. Disponível em: <https://www.rtds.com>.

RTDS Technologies Inc. **RSCAD Power System Manual**. [S.l.], 2025.

- RWEGARSIRA, D.; DHAOU, I. B.; KONDORO, A.; KELATI, A.; MVUNGI, N.; TENHUNEN, H. A hardware-in-loop simulation of dc microgrid using multi-agent systems. In: **2018 22nd Conference of Open Innovations Association (FRUCT)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 232–237.
- SCHWEIGER, G.; GOMES, C.; ENGEL, G.; HAFNER, I.; SCHOEGGL, J.; POSCH, A.; NOUIDUI, T. An empirical survey on co-simulation: Promising standards, challenges and research needs. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 95, p. 148–163, 2019. ISSN 1569-190X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X1930053X>.
- SHAYANFAR, H. A.; MALEK, S. Photovoltaic microgrids control by the cooperative control of multi-agent systems. **2015 30th International Power System Conference (PSC)**, p. 287–293, 2015.
- SHI, X.; LI, Y.; CAO, Y.; TAN, Y. Cyber-physical electrical energy systems: challenges and issues. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, CSEE, v. 1, n. 2, p. 36–42, 2015.
- SHUAI, Z.; FANG, J.; NING, F.; SHEN, Z. J. Hierarchical structure and bus voltage control of dc microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3670–3682, 2018. ISSN 1364-0321.
- SINGH, D. J. A.; SHARMA, A. K. Agent development toolkits. **International Journal of Advancements in Technology**, v. 2, n. 1, p. 158–164, 2011.
- SMITH, E. J.; ROBINSON, D. A.; ELPHICK, S. Der control and management strategies for distribution networks: A review of current practices and future directions. **Energies**, v. 17, n. 11, p. 2636, 2024. <Https://www.mdpi.com/1996-1073/17/11/2636/pdf?version=1716993880>. Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1172287343>.
- STEEN, A. S. T. Maarten van. **Distributed Systems: Principles and Paradigms**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2007.
- Sutedjo; Asrarul Qudsi, Ony; Ardianto, Andi; Septi Yanaratri, Diah; Suhariningsih; Darwis, Moch. Design and implementation buck converter for 540wp solar charger using fuzzy logic control. **E3S Web Conf.**, v. 43, p. 01009, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184301009>.
- TAN, K. M. e. a. Empowering smart grid: A comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration. **Journal of Energy Storage**, v. 39, p. 102591, 2021. Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1137798908>.
- TAYABA MOHD AZRIK BIN ROSLANA, L. J. H. U. B.; KASHIF, M. A review of droop control techniques for microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 76, p. 717–727, Mar 2017.
- VOGT, M.; MARTEN, F.; BRAUN, M. A survey and statistical analysis of smart grid co-simulations. **Applied Energy**, v. 222, p. 67–78, 2018. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918304616>.

WANG, N.; LI, J.; HO, S.-S.; QIU, C. Distributed machine learning for energy trading in electric distribution system of the future. **The Electricity Journal**, v. 34, n. 1, p. 106883, 2021. Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1133405537>.

WANG, X.; ZHANG, P.; WANG, Z.; DINAVAHI, V.; CHANG, G.; MARTINEZ, J. A.; DAVOUDI, A.; MEHRIZI-SANI, A.; ABHYANKAR, S. Interfacing issues in multiagent simulation for smart grid applications. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 3, p. 1918–1927, 2013.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. **Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications**. Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2010. ISBN 978-0-470-52156-4.

YAZDANIAN, M.; MEHRIZI-SANI, A. Distributed control techniques in microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 5, n. 6, p. 2901–2909, 2014.

YOHANANDHAN, R. V.; ELAVARASAN, R. M.; MANOHARAN, P.; MIHET-POPA, L. Cyber-physical power system (cpps): A review on modeling, simulation, and analysis with cyber security applications. **IEEE Access**, v. 8, p. 151019–151064, 2020. <Https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/8948470/09167203.pdf>. Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1130129745>.

APÊNDICE A – APÊNDICE

A.1 CONVERSORES DE POTÊNCIA

Nesta Seção, são mostrados conceitos básicos e necessários sobre conversores eletrônicos de potência adotados nesta tese. São analisados os modelos chaveado e médio dos conversores.

O modelo chaveado fornece valores instantâneos precisos de corrente e tensão, incluindo ondulação de comutação de alta frequência, entretanto torna a análise das relações de controle mais complexa. Para análise dinâmica e projeto de controle, detalhes de alta frequência são frequentemente desnecessários, visto que os sistemas de controle normalmente respondem apenas ao comportamento de baixa frequência. Portanto, o modelo médio se concentra na dinâmica dos valores médios, simplifica a compreensão do comportamento do conversor e relaciona diretamente o sinal de modulação (entrada de controle) às variáveis médias (YAZDANIAN; MEHRIZI-SANI, 2014).

A.1.1 Conversor unidirecional em corrente

O conversor CC-CC unidirecional em corrente é analisado na configuração *Buck*, com o objetivo de converter a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico e injetá-la no barramento CC do sistema. Existe também uma configuração alternativa para esse tipo de conversor, denominada *Boost*, capaz de fornecer uma tensão de saída superior à tensão de entrada.

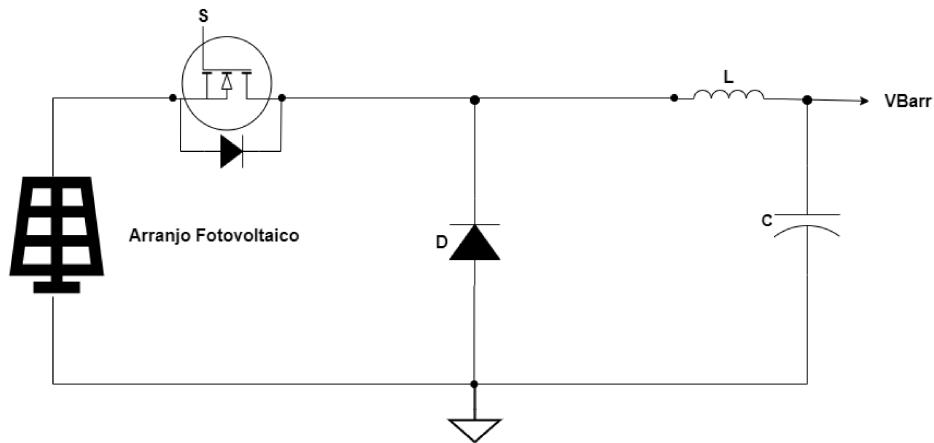
A escolha pela topologia *Buck* nesta tese decorre da configuração adotada para o arranjo de painéis solares, cuja tensão de saída — e, portanto, a tensão de entrada do conversor — é superior à tensão nominal do barramento CC. Assim, o conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração *Buck* atua reduzindo a tensão CC de acordo com o ajuste do ciclo de trabalho (D), realizado por meio do processo de comutação de um dispositivo semicondutor. O respectivo circuito do conversor é mostrado na Figura A.44.

O modelamento do conversor chaveado é encontrado no Apêndice. Por outro lado, nesta tese adota-se o modelo médio do conversor *Buck*, cujo modelamento é, igualmente, encontrado no Apêndice.

A.1.2 Conversor bidirecional em corrente

Os conversores CC-CC são essenciais para fornecer tensões reguladas a partir de uma fonte de tensão contínua não regulada. Há topologias interessantes e disponíveis para conexão de um sistema de armazenamento de energia utilizando baterias, trata-se do conversor bidirecional em corrente CC-CC. Este conversor é crucial para integrar a bateria em paralelo com o barramento CC, e assim, controlar seus processos de carga e descarga.

Figura A.44 – Conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração *Buck* em modelo chaveado.

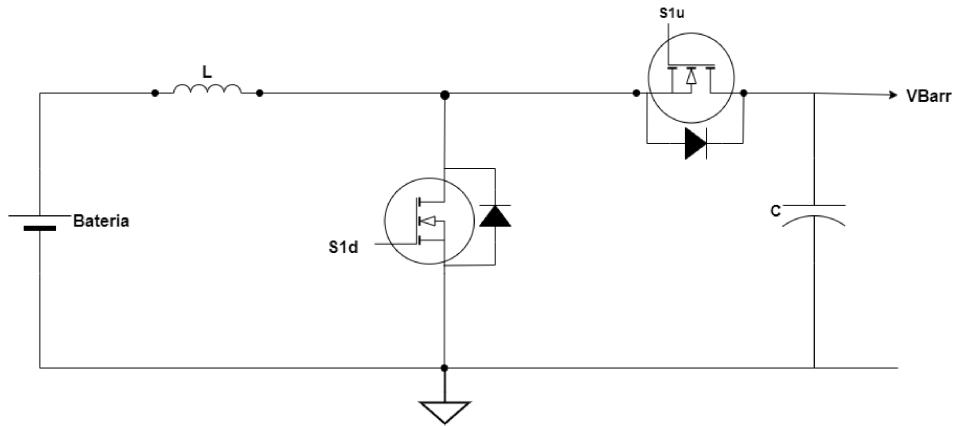


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O conversor CC-CC bidirecional combina as características de entrada de um conversor *Buck* e as características de saída de um conversor *Boost*. Tal conversor é capaz de produzir uma tensão média de saída maior, igual ou menor que a tensão de entrada.

A operação do conversor bidirecional é determinada pela comutação das chaves semicondutoras de potência $S1d$ e $S1u$. A Figura A.45 ilustra a topologia do conversor, que inclui um filtro indutivo L e duas chaves semicondutoras $S1d$ e $S1u$. Sua operação é

Figura A.45 – Topologia do conversor CC-CC bidirecional em corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

dividida em dois modos distintos: no modo elevador (*Boost*), a chave $S1u$ é controladaativamente pelo ciclo de trabalho enquanto $S1d$ permanece desligada; inversamente, no modo abaixador (*Buck*), $S1d$ é acionado pelo ciclo de trabalho enquanto $S1u$ está desligado. Variando-se o ciclo de trabalho, a direção do fluxo de energia pode ser ajustada, permitindo assim, uma inversão suave e evitando descontinuidades (PINHEIRO, 2020).

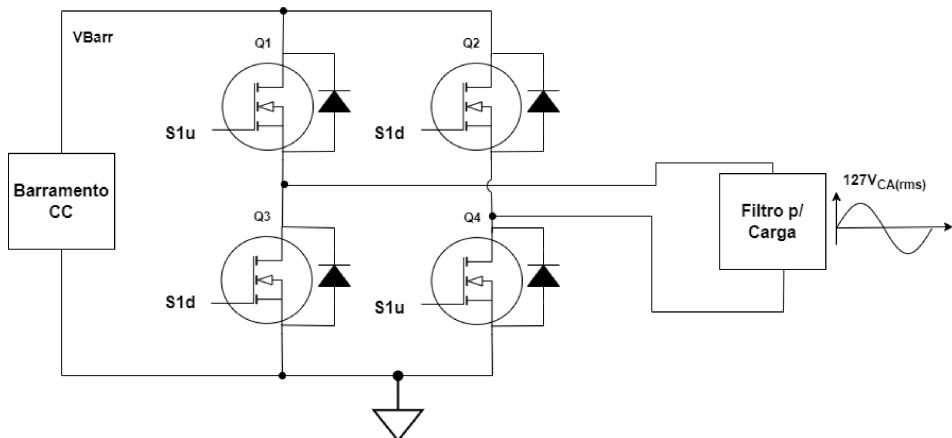
O modelamento do conversor é encontrado no Apêndice. Nesta tese é utilizado o

modelo médio do conversor, como descrito na Subseção A.1.5.

A.1.3 Inversor monofásico

De forma a alimentar as cargas individuais no sistema, adota-se conversores de CC-CA em ponte completa, cujo esquemático pode ser visto na Figura A.46. No entanto, no âmbito desta tese utiliza-se o conversor em modelo médio conforme descrito na Seção A.1.6. As chaves $Q1$ e $Q4$ são disparadas simultaneamente através da Modulação por

Figura A.46 – Inversor monofásico.



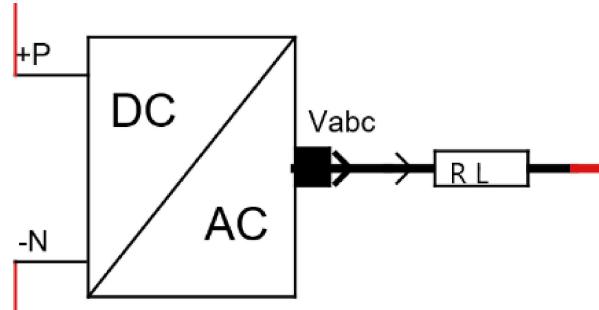
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Largura de Pulso Senoidal (SPWM) presente no sinal $S1u$, e, alternadamente com as chaves $Q2$ e $Q3$, através do sinal SPWM $S1d$. O filtro para a carga garante boa qualidade da alimentação CA em 60 Hz , cujo valor Valor Médio Quadrático (RMS) equivale a 127 V_{CA} .

A.1.4 Interface com o SEP

O conversor CC-CA de interface com o SEP, aqui denominado retificador/inversor, tem como objetivo conectar a MR CC ao SEP. Simuladores como o RTDS dispõe do componente Modelo de Valor Médio Dinâmico (DAVM), conforme ilustrado na Figura A.47, que opera em modo médio. O componente DAVM no referencial de fase substitui o Conversor de Fonte de Tensão (VSC) chaveado por fontes de tensão e corrente controladas que representam a dinâmica de controle VSC média. A tensão CA é obtida a partir de sinais de referência de controle senoidais definidos no simulador. A atuação do DAVM pode ser inserida a partir de sinais de controle definidos pelo usuário ou calculada a partir do princípio do balanço de potência(RTDS Technologies Inc., 2025) .

Figura A.47 – Modelo de valor médio dinâmico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A.1.5 Modelos médios dos conversores

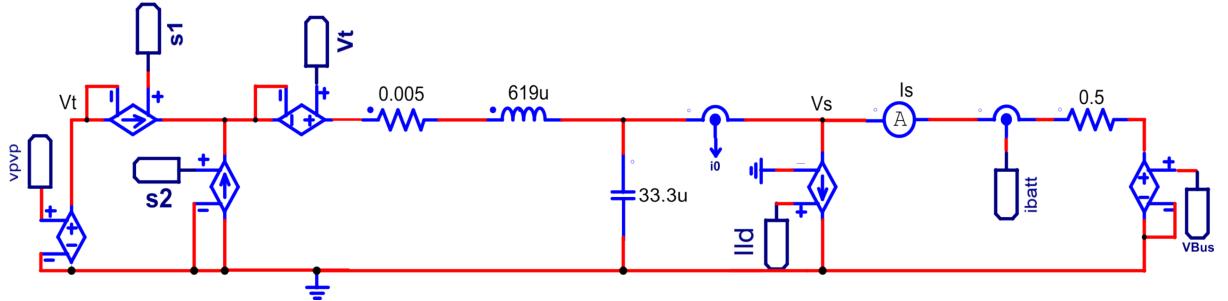
O modelo comutado descreve com precisão o comportamento dinâmico e em regime permanente de um conversor de potência. Assim, dadas as funções de comutação dos componentes chaveadores, os valores instantâneos das variáveis de corrente e tensão podem ser calculados por meio do modelo comutado. Portanto, as variáveis calculadas incluem componentes de alta frequência, por exemplo: devido ao processo de comutação, bem como transitórios lentos. No entanto, as relações entre o sinal modulante e as variáveis de corrente e tensão não são facilmente compreendidas a partir do modelo comutado. Além disso, para fins de análise dinâmica e projeto de controle, o conhecimento sobre os detalhes de alta frequência das variáveis geralmente não é necessário, visto que os compensadores e filtros em um sistema de controle em malha fechada normalmente exibem características passa-baixas e não reagem a componentes de alta frequência. Por essas razões, a dinâmica dos valores médios das variáveis, em vez da dinâmica dos valores instantâneos, é de interesse no escopo desta tese. Através do modelo médio de um conversor de potência é possível descrever a dinâmica do conversor como uma função do sinal de modulação (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

A.1.5.1 Modelo médio do conversor CC-CC unidirecional em corrente

A Figura A.48 ilustra o modelo médio do conversor CC-CC unidirecional em corrente. Nesta figura, a tensão aplicada pelo arranjo fotovoltaico ao circuito é representada pela fonte controlada pelo sinal v_{pvp} tendo o ponto de referência V_t em seu terminal positivo. Os sinais s_1 , s_2 e V_t são obtidos a partir da Equação A.2. Seja:

$$\begin{cases} s_1(t) = d; \\ s_2(t) = 1 - d; \\ d = \frac{m+1}{2}. \end{cases} \quad (A.1)$$

Figura A.48 – Conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração *Buck* em modelo médio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partir das expressões em A.1, chega-se a:

$$\begin{cases} V_t(t) = V_{PV} \cdot s1(t) \\ i_{s1}(t) = s1(t) \cdot i_{l0}(t) \\ i_{s2}(t) = -s2(t) \cdot i_{l0}(t). \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Em seguida, os modelos médios da expressões anteriores são obtidos.

$$\begin{cases} \bar{V}_t = V_{PV} \cdot d; \\ \bar{i}_{s1} = d \cdot \bar{i}_{l0}; \\ \bar{i}_{s2} = -(1 - d) \cdot \bar{i}_{l0}. \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Finalmente, substituindo-se A.1 em A.3, chega-se à equação de controle do modelo médio do conversor *Buck*:

$$\begin{cases} \bar{V}_t = V_{PV} \cdot \frac{m+1}{2}; \\ \bar{i}_{s1} = \frac{m+1}{2} \cdot \bar{i}_{l0}; \\ \bar{i}_{s2} = -\frac{1-m}{2} \cdot \bar{i}_{l0}. \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

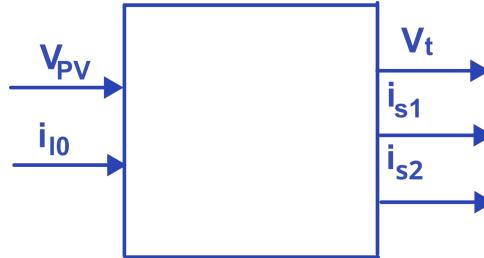
A Figura A.49 ilustra os sinais de controle do conversor obtidos a partir da Equação A.4.

A.1.5.2 Modelo médio do conversor CC-CC bidirecional em corrente

A Figura A.50 ilustra o circuito em modelo médio do conversor CC-CC bidirecional em corrente acoplado ao acumulador de energia, a bateria. Este conversor controla o nível de tensão no barramento CC. O sinais de controle das fontes controladas na Figura A.50 são gerados a partir das equações a seguir e ilustradas na Figura A.51.

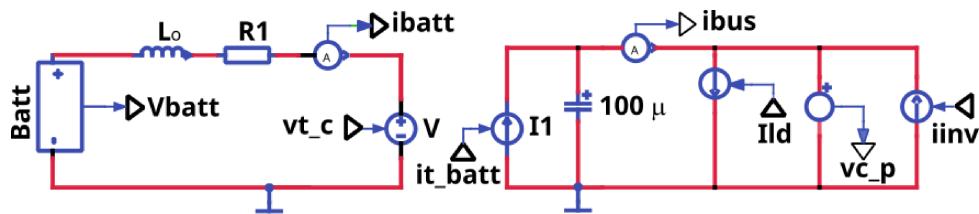
$$\begin{cases} V_t(t) = v t_c(t); \\ v t_c(t) = V_c(t) \cdot d; \\ i_{t_batt}(t) = i_{batt}(t) \cdot d \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Figura A.49 – Composição do circuito dos geradores de sinais de controle para as fontes controladas do modelo médio do conversor CC-CC unidirecional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura A.50 – Modelo médio do conversor CC-CC Bidirecional

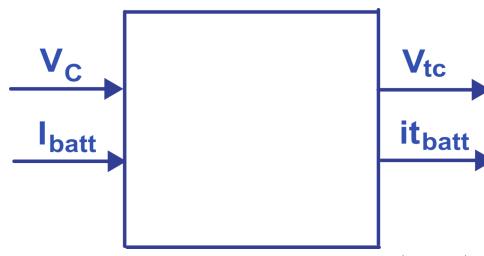


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Fazendo $d = \frac{m+1}{2}$, obtém-se as equações dos sinais de controle das fontes controladas do modelo médio.

$$\begin{cases} \bar{V}_{t_c} &= \frac{m+1}{2} \cdot V_c \\ \bar{i}_{t_batt} &= \frac{m+1}{2} \cdot I_{batt} \end{cases} \quad (A.6)$$

Figura A.51 – Sinais de controle das fontes controladas do modelo médio do conversor bidirecional.

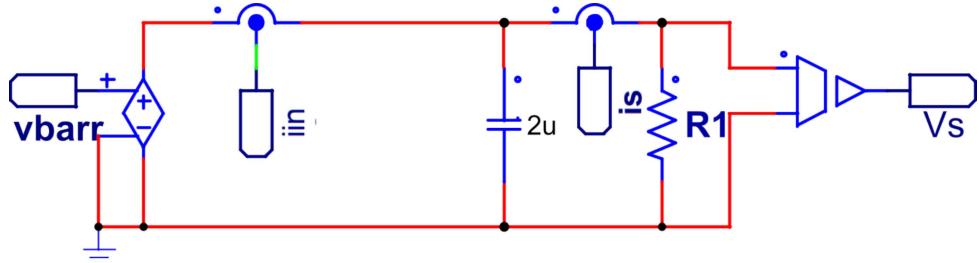


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A.1.6 Modelo médio da carga

O modelo médio da carga é ilustrado na Figura A.52. A variável v_{barr} é a referência de tensão do barramento CC, e o sensor i_s disponibiliza a informação de corrente consumida na carga, R_1 . O capacitor de $2 \mu F$ localizado em paralelo com R_1 tem o objetivo de filtrar componentes de alta frequência para a leitura do Sensor i_s , proporcionando leituras estáveis de corrente consumida pela carga.

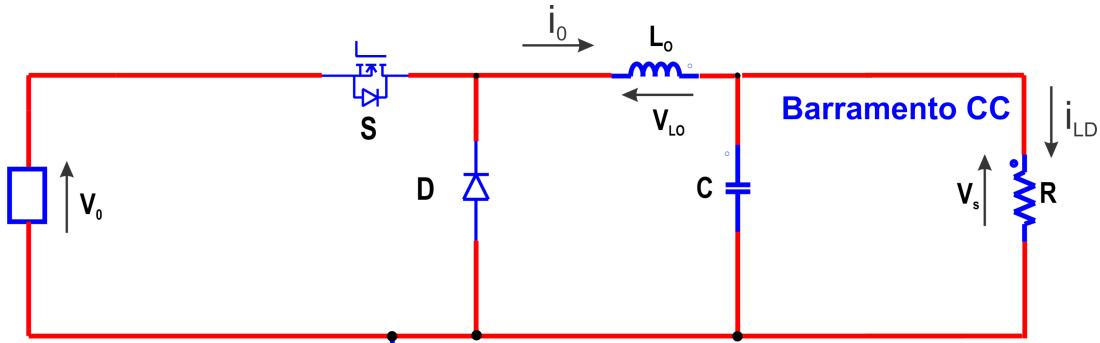
Figura A.52 – Modelo médio da carga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A.2 CONVERSOR CC-CC UNIDIRECIONAL EM CORRENTE NA CONFIGURAÇÃO BUCK

O conversor CC-CC unidirecional em corrente é analisado nesta tese na configuração *Buck*, ou simplesmente *Buck*, com o intuito de controlar a injeção de corrente no barramento CC do sistema pela fonte. Tal conversor tem a característica de diminuir a tensão CC ajustando o ciclo de trabalho (D) pelo processo de comutação usando um componente semicondutor. O respectivo circuito do conversor é mostrado na Figura A.53.

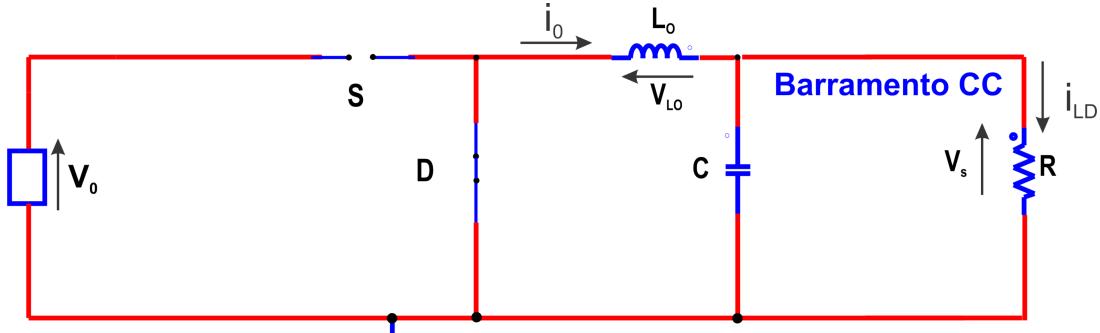
Figura A.53 – Conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração *Buck* em modelo chaveado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A.2.1 Modelamento do conversor

Durante o ciclo de comutação, o interruptor e o diodo alternam seus estados *aberto* e *fechado*. O interruptor, representado por *S* na Figura A.53, no estado *aberto* permite à saída receber a energia acumulada pelo capacitor e o indutor. O circuito que representa a chave no estado *aberto* é mostrado na Figura A.54. Com tal configuração o circuito é modelado pelas equações A.7 a A.10. Sendo V_0 a tensão de entrada proveniente da fonte, V_{L_0} a tensão medida entre os terminais do indutor, I_{L_D} a corrente e V_s a tensão de saída do conversor.

Figura A.54 – Conversor Buck do PV com o interruptor aberto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

$$V_{L_0} = -V_s \quad (A.7)$$

$$V_{L_0} = L_0 \frac{di_{L_0}}{dt} \quad (A.8)$$

$$\frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{-V_s}{L_0} \quad (A.9)$$

Seja:

$$x(t) = \begin{cases} \dot{x}_1 &= -\frac{x_2}{L_0} \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C}(i_{L_0} - \frac{x_2}{R}) \end{cases} \quad (A.10)$$

E,

$$\begin{cases} \dot{x}_1 &= \dot{i}_{L_0} \text{ e } x_1 = i_{L_0} \\ \dot{x}_2 &= \dot{V}_s, \text{ e } x_2 = V_s. \end{cases} \quad (A.11)$$

Fazendo as devidas substituições tem-se:

$$\begin{cases} \dot{i}_{L_0} &= \frac{-V_s}{L_0} \\ \dot{V}_s &= \frac{1}{C}(-i_{L_0} - \frac{V_s}{R}). \end{cases} \quad (A.12)$$

As mudanças na corrente do indutor são dadas por:

$$\frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{\Delta_{L_0}}{\Delta t}, \quad (A.13)$$

$$\frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{\Delta_{L_0}}{(1 - D)T}. \quad (A.14)$$

A solução de Δi_{L_0} no cenário em que as chaves se encontram abertas é:

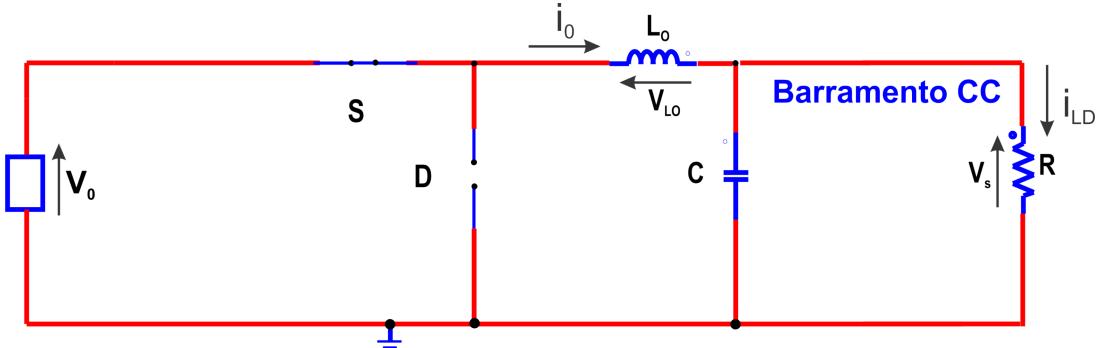
$$\Delta i_{L_0}(\text{open}) = \frac{-V_s((1 - D)T)}{L_0}. \quad (A.15)$$

O interruptor no estado *fechado* altera o circuito de tal forma em que o diodo D esteja na posição de polarização reversa. A saída é isolada e a entrada fornece energia

ao indutor. O circuito equivalente à este estado é mostrado na Figura A.55, sendo a modelagem do circuito nesta configuração descrita pelas equações de A.16 a A.20.

$$\begin{cases} \dot{i}_{L_0} = \frac{-V_s + V_0}{L_0} \\ \dot{V}_s = \frac{1}{C}(i_{L_0} - \frac{V_s}{R}). \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

Figura A.55 – Conversor Buck do PV com o interruptor fechado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A tensão no indutor é dada por:

$$V_{L_0} = -V_s + V_0; \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{V_0 - V_s}{L_0}. \quad (\text{A.18})$$

As mudanças na corrente do indutor são dadas por:

$$\frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_0}}{DT}, \quad (\text{A.19})$$

o que leva à solução para Δi_{L_0} quando as chaves estão fechadas:

$$\Delta i_{L_0}(\text{close}) = \frac{(V_0 - V_s)DT}{L_0}. \quad (\text{A.20})$$

Sejam as equações A.21 e A.22 uma representação matricial em espaço de estados para o sistema:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1 \\ y_1 = C_1 x_1 \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

e

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = A_0 x_0 + B_0 u_0 \\ y_0 = C_0 x_0, \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

em que A_1 , B_1 e C_1 são as matrizes representantes do modelo de espaço de estados do conversor para a topologia com o interruptor no estado *fechado* e A_0 , B_0 e C_0 , respectivamente, para o estado *aberto*. Desta forma escreve-se:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_0} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.23})$$

$$x_1 = \begin{bmatrix} i_{L_0} \\ V_s; \end{bmatrix} u_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ V_0 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.24})$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_0} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}; B_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.25})$$

$$x_0 = \begin{bmatrix} i_{L_0} \\ V_s; \end{bmatrix} u_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ V_0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.26})$$

Por fim, fazendo-se a soma dos estados *fechado* e *aberto* encontra-se o sistema para o ciclo T completo, uma vez que DT está relacionado ao interruptor *fechado* e $(1 - D)T$ ao mesmo *aberto*:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{V_0}{L_0} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D}{L_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.27})$$

Acima configura-se o sistema em função de v_c , cuja configuração se dá através da matriz \mathcal{C} .

A descrição em variáveis de estado é encontrada nas equações de A.28 a A.34.

$$\begin{cases} \dot{x} = [A_1 d + A_0(1 - d)]x + [B_1 d + B_0(1 - d)]u \\ y = [\mathcal{C}_1 d + \mathcal{C}_0(1 - d)]x \end{cases}. \quad (\text{A.28})$$

$$\begin{cases} x = \tilde{x} + X \\ d = \tilde{d} + D \\ y = \tilde{y} + Y \end{cases}. \quad (\text{A.29})$$

$$\begin{cases} \dot{x} = [A_1 d + A_0(1 - d)]x + [B_1 d + B_0(1 - d)]u \\ y = [\mathcal{C}_1 d + \mathcal{C}_0(1 - d)]x \end{cases}. \quad (\text{A.30})$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} + 0 = [A_1(\tilde{d} + D) + A_0(1 - \tilde{d} - D)](\tilde{x} + X) + [B_1(\tilde{d} + D) + B_0(1 - \tilde{d} - D)]U \\ \tilde{y} + Y = [\mathcal{C}_1(\tilde{d} + D) + \mathcal{C}_0(1 - \tilde{d} - D)](\tilde{x} + X) \end{cases}. \quad (\text{A.31})$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} + 0 = [(A_1 - A_0)\tilde{d} + A_1 D + A_0(1 - D)](\tilde{x} + X) + [(B_1 - B_0)\tilde{d} + B_1 D + B_0(1 - D)]U \\ \tilde{y} + Y = [(\mathcal{C}_1 - \mathcal{C}_0)\tilde{d} + \mathcal{C}_1 D + \mathcal{C}_0(1 - D)](\tilde{x} + X) \end{cases}. \quad (\text{A.32})$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} + 0 = [(A_1 - A_0)\tilde{d} + A](\tilde{x} + X) + [(B_1 - B_0)\tilde{d} + B]U \\ \tilde{y} + Y = [(\mathcal{C}_1 - \mathcal{C}_0)\tilde{d} + \mathcal{C}](\tilde{x} + X). \end{cases} \quad (\text{A.33})$$

Chega-se, por fim, a:

$$\begin{cases} X &= -A^{-1}BU \\ Y &= -CA^{-1}BU, \end{cases} \quad (\text{A.34})$$

e à função de transferência do conversor *Buck*:

$$G(s) = \frac{I_{pv}(DL_0R + D'L_0R)}{(L_0(CL_0Rs^2 + D^2R + 2DD'R + DL_0s + D'^2R + D'L_0s))}. \quad (\text{A.35})$$

A.2.2 Função de transferência do conversor unidirecional em corrente

A partir do desenvolvimento encontrado no Apêndice obtém-se, numericamente, a função de transferência:

$$G(s) = \frac{2,02 \times 10^9 s^3 - 8,68 \times 10^{13} s^2 - 8s - 1,91 \times 10^{21}}{-4,37 \times 10^9 s^3 - 6,56 \times 10^{12} s^2 - 9,73 \times 10^{16} s - 9,52 \times 10^{19}}. \quad (\text{A.36})$$

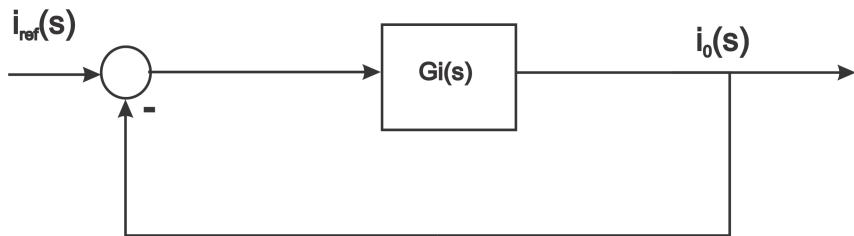
Através do recurso *sisotool* do Matlab obtém-se a função de transferência do controle,

$$C_{bk} = 0,054913 \frac{s + 2742}{s}. \quad (\text{A.37})$$

A.2.3 Controle do conversor

O controle do conversor unidirecional em corrente, nesta tese, é realizado por meio da corrente de saída do conversor. Pretende-se no decorrer do desenvolvimento da tese usá-lo como controlador dos painéis fotovoltaicos de modo a injetar corrente no barramento CC, cujo controle é ilustrado na Figura A.56. Neste contexto, a tensão no barramento CC não é realizado por este conversor, mas pelo conversor bidirecional (A.4).

Figura A.56 – Controle do conversor unidirecional em corrente *Buck*.



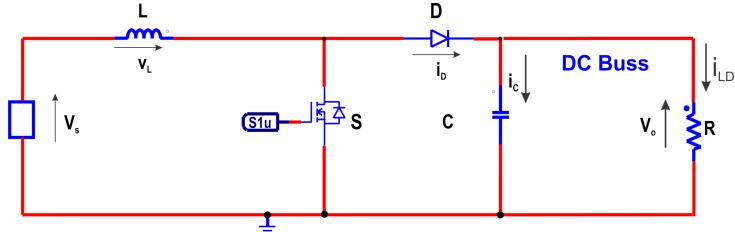
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A.3 CONVERSOR CC-CC UNIDIRECIONAL EM CORRENTE NA CONFIGURAÇÃO *BOOST*

O conversor CC-CC unidirecional em corrente é analisado nesta tese na configuração *Boost*, ou simplesmente *Boost*, com o intuito de dimensionar os componentes que serão empregados no conversor bidirecional em corrente. O conversor *Boost* tem a característica

de elevar a tensão CC ajustando o ciclo de trabalho (D) pelo processo de comutação usando um componente semicondutor. O respectivo circuito do conversor é mostrado na Figura A.57.

Figura A.57 – Conversor CC-CC unidirecional em corrente na configuração *Boost*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Algumas hipóteses são consideradas inicialmente:

- O funcionamento do conversor é estável;
- O regime condução de corrente pelo indutor é Modo de Condução Contínua, do inglês (Continuous Conduction Mode) (CCM);
- A corrente no indutor L_0 é sempre positiva;
- O valor do capacitor de saída é elevado e a tensão de saída é constante (V_o) e maior que a tensão da fonte (V_s);
- O período de chaveamento é T : O interruptor S fica fechado pelo tempo DT e aberto pelo tempo $(1 - D)T$;
- Todos os componentes do circuito são ideais.

A.3.1 Modelamento do conversor

Análise para o interruptor *fechado* conforme se ilustra na Figura A.58. Considerações:

- O indutor L_0 é alimentado pela fonte V_s ;
- Com o diodo D reversamente polarizado tem-se $i_D = 0$;
- O capacitor C garante uma tensão constante na carga ($v_o = V_o$).

Seja a tensão v_{L_0} sobre indutor para o interruptor fechado e o diodo D reversamente polarizado (aberto), então:

$$v_{L_0} = V_s = L_0 \frac{di_{L_0}}{dt}. \quad (\text{A.38})$$

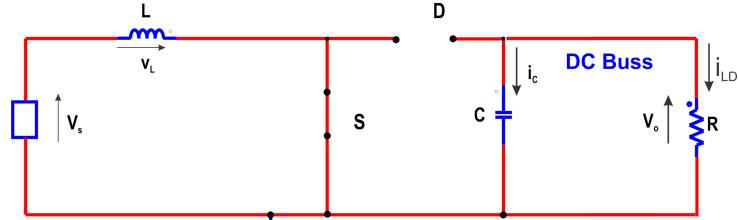
Reescrevendo-se A.38 chega-se a:

$$\frac{di_{L_0}}{dt} \approx \frac{\Delta i_{L_0}}{\Delta t} = \frac{V_s}{L_0} \quad (\text{A.39})$$

e fazendo-se $\Delta t = DT$ em A.39 tem-se o *ripple* da corrente pelo indutor:

$$\Delta i_{L_{0ON}} = \left(\frac{V_s}{L_0} \right) DT. \quad (\text{A.40})$$

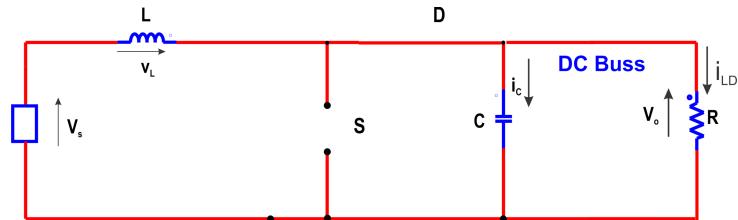
Figura A.58 – Circuito equivalente para o interruptor semicondutor fechado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura A.59 ilustra o caso em que o interruptor S se encontra aberto. O indutor L_0 , carregado no estágio anterior, polariza diretamente o diodo D forçando $i_D = i_{L_0}$. A

Figura A.59 – Circuito equivalente para o interruptor semicondutor aberto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

tensão v_{L_0} , sobre indutor, para o interruptor aberto e o diodo diretamente polarizado se apresenta na seguinte forma no presente caso:

$$v_{L_0} = V_s - V_o = L_0 \frac{di_{L_0}}{dt}. \quad (\text{A.41})$$

Reescrevendo-se A.41 tem-se:

$$\frac{di_{L_0}}{dt} \approx \frac{\Delta i_{L_0}}{\Delta t} = \frac{V_s - V_o}{L_0} \quad (\text{A.42})$$

e fazendo-se $\Delta t = (1 - D)T$ em A.42 tem-se o *ripple* da corrente pelo indutor:

$$\Delta i_{L_{0OFF}} = \left(\frac{V_s - V_o}{L_0} \right) (1 - D)T. \quad (\text{A.43})$$

O funcionamento estável do conversor exige que a corrente no final do período de chaveamento seja igual à do início,

$$\Delta i_{L_{0ON}} + \Delta i_{L_{0OFF}} = 0. \quad (\text{A.44})$$

Substituindo A.40 e A.43 em A.44 tem-se:

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_s}{L_0}\right)DT + \left(\frac{V_s - V_o}{L_0}\right)(1 - D)T &= 0, \\ V_o &= \frac{V_s}{1 - D}. \end{aligned} \quad (\text{A.45})$$

A corrente média no indutor é encontrada sabendo-se que a potência média dissipada na carga deve ser a mesma potência fornecida pela fonte. Assim,

$$P_o = V_o I_o = \frac{V_o^2}{R}. \quad (\text{A.46})$$

Igualando-se A.46 com a expressão da potência de entrada $P_o = V_s I_{L_0}$, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} V_s I_{L_0} &= \frac{V_o^2}{R}, \\ V_s I_{L_0} &= \frac{\left(\frac{V_s}{1 - D}\right)^2}{R}, \\ I_{L_0} &= \frac{V_s}{(1 - D)^2 R}. \end{aligned} \quad (\text{A.47})$$

A.3.2 Efeito da resistência série do capacitor sobre a tensão de saída

Como no caso do conversor CC-CC unidirecional em corrente, a resistência equivalente r_C em série com o capacitor de saída tem uma influência direta sobre a ondulação da tensão na saída,

$$\Delta V_o \approx \Delta V_{o,r_C} = r_C \Delta i_C = r_C I_{L_{0_{max}}}. \quad (\text{A.48})$$

A.3.3 Efeito da resistência série do indutor

Considera-se nesta tese que a corrente pelo indutor é constante a fim de se investigar seu efeito sobre a tensão de saída.

$$\begin{aligned} P_s &= P_o + P_{r_{L_0}}, \\ V_s I_{L_0} &= V_o I_D + r_L I_{L_0}^2. \end{aligned} \quad (\text{A.49})$$

A corrente pelo diodo D é igual a corrente pelo indutor quando o interruptor está desligado e zero caso contrário. P_s e P_o são, respectivamente, as potências de entrada e saída. Portanto, a corrente média no diodo é:

$$I_D = I_{L_0}(1 - D). \quad (\text{A.50})$$

Substituindo A.50 em A.49 tem-se

$$\begin{aligned} V_s I_{L_0} &= V_o I_{L_0}(1 - D) + r_L I_{L_0}^2, \\ V_s &= V_o(1 - D) + r_L I_{L_0}. \end{aligned} \quad (\text{A.51})$$

Isolando-se I_{L_0} em A.51 tem-se

$$I_{L_0} = I_D(1 - D) = \frac{\frac{V_o}{R}}{(1 - D)} \quad (\text{A.52})$$

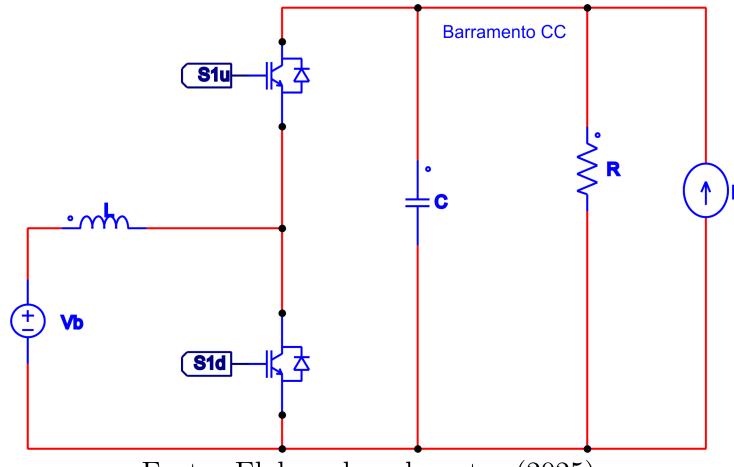
e substituindo-se A.52 em A.51 chega-se ao seguinte resultado:

$$V_o = \frac{V_s}{(1 - D)} \left[\frac{1}{1 + \frac{r_{L_0}}{R(1-D)^2}} \right]. \quad (\text{A.53})$$

A.4 CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL

Adota-se nesta tese o conversor CC-CC Bidirecional, conforme arquitetura ilustrada na Figura A.60, o qual desempenha a função de controle da tensão no barramento CC no valor definido para o projeto, assim como o controle do ciclo de carga e descarga da bateria.

Figura A.60 – CC-CC Bidirecional em corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A.4.1 Modelamento do conversor

Seja $S1_u$, conforme figura A.60, em estado "ligado", então $\dot{x}_1 = \dot{i}_{L_0}$, $x_1 = i_{L_0}$, $\dot{x}_2 = \dot{v}_C$ e $x_2 = v_C$.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 &= \frac{1}{L_0}(-x_2 + u_1) \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C}(x_1 + \frac{x_2}{R} - u_2) \end{cases} \quad (\text{A.54})$$

e

$$\begin{cases} \dot{x} &= A_1x + B_1u \\ y &= C_1x \end{cases}. \quad (\text{A.55})$$

Agora, $S1_d$, em estado "ligado", vem

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{u_1}{L_0} \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{c}(\frac{x_2}{R} + I) \end{cases} \quad (\text{A.56})$$

e

$$\begin{cases} \dot{x} = A_0x + B_10u \\ y = \mathcal{C}_0x. \end{cases} \quad (\text{A.57})$$

x_1 e x_2 representam i_{L_0} e v_c . u_1 e u_2 representam as fontes v_{batt} e I . Logo,

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L_0}(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}; u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_B \\ I \end{bmatrix}, \quad (\text{A.58})$$

assim como

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L_0}(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = x(t). \quad (\text{A.59})$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_0} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_0} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \text{ e } C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.60})$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}; B_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \text{ e } C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.61})$$

Por fim,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{D}{L_0} \\ \frac{D}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_0} & 0 \\ 0 & -\frac{D+D'}{C} \end{bmatrix} \text{ e } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.62})$$

Acima configura-se o sistema em função de v_c , cuja configuração se dá através da matriz \mathcal{C} .

A descrição em variáveis de estado é encontrada nas equações de A.28 a A.34.

A.4.1.1 Análise de pequenas perturbações

Mediante a dimensão das constantes de tempo do sistema em relação às pequenas quantidades \tilde{x} e \tilde{d} , pode-se fazer

$$\tilde{x} \cdot \tilde{d} = 0, \quad (\text{A.63})$$

portanto

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} + 0 = (A_1 - A_0)\tilde{d}X + A\tilde{x} + AX + (B_1 - B_0)\tilde{d}U + BU \\ \tilde{y} + Y = (\mathcal{C}_1 - \mathcal{C}_0)\tilde{d}X + \mathcal{C}\tilde{x} + \mathcal{C}X \end{cases}. \quad (\text{A.64})$$

A.4.1.2 Separação dos componentes CC e CA

Seja o componente CC

$$\begin{cases} AX + BU = 0 \\ Y = CX \end{cases} \rightarrow \begin{cases} X = -A^{-1}BU \\ Y = -CA^{-1}BU \end{cases} \quad (\text{A.65})$$

e o componente CA

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = A\tilde{x}[(A_1 - A_0)X + (B_1 - B_0)U]d \\ \tilde{y} = C\tilde{x} + (C_1 - C_0)dX \end{cases} \quad (\text{A.66})$$

A.4.1.3 Passando ao domínio da frequência s

$$\begin{cases} s\tilde{X}(s) = A\tilde{X}(s) + [(A_1 - A_0)X(s) + (B_1 - B_0)U(s)]d(s) \\ \tilde{Y}(s) = C\tilde{X}(s) + (C_1 - C_0)X(s)d(s). \end{cases} \quad (\text{A.67})$$

$$\tilde{X}(s) = (sI - A)^{-1}[(A_1 - A_0)X(s) + (B_1 - B_0)U(s)]d(s). \quad (\text{A.68})$$

Obtém-se, por fim, a função de transferência:

$$G(s) = \frac{\tilde{Y}(s)}{\tilde{d}(s)} = C(sI - A)^{-1}[(A_1 - A_0)X(s) + (B_1 - B_0)U(s)] + (C_1 - C_0)X(s). \quad (\text{A.69})$$

A partir de A.69 deriva-se as funções de transferência

$$\begin{aligned} G(s) &= \begin{bmatrix} G_{id}(s) \\ G_{vd}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{iL(s)}{\tilde{d}(s)} \\ \frac{vc(s)}{\tilde{d}(s)} \end{bmatrix} \\ &= \left[-\frac{CDR \left(-\frac{I(-D+D')}{D} - \frac{vb(D+D')(-DL_0-D'L_0)}{D^2L_0R} \right)}{CL_0Rs^2+D^2R+DL_0s+D'L_0s} - \frac{vb(D+D')(CL_0Rs+DL_0+D'L_0)}{DL_0(CL_0Rs^2+D^2R+DL_0s+D'L_0s)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{CL_0Rs \left(-\frac{I(-D+D')}{D} - \frac{vb(D+D')(-DL_0-D'L_0)}{D^2L_0R} \right)}{CL_0Rs^2+D^2R+DL_0s+D'L_0s} - \frac{Rvb(D+D')}{CL_0Rs^2+D^2R+DL_0s+D'L_0s} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.70})$$

A.4.1.4 Variável de saída

Seja a variável de saída

$$y = Cx. \quad (\text{A.71})$$

A partir de A.70, tem-se:

1. corrente de saída:

$$\frac{i\tilde{L}_0(s)}{\tilde{d}(s)} = -\frac{\frac{CDR}{C} \left(-2I - \frac{I(-D+D')}{D} - \frac{vb(D+D')(-DL_0-D'L_0)}{D^2L_0R} \right)}{CL_0Rs^2+D^2R+DL_0s+D'L_0s} - \frac{vb(D+D')(CL_0Rs+DL_0+D'L_0)}{DL_0(CL_0Rs^2+D^2R+DL_0s+D'L_0s)} \quad (\text{A.72})$$

2. tensão de saída:

$$\left\{ \frac{\tilde{v}_c(s)}{\tilde{d}(s)} \right. = \frac{\frac{CL_0Rs}{C} \left(-2I + -\frac{I(-D+D')}{D} - \frac{vb(D+D')(-DL_0-D'L_0)}{D^2L_0R} \right)}{CL_0Rs^2 + D^2R + DL_0s + D'L_0s} - \frac{Rvb(D+D')}{CL_0Rs^2 + D^2R + DL_0s + D'L_0s} \quad (\text{A.73})$$

A.4.2 Função de transferência do Conversor Bidirecional em corrente

As equações a seguir definem as funções individuais de transferência utilizadas no controle em cascata do conversor bidirecional em corrente:

1. A partir do desenvolvimento encontrado no Apêndice, chega-se à função de transferência da corrente no indutor:

$$\frac{\tilde{I}_{L_0}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{-2,93 \times 10^8 s - 9,69 \times 10^{10}}{1200s^2 + 2,4 \times 10^5 s + 6,02 \times 10^8} \quad (\text{A.74})$$

e à função de transferência da tensão na saída, ou seja, no barramento CC:

2. tensão de saída: A partir de A.73, chega-se a

$$\frac{\tilde{V}_s(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{9,2 \times 10^7 s^3 - 3,33 \times 10^{11} s^2 - 2,41 \times 10^{13} s - 1,76 \times 10^{17}}{-2,93 \times 10^8 s^3 - 1,55 \times 10^{11} s^2 - 1,66 \times 10^{14} s - 4,86 \times 10^{16}} \quad (\text{A.75})$$

A equação A.76 representa a função de transferência em malha fechada do Conversor Bidirecional.

$$G_{iv}(s) = \frac{2,56 \times 10^{12} s^6 - 4,84 \times 10^{15} s^5 - 1,42 \times 10^{19} s^4 - 1,41 \times 10^{22} s^3 - 1,04 \times 10^{25} s^2 - 4,59 \times 10^{27} s - 7,41 \times 10^{29}}{-3,51 \times 10^{11} s^7 - 3,66 \times 10^{14} s^6 - 6,1 \times 10^{17} s^5 - 3,72 \times 10^{20} s^4 - 2,37 \times 10^{23} s^3 - 7,97 \times 10^{25} s^2 - 9,86 \times 10^{27} s - 7,41 \times 10^{29}} \quad (\text{A.76})$$

Os controladores C_{vc} e C_{iL} foram obtidos utilizando-se a ferramenta *Sisotool* do Matlab, cujas funções de transferência resultaram, respectivamente, em:

$$C_{vc}(s) = \frac{0,18389(s + 1389)}{s} \quad (\text{A.77})$$

e

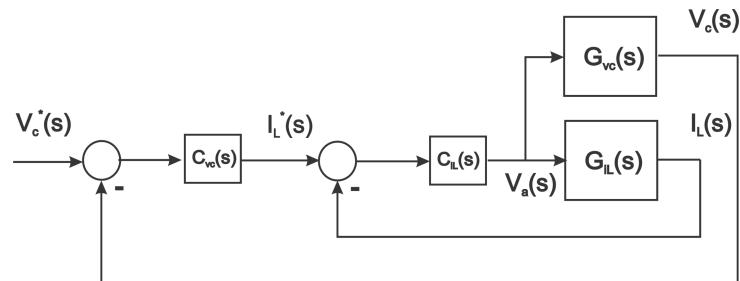
$$C_{iL}(s) = \frac{-0,0011645(s + 411,2)}{s}. \quad (\text{A.78})$$

A.4.3 Controle do conversor

Adota-se controle em cascata. Seja o diagrama ilustrado na figura A.61. A definição do parâmetro D se dá através de análise em malha aberta, individualmente para $G_{iL}(s)$ e $G_{vc}(s)$.

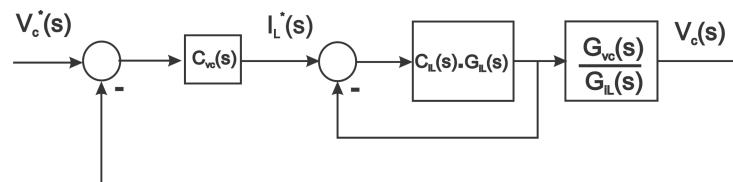
é possível provar que se chega à figura A.62 a partir da figura A.61 e, por fim, chega-se a figura A.63.

Figura A.61 – Controle em cascata.



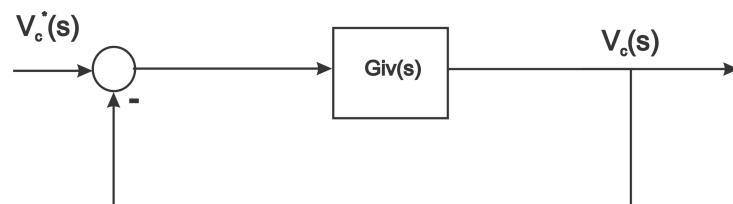
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura A.62 – Controle em cascata - simplificação I.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura A.63 – Controle em cascata - final.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).