



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA OPERAÇÃO
COLABORATIVA DE MICRORREDES**

PAULO HENRIQUE CARDOSO DA CUNHA

Orientador: Osvaldo Ronald Saavedra Mendez, Dr.
Universidade Federal do Maranhão

SÃO LUÍS
2024

PAULO HENRIQUE CARDOSO DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA OPERAÇÃO
COLABORATIVA DE MICRORREDES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Osvaldo Ronald Saavedra Mendez, Dr.
Universidade Federal do Maranhão

SÃO LUÍS
2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Cunha, Paulo Henrique Cardoso.

Avaliação dos benefícios da operação colaborativa de microrredes / Paulo Henrique Cardoso Cunha. - 2024.

144 p.

Orientador(a): Osvaldo Ronald Saavedra Mendez.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

1. Geração Distribuída. 2. Geração Renovável. 3. Gerenciamento Energético. 4. Microrredes. 5. Multimicrorredes. I. Mendez, Osvaldo Ronald Saavedra. II. Título.

PAULO HENRIQUE CARDOSO DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA OPERAÇÃO
COLABORATIVA DE MICRORREDES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

São Luís, 19 de abril de 2024

Oswaldo Ronald Saavedra Mendez, Dr.
Orientador

Denisson Queiroz Oliveira, Dr.
Universidade Federal do Maranhão

José Gomes de Matos, Dr.
Universidade Federal do Maranhão

Bartolomeu Ferreira dos Santos Júnior, Dr.
Universidade Federal do Piauí

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por continuar me abençoando mesmo em meus momentos de falha.

Aos meus pais, Paulo e Célia, por sempre terem me proporcionado todo o necessário para continuar meus estudos, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.

À minha Laisse, por todo amor, cuidado, companheirismo e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pois sem a paz que você me traz, o caminho, com certeza, seria muito mais árduo e difícil.

Ao meu orientador, prof. Osvaldo Saavedra, que me acompanha desde a graduação, pelo direcionamento e valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho. A toda a equipe do Instituto de Energia Elétrica da UFMA, que contribuiu direta ou indiretamente para o trabalho realizado.

À CAPES pelo suporte financeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMA pela oportunidade para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da banca, pela disponibilidade para avaliar e contribuir para a melhoria deste trabalho.

*"I don't want to live in the past
So I'm looking for a brighter day." (Alborosie)*

RESUMO

O aumento na demanda por energia elétrica vem crescendo nos últimos anos devido ao crescimento populacional e desenvolvimento de novas tecnologias que exigem fornecimento energético contínuo e confiável. Por outro lado, a crescente atividade industrial vista em tempos recentes impactou fortemente os níveis de gases poluentes lançados à atmosfera, o que acendeu um alerta nas nações e órgãos competentes. O surgimento das fontes renováveis aliado ao desenvolvimento da eletrônica de potência tornou possível a utilização de recursos energéticos distribuídos próximos às cargas, concebendo então o conceito das microrredes, que geram energia de maneira limpa, contribuindo com o meio ambiente, e também fornecem confiabilidade e resiliência ao sistema elétrico, devido a sua capacidade de operar de forma isolada. As microrredes têm associado uma série de atributos que as tornam o pilar das redes inteligentes e, principalmente, da transição energética, tornando os consumidores atores do sistema, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade do serviço elétrico. Neste contexto, esta dissertação apresenta o estudo da operação colaborativa de microrredes, que dão origem às multimicrorredes, que são um conjunto de microrredes interligadas que tornam possível o intercâmbio de energia entre as diversas constituintes do *cluster*. Considerando três microrredes, são comparados os resultados da operação isolada e colaborativa entre elas, tanto no aspecto operacional quanto econômico. Os resultados demonstraram os benefícios da operação colaborativa em relação à operação isolada, uma vez que torna possível o escoamento do excedente de geração de uma microrrede para outra que esteja necessitando de energia naquele momento, diminuindo a energia vertida e aumentando a receita para um agente, ao mesmo tempo que contribui com o aumento da confiabilidade e resiliência para o outro agente.

Palavras-chave: Microrredes, Geração Renovável, Multimicrorredes, Geração Distribuída, Gerenciamento Energético.

ABSTRACT

The demand for electrical energy has been rising due to population growth and the advent of new technologies that need a constant and reliable energy supply. Concurrently, increased industrial activity in recent years has significantly impacted atmospheric pollution levels, prompting concerns among nations and regulatory bodies. The introduction of renewable energy sources, along with advances in power electronics, has enabled the utilization of distributed energy resources close to consumption points, leading to the concept of microgrids. These systems not only generate energy in an environmentally friendly manner but also enhance the reliability and resilience of the electrical grid through their capacity for islanded operation. Microgrids are foundational to smart grids and are crucial in the energy transition, transforming consumers into proactive participants, lowering costs, and improving the reliability of electrical services. In this context, this dissertation explores the collaborative operation of microgrids, leading to the formation of multi-microgrids — a network of interconnected microgrids that facilitates energy exchanges within the cluster. By comparing the operational and economic outcomes of three microgrids in both isolated and collaborative scenarios, the study highlights the advantages of cooperation. Collaborative operation allows for the redistribution of excess generation to microgrids in need, minimizing wasted energy and enhancing revenue for one agent while boosting reliability and resilience for others.

Keywords: Microgrids, Renewable Generation, Multimicrogrids, Distributed Generation, Energy Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Rede de distribuição com a presença de diversas microrredes.	4
Figura 2.1 – Composição de uma microrrede.	11
Figura 2.2 – Sistemas de distribuição radial, em malha e em rede, respectivamente.	11
Figura 2.3 – Setores de instalação de microrredes.	12
Figura 2.4 – Desafios da implementação de microrredes.	18
Figura 3.1 – Arquitetura radial.	25
Figura 3.2 – Arquitetura em anel.	26
Figura 3.3 – Arquitetura em malha.	27
Figura 3.4 – Arquitetura (a) MRs seriais com alimentador simples, (b) MRs paralelas com alimentador simples e (c) MRs interligadas com múltiplos alimentadores.	28
Figura 3.5 – Arquitetura de controle centralizado.	30
Figura 3.6 – Arquitetura de controle descentralizado.	31
Figura 3.7 – Arquitetura de controle centralizado.	32
Figura 3.8 – Controle hierárquico em multimicrorredes.	33
Figura 3.9 – Estruturas de comunicação em multimicrorredes.	35
Figura 3.10–Principais diferenças entre resiliência e confiabilidade.	38
Figura 3.11–Curva de resiliência com o impacto das microrredes.	38
Figura 4.1 – Comportamento da demanda e geração para a microrrede 1.	49
Figura 4.2 – Comportamento da demanda e geração para a microrrede 2.	50
Figura 4.3 – Comportamento da demanda e geração para a microrrede 3.	50
Figura 4.4 – Diagrama de conexão das microrredes simuladas em operação isolada.	51
Figura 4.5 – Potências instantâneas na microrrede 1 no período de operação entre 5h e 11h.	54
Figura 4.6 – Potência instantânea vertida na microrrede 1 no período de operação entre 5h e 11h.	55
Figura 4.7 – SOC do BESS 1 no período de operação entre 5h e 11h.	55
Figura 4.8 – Balanço energético da microrrede 1 no período de operação entre 5h e 11h.	56
Figura 4.9 – Potências instantâneas na microrrede 1 no período de operação entre 14h e 20h.	58
Figura 4.10–SOC do BESS 1 no período de operação ilhada das 14h às 20h.	58

Figura 4.11–Potência instantânea vertida na microrrede 1 no período de operação ilhada das 14h às 20h.	59
Figura 4.12–Balanço energético da microrrede 1 no período de operação ilhada das 14h às 20h.	60
Figura 4.13–Potências instantâneas na microrrede 2 no período de operação entre 5h e 11h.	62
Figura 4.14–Corte de carga instantâneo na microrrede 2 na operação ilhada entre às 5h e 11h.	63
Figura 4.15–SOC do BESS 2 na operação ilhada entre às 5h e 11h.	63
Figura 4.16–Balanço energético da microrrede 2 na operação ilhada entre às 5h e 11h.	64
Figura 4.17–Comportamento da microrrede 2 na operação ilhada entre 14h e 20h.	66
Figura 4.18–Corte de carga instantâneo na microrrede 2 na operação ilhada entre 14h e 20h.	66
Figura 4.19–SOC do BESS 2 na operação ilhada entre às 14h e 20h.	67
Figura 4.20–Balanço energético da microrrede 2 na operação ilhada entre às 14h e 20h.	67
Figura 4.21–Comportamento da microrrede 3 na operação ilhada entre às 5h e 11h.	69
Figura 4.22–SOC do BESS da microrrede 3 na operação isolada entre às 5h e 11h.	69
Figura 4.23–Potência instantânea vertida no período de operação ilhada.	70
Figura 4.24–Balanço energético da microrrede 3 entre 5h e 11h.	70
Figura 4.25–Comportamento da microrrede 3 na operação ilhada entre 14h e 20h.	72
Figura 4.26–Potência instantânea vertida na microrrede 3 no período de operação ilhada das 14h às 20h.	72
Figura 4.27–SOC do BESS 3 no período de operação ilhada das 14h às 20h.	73
Figura 4.28–Balanço energético da microrrede 3 no período de operação ilhada entre às 14h e 20h.	74
Figura 4.29–Configuração física da interligação entre as microrredes.	76
Figura 4.30–Comportamento do corte de carga e transações de potência da microrrede 2 na operação colaborativa entre 5h e 11h.	79
Figura 4.31–Potência instantânea vertida na operação colaborativa na microrrede 1.	79
Figura 4.32–Balanço energético da microrrede 1 na operação colaborativa entre às 5h e 11h.	80
Figura 4.33–Balanço energético da microrrede 2 na operação colaborativa entre às 5h e 11h.	81
Figura 4.34–Comportamento do corte de carga e transações de potência da microrrede 2 na operação colaborativa entre 14h e 20h.	82
Figura 4.35–Potência instantânea vertida nas microrredes 1 e 3 na operação colaborativa entre 14h e 20h.	82

Figura 4.36–Balanço energético da microrrede 1 na operação colaborativa entre às 14h e 20h.	83
Figura 4.37–Balanço energético da microrrede 2 na operação colaborativa entre às 14h e 20h.	83
Figura 4.38–Fluxograma das etapas de comercialização de energia.	86
Figura 4.39–Comportamento do corte de carga e transações de potência da microrrede 2 na operação colaborativa entre 14h e 20h, com possibilidade de intercâmbio de energia do BESS.	86
Figura 4.40–Balanço energético da microrrede 2 na operação colaborativa entre às 14h e 20h, com possibilidade do intercâmbio de energia do BESS. . .	88
Figura 4.41–SOC dos sistemas de armazenamento com a possibilidade de intercâmbio de energia dos BESS.	88
Figura 4.42–Balanço energético da comercialização das microrredes.	89
Figura 4.43–Custo instantâneo de perda de oportunidade das microrredes 1 e 3 no período das 5h às 11h.	91
Figura 4.44–Custo acumulado de perda de oportunidade das microrredes 1 e 3 no período das 5h às 11h.	91
Figura 4.45–Custo instantâneo de perda de oportunidade das microrredes 1 e 3 no período das 14h às 20h.	92
Figura 4.46–Custo acumulado de perda de oportunidade das microrredes 1 e 3 no período das 14h às 20h.	92
Figura 4.47–Custo e receita instantâneos das microrredes na operação colaborativa no período das 5h às 11h.	94
Figura 4.48–Custo e receita acumulados das microrredes na operação colaborativa no período das 5h às 11h.	95
Figura 4.49–Custo e receita instantâneos das microrredes 1 e 3 na operação colaborativa no período das 14h às 20h.	96
Figura 4.50–Custo e receita acumulados das microrredes 1 e 3 na operação colaborativa no período das 14h às 20h.	97
Figura 4.51–Custo e receita instantâneos das microrredes 1, 2 e 3 na operação colaborativa no período das 14h às 20h, considerando a comercialização da energia nos sistemas de armazenamento.	98
Figura 4.52–Custo e receita acumulado das microrredes 1, 2 e 3 na operação colaborativa no período das 14h às 20h, considerando a comercialização da energia nos sistemas de armazenamento.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Capacidade instalada em cada microrrede.	49
Tabela 4.2 – Resumo energético da microrrede 1 entre às 5h e 11h.	57
Tabela 4.3 – Resumo energético da microrrede 1 entre às 14h e 20h.	61
Tabela 4.4 – Resumo energético da microrrede 2 no período das 5h às 11h.	65
Tabela 4.5 – Resumo energético da microrrede 2 no período das 14h às 20h.	68
Tabela 4.6 – Resumo energético da microrrede 3 no período das 5h às 11h.	71
Tabela 4.7 – Resumo energético da microrrede 3 no período das 14h às 20h.	75
Tabela 4.8 – Resumo energético comparativo da microrrede 1 no período das 5h às 11h.	100
Tabela 4.9 – Resumo energético comparativo da microrrede 2 no período das 5h às 11h.	101
Tabela 4.10–Resumo energético comparativo da microrrede 3 no período das 5h às 11h.	102
Tabela 4.11–Resumo energético comparativo da microrrede 1 no período das 14h às 20h.	104
Tabela 4.12–Resumo energético comparativo da microrrede 2 no período das 14h às 20h.	105
Tabela 4.13–Resumo energético comparativo da microrrede 3 no período das 14h às 20h.	106
Tabela 4.14–Comparação de desempenho das microrredes no período entre às 5h e 11h.	107
Tabela 4.15–Comparação de desempenho das microrredes no período entre às 14h e 20h.	107

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de temperatura dos painéis (considerado igual a $-0,41\%/^{\circ}\text{C}$)
\mathbf{A}	Matriz de conexão entre as microrredes do <i>cluster</i>
β	Tarifa da energia contida nos sistemas de armazenamento [R\$/kWh]
$C_{i,BESS}$	Capacidade energética do sistema de armazenamento da i -ésima microrrede [kWh]
$C_i(\cdot)$	Função de custo associado à geração na i -ésima microrrede
ε	Tarifa da energia em excesso [R\$/kWh]
\mathbf{e}_i	Coluna i da matriz identidade
$E_i^{(g)}$	Energia total gerada pela i -ésima microrrede [kWh]
$E_i^{(c)}$	Energia total demandada pela i -ésima microrrede [kWh]
$E_i^{(cut)}$	Energia cortada na microrrede i [kWh]
$\mathbf{E}_i^{(b)}$	Vetor de energia total comprada pela i -ésima microrrede [kWh]
$\mathbf{E}_i^{(s)}$	Vetor de energia total vendida pela i -ésima microrrede [kWh]
$E_{i,BESS}$	Energia contida no sistema de armazenamento da i -ésima microrrede [kWh]
$E_i^{(BESS_{out})}$	Energia fornecida pelo sistema de armazenamento da i -ésima microrrede [kWh]
$E_i^{(BESS_{in})}$	Energia absorvida pelo sistema de armazenamento da i -ésima microrrede [kWh]
$E_{i,BESS}^{disp}$	Energia disponível para comercialização pelo sistema de armazenamento da microrrede i [kWh]
$E_{i,j}$	Energia fluindo da microrrede i em direção à microrrede j [kWh]

$E_{i,j}^{exc}$	Energia advinda do excedente de geração fluindo da microrrede i para a microrrede j [kWh]
$E_{i,j}^{BESS}$	Energia advinda do sistema de armazenamento da microrrede i para a microrrede j [kWh]
\mathcal{F}	Função multiobjetivo a ser minimizada
f_{PV}	Fator de redução da geração, que representa as perdas naturais na eficiência dos painéis (considerado igual a 0,8)
$G(t)$	Valor de irradiância no instante t [kW/m^2]
κ_i	Índice de atendimento às cargas da microrrede i
κ_i^{isol}	Índice de atendimento às cargas da microrrede i na operação isolada
κ_i^{colab}	Índice de atendimento às cargas da microrrede i na operação colaborativa
$\kappa_{i,BESS}^{colab}$	Índice de atendimento às cargas da microrrede i na operação colaborativa com possibilidade de comercialização da energia contida nos sistemas de armazenamento
L_i^{aval}	Carga avaliada no intervalo de interesse [kW]
L^{cut}	Corte de carga da multimicrorrede [kW]
$L_i(t)$	Carga da microrrede i no instante t [kW]
L_i^{atend}	Carga atendida na microrrede i [kW]
L_i^{cut}	Corte de carga na microrrede i [kW]
$L_{i,isol}^{cut}$	Corte de carga na microrrede i na operação isolada [kW]
$L_{i,colab}^{cut}$	Corte de carga na microrrede i na operação colaborativa [kW]
L_i^{tot}	Carga total na microrrede i [kW]
M	Quantidade de microrredes constituintes do <i>cluster</i>
$\sigma_{i,j}$	Tarifa da utilização do sistema físico de interconexão entre as microrredes i e j [R\$/kWh]
ρ	Penalidade por energia cortada na i -ésima microrrede [R\$/kWh]
$P_{i,BESSin}$	Potência nos terminais do sistema de armazenamento da i -ésima microrrede [kW]

P_j	Potência gerada localmente na microrrede j [kW]
P_j^{load}	Potência de carga da microrrede j [kW]
P_{ij}	Potência fluindo da microrrede i para a microrrede j
$P_{PV,N}$	Potência nominal do arranjo fotovoltaico [kWp]
PV_i	Potência fotovoltaica gerada na i -ésima microrrede [kW]
$PV_i(t)$	Potência fotovoltaica gerada na i -ésima microrrede no instante t [kW]
PV_i^{min}	Limite mínimo da potência fotovoltaica gerada na i -ésima microrrede [kW]
PV_i^{max}	Limite máximo da potência fotovoltaica gerada na i -ésima microrrede [kW]
PV_{out}	Potência de saída do arranjo fotovoltaico [kW]
\mathcal{R}	Índice de resiliência da multimicrorrede [kW^{-1}]
\mathcal{R}_i	Índice de resiliência da i -ésima microrrede [kW^{-1}]
\mathcal{R}_i^{isol}	Índice de resiliência da microrrede i na operação isolada [kW^{-1}]
\mathcal{R}_i^{colab}	Índice de resiliência da microrrede i na operação colaborativa [kW^{-1}]
$\mathcal{R}_{i,BESS}^{colab}$	Índice de resiliência da microrrede i na operação colaborativa com possibilidade de comercialização da energia contida nos sistemas de armazenamento [kW^{-1}]
SOC_i	Estado de carga do sistema de armazenamento da microrrede i
SOC_i^{min}	Limite mínimo do estado de carga do sistema de armazenamento da microrrede i
SOC_i^{max}	Limite máximo do estado de carga do sistema de armazenamento da microrrede i
T	Intervalo total analisado [h]
t_0	Instante de avaliação da operação [min]
T_C	Temperatura no painel (considerado igual a 25°C)
T_{STC}	Temperatura de operação nominal (considerado igual a 45°C)
WT_i	Potência eólica gerada na i -ésima microrrede [kW]

$WT_i(t)$	Potência eólica gerada na i -ésima microrrede no instante t [kW]
WT_i^{min}	Limite mínimo da potência eólica gerada na i -ésima microrrede [kW]
WT_i^{max}	Limite máximo da potência eólica gerada na i -ésima microrrede [kW]
$\gamma(\cdot)$	Função de custo associado à compra de energia [R\$]

SUMÁRIO

1 – Introdução	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo Geral	5
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 Metodologia	5
1.4 Estrutura do Trabalho	6
2 – Uma Visão Geral das Microrredes	7
2.1 Aspectos Históricos	7
2.2 Definições	8
2.3 Classificações	9
2.3.1 Tamanho	10
2.3.2 Topologia	11
2.3.3 Setor de Instalação	12
2.3.4 Tipo da Corrente (CC/CA)	13
2.3.5 Forma de Operação	13
2.4 Vantagens e Desafios	14
2.4.1 Vantagens	14
2.4.2 Desafios	17
2.5 Mercado e Aspectos Regulatórios	19
2.6 Conclusões do Capítulo	21
3 – Multimicrorredes	22
3.1 O que são as Multimicrorredes?	22
3.2 Estado-da-Arte	24
3.2.1 Arquiteturas	24
3.2.1.1 Arquitetura Radial	25
3.2.1.2 Arquitetura em Anel	25
3.2.1.3 Arquitetura em Malha	26
3.2.1.4 Arquiteturas considerando os alimentadores do Sistema de Distribuição	27
3.2.2 Sistemas de Controle	29
3.2.2.1 Controle Centralizado	30
3.2.2.2 Controle Descentralizado	31
3.2.2.3 Controle Distribuído	32

3.2.2.4	Controle Hierárquico	32
3.2.3	Sistemas de Comunicação	34
3.3	Contribuições da Operação Colaborativa na Resiliência	36
3.4	Perspectivas Futuras das Multimicrorredes	41
3.5	Conclusões do Capítulo	42
4	Análise da Operação de Microrredes Colaborativas	44
4.1	Formulação do Problema	44
4.1.1	Operação Colaborativa	45
4.1.2	Operação Ilhada	47
4.1.3	Quantificação de Resiliência	48
4.2	Dados de Simulação	48
4.3	Configuração Física das Microrredes	51
4.3.1	Modelagem Matemática das Fontes	51
4.4	Operação das Microrredes	53
4.4.1	Operação no Caso Base	53
4.4.1.1	Microrrede 1	53
4.4.1.2	Microrrede 2	62
4.4.1.3	Microrrede 3	68
4.4.2	Operação Colaborativa	74
4.4.2.1	Venda exclusiva de energia vertida	78
4.4.2.2	Venda de energia pelo BESS	85
4.4.3	Análise Financeira	89
4.4.3.1	Operação Isolada	90
4.4.3.2	Operação Colaborativa	93
4.5	Operação Isolada <i>versus</i> Colaborativa	100
4.6	Conclusões do Capítulo	108
5	Conclusões	109
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	110
5.2	Artigos Associados à Dissertação	111
	Referências	112

INTRODUÇÃO

Os sistemas de potência modernos vêm se transformando para acomodar cada vez mais as fontes renováveis em sua operação. Tal fato é motivado, em grande parte, pelos crescentes índices de poluentes lançados na atmosfera, seja pelo gradativo aumento das atividades industriais ou, até mesmo, pela utilização de carros com motores a combustão e usinas termelétricas, resultando em mudanças climatológicas e, conseqüentemente, em eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes [1]. Assim, com esta crescente preocupação ambiental, deve-se pensar em formas de diminuir a utilização de processos que resultem na emissão de gases de efeito estufa à atmosfera.

Como uma alternativa para a diminuição da emissão de poluentes pelo setor elétrico, as fontes renováveis de energia vêm, progressivamente, ganhando força e espaço no cenário energético, como mostram os dados e perspectivas de produção de energia para diferentes períodos disponibilizados pela Agência Internacional de Energia (IEA, do inglês *International Energy Agency*) [2]. Tal fato se deve em grande parte ao avanço da eletrônica de potência, que tornou possível a conversão entre os tipos de tensão (CA e CC) e controle dos níveis de frequência e potência de saída em fontes intermitentes. Além de contribuírem para a descarbonização da rede, as fontes renováveis trazem consigo diversas vantagens, como o aumento da flexibilidade da rede e a possibilidade de levar energia a locais remotos, em que a rede convencional não é capaz de atender por empecilhos técnicos ou econômicos [3].

Alinhado aos aspectos ambientais, as fontes renováveis também contribuem fortemente para a diversificação da matriz energética dos sistemas elétricos, impactando também na segurança operativa da rede elétrica. Essa diversificação é fundamental para o setor elétrico de um país, pois faz com que a oferta de energia seja advinda de diferentes fontes de geração, não se tornando refém apenas de um tipo de fonte. Em

um contexto que há severas mudanças ambientais, tais transformações no clima podem impactar veementemente uma fonte de geração em específico. No caso do Brasil, em que há predominância da geração hidrelétrica, as mudanças climáticas podem impactar no ciclo hidrológico da água e, conseqüentemente, na capacidade de geração da fonte, demonstrando a vulnerabilidade de uma matriz com pouca diversidade [4].

Além dos benefícios no âmbito ambiental, as fontes alternativas também contribuem para o aumento da flexibilidade operacional do sistema elétrico, uma vez que as dimensões físicas dos equipamentos geradores de energia renovável, como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas de baixas potências, tornam possível a utilização desses recursos energéticos próximos às cargas, dando origem às microrredes, que possuem algumas características intrínsecas, como o uso significativo de fontes de caráter renovável, a proximidade entre a geração e os consumidores, extinguindo a necessidade da utilização de linhas de transmissão.

O paradigma clássico dos sistemas elétricos se dá através da geração centralizada, em que há grandes usinas situadas a longas distâncias dos centros de carga, em que o fornecimento de energia elétrica se dá através de longas linhas de transmissão. Entretanto, esse modelo de sistema possui menos segurança operativa, uma vez que podem acontecer faltas nas linhas, podendo causar o desligamento de grandes quantidades de carga simultaneamente. Já com a possibilidade de descentralização da geração através da utilização de microrredes, torna-se possível a alimentação de determinadas cargas durante *blackouts*, devido a sua capacidade de desconexão da rede principal, sendo de fundamental importância para o contínuo funcionamento de instituições de missão crítica, como hospitais [5]. Ainda, a possibilidade da utilização de microrredes interconectadas torna possível o intercâmbio de energia entre os diferentes agentes do sistema, melhorando assim a resiliência e flexibilidade da rede [6].

O estudo da operação das microrredes já vem sendo difundido há algum tempo e para as mais diversas aplicações, tais como o fornecimento energético para comunidades isoladas [7] e em redes de missão crítica [8]. Entretanto, a operação colaborativa de microrredes vem ganhando notoriedade mais recentemente devido à possibilidade do intercâmbio de energia entre diferentes microrredes, permitindo que, em condições de emergência, as microrredes permaneçam interconectadas entre si e isoladas da rede principal, possibilitando a melhoria da confiabilidade do sistema [9]. Todavia, ainda existem lacunas a serem preenchidas no âmbito da operação de microrredes interconectadas, uma vez que os sistemas de controle e gerenciamento, bem como os aspectos regulatórios, tornam-se mais complexos.

Devido a grande versatilidade de sua utilização, as microrredes vêm sendo utilizadas de diversas formas para o aprimoramento da operação das redes elétricas no tocante à resiliência e confiabilidade. Em [10] é realizado um estudo acerca da utilização

de microrredes interligadas para melhoria da resiliência do sistema de distribuição contra desastres naturais. Na pesquisa são considerados painéis solares juntamente com baterias. Os resultados obtidos indicam que as microrredes interligadas apresentam o potencial de fornecer suporte ao sistema de distribuição durante interrupções no fornecimento. Uma pesquisa semelhante pode ser encontrada em [11].

A fim de apresentar os benefícios e desafios das microrredes interligadas, em [12] é apresentada uma revisão acerca das microrredes aninhadas e seus benefícios e desafios associados, a fim de avaliar o seu potencial para aplicações em larga escala. Em [13] é apresentada por uma revisão acerca da modelagem e estratégias operacionais das microrredes para melhoria da resiliência do sistema. Em [14] é realizada uma revisão sobre a utilização de microrredes para melhorar a resiliência sob a perspectiva de dois aspectos: formação ótima da microrrede e programação ótima da microrrede e do seu gerenciamento de energia. Assim, é possível observar que a utilização das microrredes para a melhoria da resiliência e confiabilidade da rede é um tema que vem crescendo nos últimos tempos devido a sua diversa aplicabilidade e resultados promissores.

1.1 Justificativa

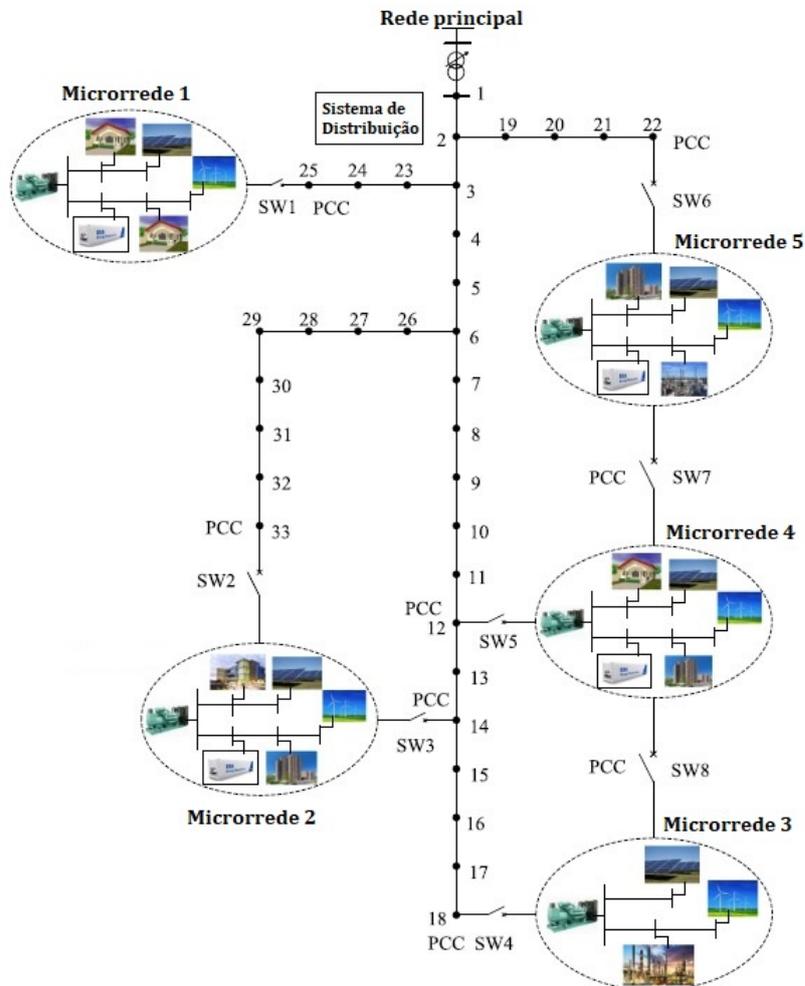
Comumente, os sistemas de potência são projetados levando em consideração contingências de ordem $n - 1$ e/ou $n - 2$, isto é, o acontecimento de uma ou duas falhas simultâneas [15]. Entretanto, o acontecimento de grandes desastres naturais, como no caso de furacões e tsunamis, podem ocasionar impactos de extensas proporções no setor elétrico, como no caso do terremoto Fukushima, em 2016 no Japão [16], e dos furacões Sandy [17] e Katrina, em 2012 e 2008 nos Estados Unidos, respectivamente, em que este último apresentou quase três milhões de contingências [18].

Alinhado aos problemas relacionados aos aspectos ambientais, a evolução dos dispositivos de comunicação tornou possível o controle e monitoramento das redes elétricas, dando origem às vulnerabilidades do mundo digital, como ataques cibernéticos. Segundo dados apresentados pela Agência Internacional de Energia, entre os anos de 2021 e 2022 houve um crescimento de quase 50% no número de ataques cibernéticos aos serviços de utilidade pública, como na infraestrutura da rede elétrica [19]. Neste sentido, torna-se fundamental que o sistema elétrico consiga se reestabelecer no menor tempo possível, papel que as microrredes podem ajudar a desempenhar.

No contexto da operação colaborativa, a conexão entre múltiplas microrredes diz respeito à interligação e interoperabilidade entre diversas microrredes, fato este que ocasiona aumentos na confiabilidade e resiliência do sistema como um todo, pois topologias variáveis de operação são possíveis através dos PCCs (Ponto de Conexão Comum). Assim, torna-se possível que as microrredes que estão interligadas realizem o

intercâmbio de energia entre elas mesmas ou com a rede principal. A fim de ilustrar as diferentes configurações de funcionamento com microrredes colaborativas, a Figura 1.1 ilustra um sistema com diversas microrredes interconectadas.

Figura 1.1 – Rede de distribuição com a presença de diversas microrredes.



Fonte: adaptado de [20].

O sistema apresentado na Figura 1.1 possui cinco microrredes e oito PCCs, representados pelas chaves SW1 até SW8, que são responsáveis pela conexão ou desconexão de cada uma das microrredes ao sistema de distribuição. As microrredes 1 e 2 possuem chaves que permitem a conexão destas diretamente ao sistema de distribuição, mas não possuem a possibilidade de se conectarem entre si ou com as demais microrredes constituintes do sistema. Já as microrredes 3, 4 e 5 possuem PCCs que permitem a conexão à rede de distribuição (SW4, SW5 e SW6) ou entre si (SW7 e SW8), tornando possível o intercâmbio de energia entre os empreendimentos.

A abertura ou fechamento das chaves dos PCCs torna possível a utilização de diversas topologias da rede. Essa versatilidade é uma característica fundamental de redes flexíveis e resilientes, pois aumenta as possibilidades operacionais da rede

com diferentes objetivos, como a minimização dos custos de operação ou o constante atendimento a cargas críticas pois, na ocorrência de uma falta, as microrredes podem se desconectar, isolando o local da falta, e continuar operando. Outro fator importante que deve ser considerado trata-se do lado econômico, pois existe a possibilidade de compra e venda de energia entre as diferentes microrredes do sistema, levantando também questões acerca dos modelos de negócios a serem utilizados nesta situação.

Como é possível observar, a operação colaborativa de microrredes traz consigo benefícios e desafios. Assim, torna-se necessária a avaliação dos benefícios que este modelo de operação pode agregar à rede, bem como a discussão acerca de possíveis soluções para os desafios operacionais.

1.2 Objetivos

Os objetivos desta dissertação podem ser decompostos como segue:

1.2.1 Objetivo Geral

Pesquisar e formular o problema da operação colaborativa de um conjunto de microrredes, denominada também como uma multimicrorrede.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Discutir critérios de quantificação de ganhos de qualidade de serviço em microrredes;
2. Identificar os ganhos econômicos e de continuidade de fornecimento na operação colaborativa;
3. Simular a operação individual e colaborativa de microrredes perante a perda da rede principal;
4. Análise de ganhos de resiliência.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho será pautado pela metodologia da pesquisa científica. Inicialmente será realizado o levantamento bibliográfico acerca do tema, a fim de conhecer como estão as pesquisas a respeito das microrredes interligadas. Em seguida, será realizada a modelagem da rede elétrica a ser utilizada para a realização dos testes e, posteriormente, as simulações computacionais necessárias considerando a operação isolada de cada microrrede, bem como através da interligação entre elas.

Em seguida, com base nos resultados obtidos nas simulações computacionais, serão estudados e avaliados os benefícios da operação colaborativa entre diversas microrredes. Tal avaliação será feita com base quantificadores, a fim de que se possa mensurar os benefícios da operação colaborativa em relação à operação isolada.

1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 é apresentada uma visão geral acerca das microrredes, contemplando seus aspectos históricos, definições e classificações. Além disso, são apresentados os principais desafios e vantagens encontradas na literatura acerca da utilização das microrredes. Por fim, é apresentado o atual cenário de mercado e aspectos regulatórios das microrredes e seus estudos relacionados.

No Capítulo 3 é introduzido o conceito das multimicrorredes e seu estado-da-arte, contemplando suas principais arquiteturas, sistemas de controle e comunicação. Ainda, são apresentadas suas contribuições no âmbito da resiliência do sistema e as perspectivas futuras no tema.

No Capítulo 4 são apresentados a formulação e os resultados da operação colaborativa de três microrredes. Foram simulados cenários de operação isolada e de interconexão entre as microrredes, a fim de verificar os principais benefícios da operação colaborativa.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido e as sugestões de trabalhos futuros a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa.

UMA VISÃO GERAL DAS MICRORREDES

Com o passar do tempo e o progresso da era digital, a eletricidade se tornou indispensável para a vida em sociedade. Por conta disso, novas formas de aumentar a segurança energética devem ser constantemente estudadas e desenvolvidas. Nesse contexto, a diversificação da matriz energética desempenha um papel de fundamental importância para a garantia do fornecimento seguro de energia elétrica aos consumidores. Tal importância motivou o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias que fossem capazes de gerar energia elétrica através de fenômenos naturais que acontecem diariamente, como a irradiação solar e a força dos ventos. Assim, este capítulo objetiva estudar as microrredes, apresentando a sua linha do tempo, seu desenvolvimento, conceitos fundamentais, desafios, aplicações, etc.

2.1 Aspectos Históricos

A possibilidade da utilização de geração distribuída já desperta interesse desde o início do século XIX, quando a *Manhattan Electric Light Company* buscava provar a praticidade da instalação de uma grande estação centralizada para gerar e transmitir energia elétrica em corrente alternada utilizando conversores rotativos. Entretanto, não havia tempo hábil para a construção de uma grande estação. Assim, utilizaram da flexibilidade operacional dos recursos energéticos distribuídos através da interligação entre as estações menores, de forma que estas pudessem realizar o intercâmbio de energia nos diferentes momentos do dia [21]. Contudo, as fontes utilizadas na época como recursos distribuídos não tinham caráter renovável, como a maioria empregada nos tempos atuais.

Apesar de apresentarem o seu desenvolvimento em grande escala apenas mais

recentemente, a utilização de recursos naturais para a geração de energia elétrica é datada de bem antes. No caso do aproveitamento da energia solar para produção de eletricidade, Edmund Becquerel publicou experimentos com bateria de células úmidas em 1839, que instigou o desenvolvimento de pesquisas na área. Entretanto, apenas em meados do século XX houve a prova de sua teoria [22].

Para o caso da geração eólica, o seu desenvolvimento sempre esteve intrinsecamente atrelado às épocas em que cata-ventos eram utilizados para moer grãos e para o bombeamento de água. Para sua utilização como gerador de energia elétrica, sua eficiência está sujeita às tecnologias de conversão de energia mecânica em elétrica, diferentemente da fonte fotovoltaica, que utiliza como princípio o efeito fotoelétrico. O desenvolvimento do primeiro aerogerador é datado em 1887, sendo o Professor James Blyth o responsável por tal feito [23,24].

A oportunidade da utilização das fontes próximas às cargas chamou atenção para a viabilidade da formação de redes elétricas em menor escala, podendo operar desempenhando diferentes papéis nos já consolidados modelos de sistemas de potência convencionais. Diante de tais possibilidades, as microrredes começaram a ganhar destaque na década de 1990 quando os Estados Unidos e a Europa impulsionaram seu desenvolvimento por distintas razões. No caso dos EUA, a atenção dada às microrredes foi motivada por conta do potencial de melhoria na resiliência e confiabilidade de instalações de caráter crítico, como das áreas de transporte, comunicações, hospitais, etc. Já para o caso da Europa, as preocupações ambientais com as mudanças climáticas e aquecimento global desempenharam o papel principal como fatores significativos de estímulo à utilização de microrredes [25].

A percepção da viabilidade da produção de eletricidade através de combustíveis naturais, como a energia advinda do sol e dos ventos, impulsionou o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais eficientes para a produção energética através de fontes alternativas. Esse avanço pode ser notado através do desenvolvimento da eletrônica de potência, que possibilitou a conversão, controle e integração de fontes com características intermitentes à rede elétrica convencional [26].

2.2 Definições

Os dispositivos de geração de energia renovável, como os painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, possuem dimensões consideravelmente menores quando comparados a grandes usinas hidrelétricas ou termelétricas, que necessitam ficar em grandes áreas e afastadas da cidade. Essa redução de tamanho tornou possível a instalação desses equipamentos em locais próximos ao conjunto de cargas, eliminando a necessidade de linhas de transmissão e diminuindo a área ocupada necessária para energia aos centros

de carga. Por conta de tal característica, diferentes definições de microrrede podem ser encontradas na literatura.

Em [27], os autores definem as microrredes como um grupo de cargas que operam de maneira interligada, juntamente com recursos energéticos distribuídos ao longo de limites elétricos claramente definidos, atuando como uma entidade controlável em relação à rede, com a possibilidade de operar conectada à rede ou isolada dela.

Em [28], uma microrrede é definida como um conjunto de microfontes, sistemas de armazenamento e cargas que se apresentam como uma entidade única e capaz de responder aos sinais de controle do sistema de energia central. Além disso, o conceito de microrrede carrega consigo a noção de um sistema flexível, mas controlado, sendo capaz de isolar eletricamente a microrrede do sistema principal, mas ainda os conectando economicamente.

Devido à grande quantidade de definições de microrredes presentes na literatura, o autor em [29] defende que é mais importante considerar os seus benefícios, como a descarbonização da rede, melhorias na resiliência e confiabilidade e melhor previsibilidade dos custos de operação no longo prazo, do que tentar defini-la. Dentre tantas definições, a que mais se destaca é aquela apresentada em [27], pois apresenta três requisitos primordiais para classificar as microrredes [25]:

1. A possibilidade de identificação da parte do sistema de distribuição que compreende uma microrrede, se distinguindo do resto do sistema;
2. A controlabilidade dos recursos energéticos da microrrede se dá em conjunto uns com os outros e não com recursos distantes;
3. A capacidade de operação normal, independente de conexão com a rede principal.

Partindo das diversas definições de microrredes que podem ser encontradas na literatura, neste trabalho define-se microrredes como grupos de cargas que possuem fontes de geração instaladas e distribuídas em suas proximidades, sem a necessidade da utilização de longas linhas de transmissão, sendo capazes de se comportar como uma entidade única frente aos sinais de controle do sistema principal, contribuindo fortemente para a resiliência e confiabilidade do sistema elétrico devido à possibilidade de operação ilhada ou conectada à rede principal.

2.3 Classificações

A classificação de microrredes objetiva agrupá-las em categorias, a fim de organizar os estudos a partir de características comuns, podendo ser realizadas com base em

diferentes critérios. Dentre as possibilidades de classificação, destacam-se o tamanho, topologia, setor de instalação, tipo (CA/CC) e modo (*on-grid* ou *off-grid*) [30]. Em [31] é proposta uma classificação em camadas e níveis distintos, em que as camadas são divididas em infraestrutura, comunicação, inteligência, modelos de negócios e aspectos regulatórios. Já os níveis são tratados como extensões do conceito de microrrede e dizem respeito à magnitude, sendo divididos em picorrede, nanorrede ou microrrede.

2.3.1 Tamanho

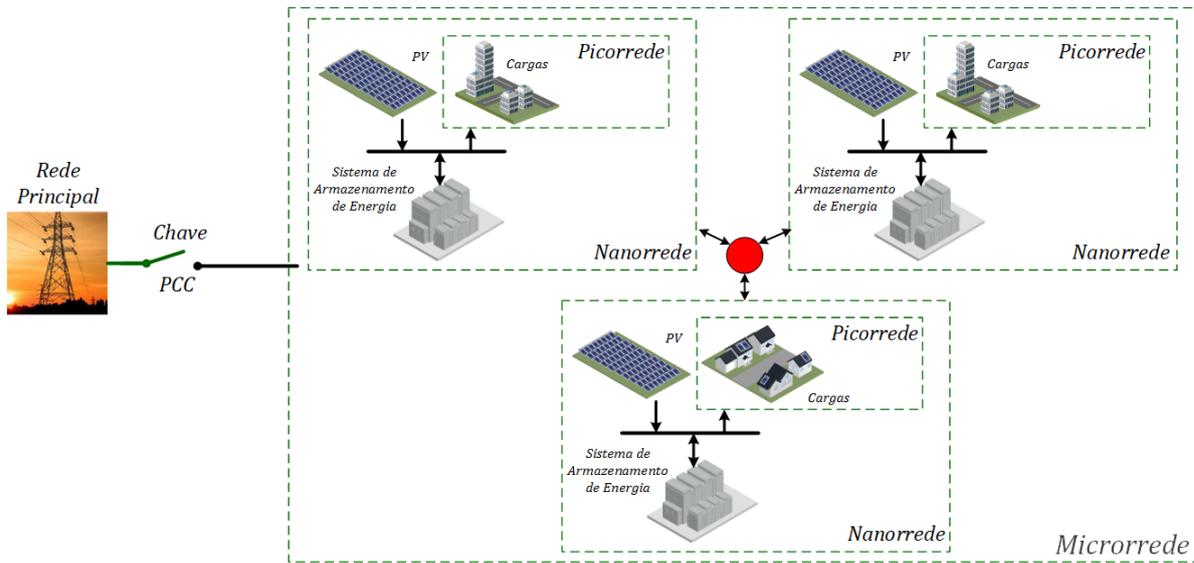
Trata-se da primeira categoria de classificação das microrredes e diz respeito à sua extensão física, trazendo atenção a dois outros conceitos menos utilizados, mas não menos importantes: picorrede e nanorrede [30]. Tanto esta como aquela possuem suas características e objetivos próprios. Em [31], as picorredes são definidas como um conjunto de cargas gerenciáveis conectadas em uma residência, objetivando a realização do nivelamento e deslocamento de carga, a fim de reduzir o custo da energia consumida. Já em [32], uma picorrede é definida como uma pequena microrrede, normalmente com capacidade instalada de geração de algumas dezenas de kW, contendo fontes renováveis e armazenamento de energia. Em [33] é proposto um método baseado em redes neurais para classificar a energia utilizada por cada dispositivo presente em uma picorrede, de forma a comparar as alterações no consumo de energia ao longo do tempo, contribuindo para o bom gerenciamento de demanda na picorrede.

Já a nanorrede pode ser compreendida como uma pequena parte (ou um pedaço) de uma microrrede, como a rede de um edifício ou residência, contendo recursos energéticos distribuídos e dispositivos de armazenamento de energia [31,34]. Em [35], os autores definem uma nanorrede como um sistema de distribuição de energia adequado para uma única casa/apartamento ou um pequeno edifício, possuindo a capacidade de alimentar cargas locais através da utilização de fontes de geração locais e dispositivos de armazenamento de energia. Em [36] é proposta uma topologia de nanorredes que objetiva a melhoria da resiliência e confiabilidade na operação. Uma revisão acerca das arquiteturas e estratégias de controle em nanorredes é apresentada em [37].

Já para o caso das microrredes, os limites físicos se tornam mais extensos e os objetivos mais complexos, uma vez que há mais cargas a serem alimentadas e mais recursos energéticos a serem gerenciados, transformando a otimização da operação em um problema mais complicado. Dentro de uma microrrede podem ser encontradas diversas picorredes e nanorredes [30], conforme ilustra a Figura 2.1.

Com base na literatura, é possível perceber que ainda não há um consenso acerca das definições das picorredes e nanorredes. Alguns autores consideram as picorredes apenas pelo lado de gerenciamento de carga [31], enquanto outros já consideram que há a presença de fontes [32]. Quando se considera a presença de fontes, os conceitos

Figura 2.1 – Composição de uma microrrede.

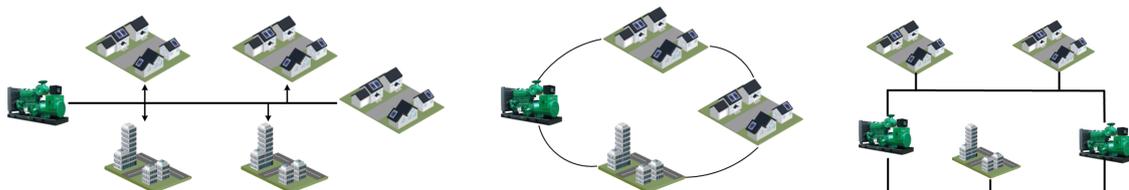


de picorrede e nanorrede podem se confundir. Mesmo sem a definição de um conceito fechado para tais termos, a importância da classificação das microrredes pelo critério do tamanho se dá no momento de especificação do sistema, podendo escolher o tamanho apropriado de acordo com o objetivo da microrrede.

2.3.2 Topologia

A topologia de uma rede diz respeito acerca da forma em que os dispositivos podem ser dispostos em um sistema de distribuição. De acordo com [38], as três principais classificações são radial, em malha e em rede (vide Figura 2.2), sendo cada uma delas mais apropriada de acordo com os objetivos da operação. As topologias aplicáveis para as microrredes são as mesmas dos sistemas de distribuição. Assim, é importante conhecer as vantagens e desvantagens de cada configuração para que possa se especificar corretamente as conexões físicas na construção de uma microrrede.

Figura 2.2 – Sistemas de distribuição radial, em malha e em rede, respectivamente.



O modelo radial é o mais comumente encontrado nos sistemas de distribuição atuais. Nele, a fonte geradora é centralizada e alimenta um barramento, em que todo o conjunto de cargas é conectado à mesma barra. Uma vez que todas as cargas estão conectadas a um único barramento, qualquer falta na linha irá causar um *blackout* para os consumidores [39,40].

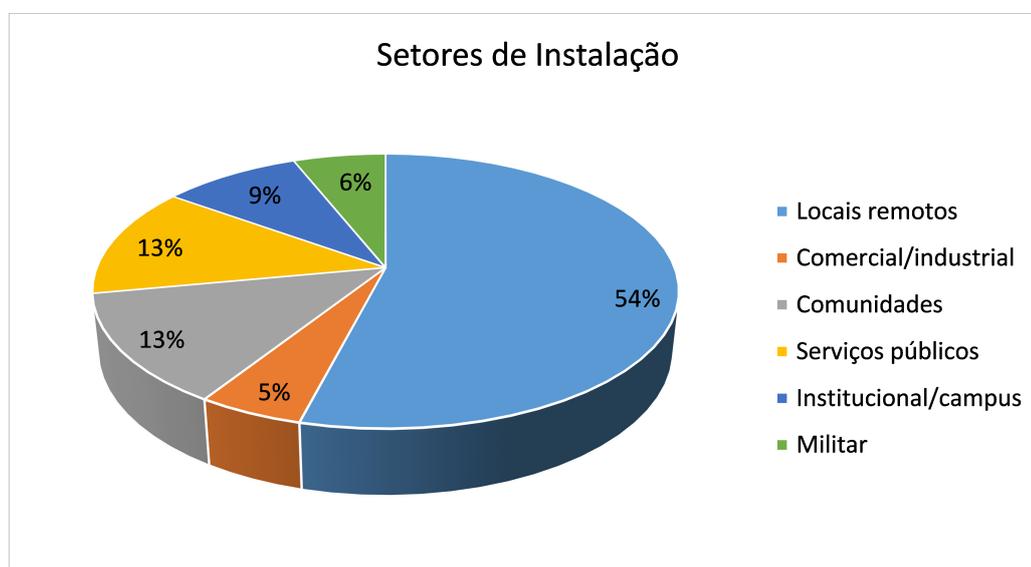
Já para a rede malhada, cada carga é conectada à sua adjacente, criando um caminho contínuo para o fornecimento de energia. No caso de uma falta e, conseqüentemente, da atuação de um dispositivo de proteção, há um segundo caminho por onde a energia poderá fluir. Entretanto, devido ao aumento na quantidade de dispositivos na sua construção e operação, o seu custo se torna mais elevado que aquele presente na configuração radial [41].

Na configuração interligada, ou em rede, há um caminho fechado interligando todas as cargas e fontes. Assim, se torna possível que um consumidor possa ser alimentado por diferentes tipos de fontes, aumentando consideravelmente a resiliência e confiabilidade do sistema [38].

2.3.3 Setor de Instalação

Devido aos seus benefícios, as microrredes são utilizadas em diversos setores fundamentais da sociedade, motivado principalmente pelo seu potencial de melhoria na resiliência. A Figura 2.3 apresenta a porcentagem de utilização das microrredes em diferentes setores [25].

Figura 2.3 – Setores de instalação de microrredes.



Fonte: [25].

Apesar do desenvolvimento das microrredes ter sido impulsionado em grande parte devido à sua capacidade de aumentar a resiliência e segurança operativa no fornecimento de energia elétrica, é possível observar pelos dados da Figura 2.3 que a maior parte das aplicações das microrredes se concentra na alimentação de áreas remotas. Tal fato se deve à impossibilidade de levar a rede convencional até determinadas áreas, como no caso apresentado em [7], seja por empecilhos técnicos, logísticos ou econômicos.

2.3.4 Tipo da Corrente (CC/CA)

A possibilidade da utilização de sistema de distribuição CC vem ganhando mais atenção nos últimos tempos devido ao desenvolvimento e extenso uso de fontes alternativas e das microrredes. Como as fontes eólica e fotovoltaica, predominantemente utilizadas na geração distribuída, podem gerar energia em CC, abre-se a possibilidade então da conexão direta dessas fontes no sistema de distribuição, sem a necessidade da utilização de um conversor CC/CA neste trecho, fazendo-se necessário apenas próximo às cargas, uma vez que grande parte das cargas convencionais são alimentadas em CA.

A distribuição de energia em CC torna possível também a formação de sistemas de distribuição híbridos, formado por trechos em CA e outros em CC, de acordo com a necessidade da microrrede. Em [42] é apresentado um estudo comparativo entre cada tipo de sistema de distribuição considerando as vantagens e desvantagens de cada modelo, em que os autores atribuem o desenvolvimento das redes de distribuição CC ao crescimento da utilização de fontes renováveis. Em [43] é proposta uma topologia híbrida de rede de distribuição, constituído por um sistema principal de distribuição em CC e subsistemas em CA.

2.3.5 Forma de Operação

Devido a sua flexibilidade, as microrredes podem operar conectadas à rede (*on-grid*) ou isoladas dela (*off-grid*). Essa capacidade permite que a microrrede possa se desconectar da rede principal em momentos de falta e possa operar de forma autônoma. Por conta da possibilidade de alocar as fontes geradoras de forma distribuída e próximas às cargas, as microrredes são utilizadas em locais remotos onde a rede principal não é capaz de chegar.

Em cada forma de operação, as microrredes possuem diferentes objetivos. No caso da operação conectada à rede principal, as microrredes ajudam a aumentar a participação de fontes renováveis na geração de energia do sistema elétrico, diminuindo o impacto ambiental da produção energética. Ademais, os recursos energéticos distribuídos podem oferecer mais estabilidade, qualidade de serviço e eficiência energética à rede, através da minimização das perdas e investimentos na rede [44–46].

Devido ao caráter estocástico das fontes utilizadas na geração distribuída de uma microrrede, a sua operação isolada requer maiores cuidados. Para melhoria da segurança operativa, comumente são utilizadas fontes despacháveis, como geradores a diesel, para operarem como *backup* de geração em momentos de baixa disponibilidade das fontes renováveis, bem como para o carregamento do sistema de armazenamento [47,48]. Em [49] pode ser observado a utilização de tal estratégia, em que o gerador a diesel, além de fornecer energia às cargas em momentos críticos, é utilizado também

para a realização de equalizações periódicas no sistema de armazenamento, a fim de aumentar a sua vida útil.

Quando as microrredes operam conectadas à rede principal, esta desempenha a função de barra de referência, fechando o balanço de potência e mantendo os valores de tensão e frequência em valores pré-determinados independente do perfil de carga da microrrede. Entretanto, ao operar de maneira isolada, a microrrede perde tais referências e esse controle necessita ser realizado localmente [50]. Por conta disso, grande parte dos trabalhos acerca das microrredes isoladas foca na regulação de tensão e frequência [31, 51]. Além disso, devido à desconexão da rede principal, os recursos energéticos disponíveis na microrrede devem ser gerenciados com maior rigor e de maneira ótima, a fim de oferecer aos consumidores um fornecimento energético com resiliência, confiabilidade, qualidade e com o menor custo. Assim, em [52] é proposto um sistema ótimo de gerenciamento para uma microrrede isolada em um campus, objetivando a minimização dos custos de operação. Em [53] é proposto um sistema de gerenciamento de energia para residências baseado nos perfis de carga, através da utilização de índices de caracterização do uso de cada eletrodoméstico. Em [54] é proposta uma estratégia de gerenciamento de energia, através da otimização da operação dos sistemas de armazenamento e das fontes eólica e fotovoltaica nos seus pontos de máxima extração de potência.

2.4 Vantagens e Desafios

Conhecer as possíveis vantagens e desafios da utilização das microrredes é de fundamental importância para um planejamento adequado na etapa de projeto de uma microrrede, a fim de avaliar técnica e economicamente a sua implantação, baseado nos objetivos de sua operação. Assim, esta seção busca apresentar e discutir alguns dos benefícios e desafios da utilização das microrredes.

2.4.1 Vantagens

Devido à utilização de fontes de caráter renovável como recursos energéticos distribuídos, as microrredes são capazes de oferecer flexibilidade na operação, bem como outros diversos benefícios para os sistemas elétricos. Em [55] são apresentados alguns benefícios, como:

1. **Benefícios técnico-econômicos:** por conta da característica de possuir as fontes próximas às cargas, há o potencial de redução de custos associados aos sistemas de transmissão, que são fortemente presentes nos sistemas centralizados, uma vez que há a necessidade de levar a energia gerada nas usinas, situadas a longas

distâncias, até os centros de cargas. Além disso, há também a possibilidade de variação modular da infraestrutura da microrrede de acordo com alterações nas cargas, prazos e disponibilidade de fontes renováveis, possibilitando a eliminação de custos que são inerentes em redes convencionais [56].

2. **Benefícios ambientais:** a habilidade de gerenciamento de carga das microrredes combinada com a utilização de sistemas de armazenamento de energia desempenham um papel fundamental na atenuação dos riscos de desvios de tensão e frequência associados à intermitência das fontes renováveis, que são utilizadas de forma predominante nas microrredes, assim, contribuindo fortemente para o processo de descarbonização da rede [55];
3. **Benefícios econômicos:** a implementação das microrredes impactam diretamente a região onde estão situadas, como através da geração de empregos [55]. Além disso, um bom gerenciamento energético pode gerar receitas para os órgãos responsáveis pela operação da microrrede, uma vez que o excesso de energia pode ser vendido diretamente para a rede principal ou para outras microrredes que estejam necessitando de energia. Em outro cenário, a microrrede pode comprar energia do sistema principal nos momentos em que a energia é mais barata, armazená-la nos sistemas de armazenamento e então usá-la para abastecer suas cargas locais nos horários em que a tarifa da energia vendida pela rede principal é mais elevada. Assim, essa arbitragem de energia pode gerar receitas e, ao mesmo tempo, economia;
4. **Benefícios sociais:** no âmbito social, a importância da eletricidade se mostra uma vez que contribui para a inclusão dos menos favorecidos e para o acesso a serviços básicos, como a possibilidade de obtenção de atendimentos de saúde primária. Assim, as microrredes tornam-se a única possibilidade de acesso à energia elétrica em níveis de qualidade e confiabilidade para comunidades onde não há a possibilidade de alimentação pela rede convencional, como no caso de comunidades isoladas [7];
5. **Resiliência:** sendo a principal característica que motivou o desenvolvimento das microrredes nos EUA [25], a capacidade de resiliência oferecida pelas microrredes está intrinsecamente ligada a sua capacidade de operar isolada da rede principal. Assim, na ocorrência de faltas na rede principal, há a possibilidade desta operar de forma isolada, mantendo o fornecimento energético às suas cargas locais. Além disso, pode oferecer também serviços de *black-start*, contribuindo para uma recuperação mais rápida da rede elétrica.

Em [57] é realizada uma revisão acerca dos conceitos de microrredes, bem como suas classificações e estratégias de controle, onde são discutidos também os possíveis

benefícios, desafios e tendências futuras. Alguns potenciais benefícios apontados pelos autores são:

1. **Estabilidade de investimentos:** a possibilidade da ocorrência de contingências pode gerar custos elevados à rede, uma vez que há a necessidade de investimentos na infraestrutura do sistema elétrico. Neste sentido, as microrredes podem oferecer segurança operativa, como também proteção contra flutuações nas contas de energia;
2. **Benefício econômico:** as microrredes podem reduzir o custo da energia em horários de pico, dependendo dos aspectos regulatórios locais. Além disso, podem também gerar receitas ao vender energia para a rede principal;
3. **Continuidade de fornecimento:** com os sistemas centralizados, a ocorrência de faltas na rede de transmissão pode ocasionar o desligamento de grandes blocos de carga. Neste cenário, as microrredes podem desempenhar o papel de oferecer continuidade no fornecimento de energia através da possibilidade de operar isolada da rede principal;
4. **Integração de fontes limpas:** devido à possibilidade de alocar as fontes próximas às cargas, as microrredes utilizam, em sua maioria, fontes renováveis. Assim, alavancam a utilização de fontes limpas para produção de energia elétrica e, conseqüentemente, contribuem para a descarbonização da rede;
5. **Melhoria na resiliência e confiabilidade:** devido a sua capacidade de operar de forma ilhada, as microrredes podem continuar alimentando suas cargas mesmo no caso de ocorrência de faltas no sistema principal, contribuindo com os indicadores de fornecimento e aumentando a resiliência da rede;
6. **Melhoria na qualidade da energia:** na operação de equipamentos sensíveis, como no caso de equipamentos médicos, as microrredes podem oferecer melhoria no controle de alguns parâmetros da rede elétrica, através da disponibilidade de maior quantidade de energia elétrica;
7. **Relação entre a microrrede e a rede principal:** o desenvolvimento das redes inteligentes está intrinsecamente ligado à utilização das microrredes. De certa forma, os futuros sistemas elétricos poderão ser formados através da interligação de diversas microrredes, dando origem às microrredes interligadas;
8. **Suporte à rede:** as microrredes podem diminuir o congestionamento dos sistemas de transmissão/distribuição, bem como oferecer serviços ancilares.

Em [58] são citados como potenciais benefícios:

1. Melhoria da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica;
2. Melhoria nos índices de resiliência e capacidade de restauração;
3. Redução nos custos de energia para consumidores e empresas;
4. Melhora o meio ambiente e promove a utilização de fontes limpas de energia;
5. Contribui com o fortalecimento da rede principal;
6. Estimula o desenvolvimento da segurança cibernética;
7. Desenvolvimento de valor econômico para a sociedade;
8. Melhoria no bem-estar da comunidade.

Comparando os potenciais benefícios apresentados acerca da utilização das microrredes [55, 57, 58], é possível observar que, apesar de classificações diferentes, todas evidenciam, de certa forma, as mesmas potencialidades. Dentre estes, destacam-se aquelas que foram potencializadoras do desenvolvimento das microrredes, como o aumento da resiliência no caso dos Estados Unidos e a utilização de fontes renováveis a fim de contribuir com a diminuição da emissão de gases de efeito estufa durante a produção de energia.

2.4.2 Desafios

Devido a dependência de fontes primárias intermitentes, como irradiância solar e velocidade dos ventos, as fontes de caráter renovável possuem caráter estocástico. Neste sentido, há diversas técnicas utilizadas para previsão da potência disponível ao longo da operação, mas com incertezas que devem ser consideradas. Assim, caso não haja mecanismos de controle e sistemas de armazenamento, tais incertezas e variabilidades podem afetar o balanço de potência ao longo da operação, resultando em cargas não atendidas.

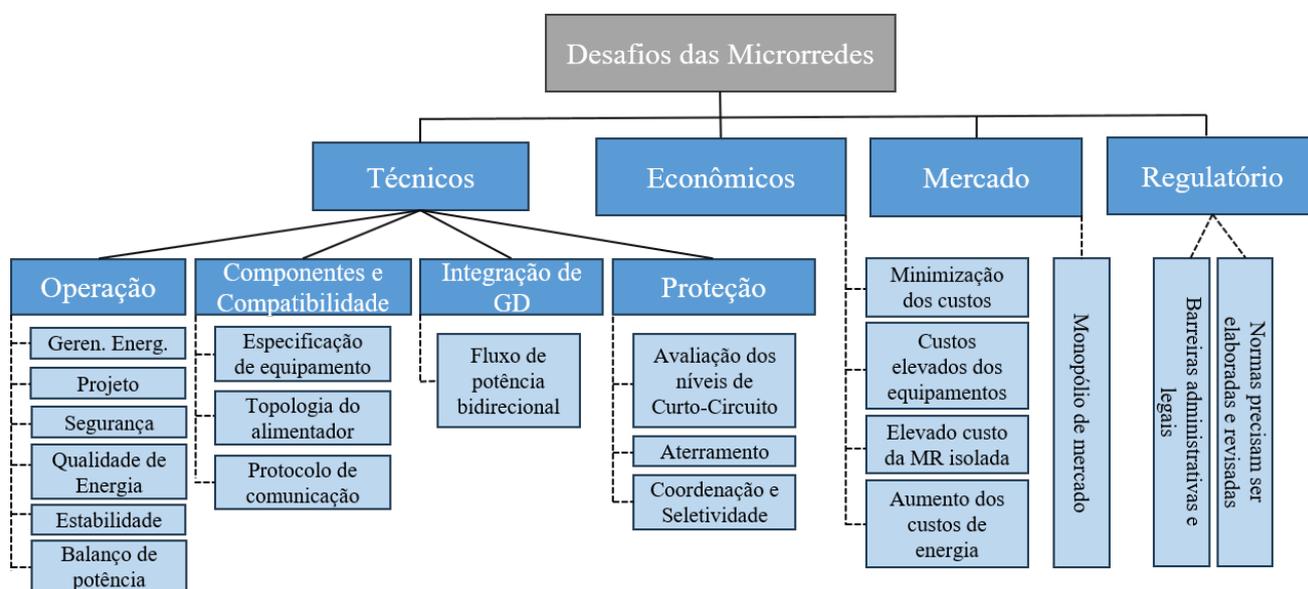
Frente ao desafios da intermitência, em [59] é apresentada uma revisão acerca dos desafios que são encontrados na integração da fonte fotovoltaica em microrredes industriais isoladas, considerando restrições de confiabilidade. Os autores destacam a maior vulnerabilidade de sistemas baseados na geração fotovoltaica quando comparados às grandes usinas centralizadas. No caso dos geradores, a inércia presente no eixo da máquina é fundamental para a manutenção do balanço de potência, segundo a equação 2.1 [60]:

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_{gen} - P_{load} + P_{import} - P_{export} \quad (2.1)$$

em que J é o momento de inércia de todos os geradores do sistema, ω é a velocidade angular equivalente de todos os eixos, sendo proporcional à frequência, P_{gen} é a potência de geração, P_{load} é a potência da carga, P_{import} é a potência importada e P_{export} é a potência exportada. Assim, quando há um desbalanço entre as potências gerada e consumida, a frequência é a grandeza responsável por manter a estabilidade do sistema. Já no caso da geração fotovoltaica, são utilizados conversores estáticos que não possuem inércia, fazendo com que quaisquer variações repentinas no balanço carga-geração possam resultar em instabilidade no sistema [61].

Os desafios apresentados nas microrredes podem ser classificados em quatro grupos distintos: técnicos, econômicos, de mercado e regulatórios, segundo a classificação proposta em [57] e apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Desafios da implementação de microrredes.



Fonte: Adaptado de [57].

Os desafios técnicos dizem respeito às dificuldades encontradas na operação das microrredes devido à alta penetração de fontes intermitentes, como a qualidade de energia, estabilidade e a manutenção do balanço de potência. Os desafios econômicos são aqueles relacionados aos custos intrínsecos da operação da MR, como os custos de manutenção, dos equipamentos e da operação, que deve sempre ser objeto de problemas de minimização, enquanto os desafios de mercado dizem respeito aos modelos de negócios que podem ser implementados na operação de uma microrrede. Os desafios regulatórios se referem às normas específica da operação das microrredes, sendo esta uma lacuna atual dos sistemas elétricos.

Devido à variabilidade e incerteza na capacidade de geração das fontes renováveis ao longo de sua operação, a manutenção do balanço carga-geração torna-se

um problema de extrema importância. Uma das maneiras de se amenizar tal característica é por meio da exploração da complementariedade entre diferentes fontes, de forma que uma fonte possa compensar a baixa disponibilidade da outra, mantendo assim o atendimento contínuo às cargas. Nesse contexto, em [62] é apresentada uma revisão bibliográfica acerca dos conceitos, métricas, aplicações e tendências futuras acerca da complementariedade de fontes renováveis. Em [63] é apresentado um estudo de avaliação e otimização da complementariedade de fontes intermitentes. Em [64] é apresentado um estudo acerca da complementariedade entre as fontes fotovoltaica, eólica e maremotriz em microrredes isoladas, onde os resultados apresentam impactos positivos na preservação da vida útil do sistema de armazenamento e da diminuição de utilização do gerador a diesel, promovendo vantagens econômicas e ambientais.

2.5 Mercado e Aspectos Regulatórios

A crescente preocupação ambiental vem fomentando a utilização de fontes renováveis e a penetração de microrredes nos sistemas elétricos convencionais. Com isso, faz-se necessário o entendimento acerca dos modelos de negócios que podem ser utilizados nas microrredes, bem como o entendimento do cenário regulatório, tendo em vista a sua importância para o incentivo da utilização dos respectivos modelos de negócios atuantes.

No Brasil, o primeiro passo para impulsionar a utilização das fontes renováveis se deu em 2012, através da publicação da Resolução Normativa nº 482 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [65], em que houve a definição de micro e minigeração distribuída e o estabelecimento dos padrões de conexão entre os geradores em pequena escala e o sistema de distribuição.

No ano seguinte, foi publicada a RN nº 571 [66] que trouxe consigo o sistema de compensação de energia. Assim, após a contabilização de toda a energia ativa injetada no sistema de distribuição por cada unidade de geração distribuída, a empresa de distribuição responsável realiza a compensação dessa energia por meio do abatimento no consumo de energia da unidade consumidora, permitindo também que o abatimento seja feito em outras unidades consumidoras de mesma titularidade.

Posteriormente, foi publicada a RN 687/2015 [67] que trouxe avanços significativos para o cenário regulatório da geração distribuída. Entre estes, estão a redefinição dos limites de potência instalada para o enquadramento em mini ou microgeração, o aumento da validade dos créditos com a distribuidora local de 3 para 5 anos, a responsabilização das distribuidoras quanto aos custos da troca dos medidores convencionais para bidirecionais, etc.

O setor regulatório específico para as microrredes ainda possui diversas lacunas,

uma vez que ainda não existem referências normativas próprias para sua operação. Este cenário é ocasionado devido ao fato das microrredes ainda não serem definidas como entidades na regulamentação existente no setor elétrico internacional e também no brasileiro [68]. Muitas vezes, por conta da composição majoritariamente renovável das microrredes, são utilizados os aspectos regulatórios que regem a Geração Distribuída, como no caso do Brasil, a Resolução ANEEL 1.059/2023, que regulamenta a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica [69].

De forma a analisar o impacto que os aspectos regulatórios desempenham na utilização das fontes renováveis, em [70] é apresentado um estudo acerca da geração fotovoltaica distribuída a partir da publicação da RN 482/2012 pela ANEEL. Os resultados apresentados tornam visível o crescimento do mercado fotovoltaico no Brasil, principalmente em 2015, após a publicação da RN 687. Em [71] é realizado um estudo comparativo do impacto que instalações fotovoltaicas podem causar na rede a partir da política regulatória mais antiga, a NR 482/2012, e a mais nova, a Lei Federal 14.300/2022, que instituiu o marco legal da micro e minigeração distribuída [72]. Dentre os resultados obtidos, os autores destacam que a política atual está reduzindo a perda de receita na energia distribuída, entretanto, existe o risco de investimentos mal direcionados na rede de distribuição.

Em [73] é apresentada uma avaliação dos aspectos regulatórios das microrredes no Brasil, em que os autores apresentam de forma detalhada a forma em que o atual cenário político do setor elétrico brasileiro está preparado para absorver o conceito de microrrede, tanto no âmbito técnico quanto comercial. Dentre os desafios para o desenvolvimento de políticas regulatórias para as microrredes, os principais incluem a definição e gerenciamento da conexão das microrredes com os sistemas de distribuição, a política tarifária e a existência de um mercado regulado que inclui as microrredes. Dentre as mudanças propostas no cenário regulatório, os autores destacam o desenvolvimento de políticas de remuneração por excesso de geração, de regulações específicas de acordo com as características de cada microrrede e de regulações específicas a respeito do ilhamento intencional das microrredes. Trabalhos semelhantes podem ser encontrados para diversos locais, como Nova York [74], Singapura [75] e Estados Unidos, União Europeia e China [76]. Tais trabalhos se assemelham ao destacar a falta de regulamentação específica para as microrredes e o impacto que tal fato desempenha no desenvolvimento de sua utilização.

Em [77] é realizado um estudo acerca da prospecção e barreiras que são encontradas na utilização das microrredes na Suíça. Diferindo de outros estudos na área, os autores citam que não há a necessidade de políticas de regulamentação específica para o desenvolvimento das microrredes, mas destacam a importância da regulamentação

para que haja o interesse por parte de investidores, uma vez que o aspecto regulatório influencia e facilita a previsão do fluxo de caixa, reduzindo o risco do investimento na criação de novos produtos.

2.6 Conclusões do Capítulo

Neste Capítulo foram apresentados os principais aspectos relacionados às microrredes, como seu aspecto histórico, definições e classificações segundo diferentes autores. Além disso, tratou-se também a respeito dos principais vantagens e desafios na operação das microrredes. Dentre as vantagens, podem ser destacados os benefícios ambientais, devido à utilização massiva de fontes renováveis, benefícios econômicos, pois um bom gerenciamento energético pode gerar receitas para os órgãos responsáveis pela operação da microrrede, e benefícios relacionados à resiliência e segurança operativa, devido à capacidade de operar de forma ilhada da rede principal, podendo suprir energeticamente todas as suas cargas locais na ocorrência de algum sinistro no sistema elétrico principal.

Além dos aspectos operacionais, a revisão bibliográfica mostrou também as lacunas que existem no âmbito regulatório, causado principalmente devido à falta de definição das microrredes como entidades nas regulamentações existentes nos setores elétricos.

Após a apresentação das microrredes realizadas neste Capítulo, o Capítulo 3 objetiva apresentar o que são as multimicrorredes, por vezes chamadas também de microrredes interligadas, destacando as suas características, benefícios e desafios, a fim de identificar as lacunas ainda presentes no tema e de que forma as pesquisas estão caminhando para tornar as multimicrorredes cada vez mais populares.

MULTIMICRORREDES

As definições clássicas de microrredes vem se modificando nos últimos tempos devido a possibilidade da sua operação interligada, incrementando a sua capacidade de flexibilização por meio da modificação dos seus limites elétricos através da abertura e fechamento de chaves, se conectando ou desconectando das outras microrredes adjacentes e, até mesmo, da rede principal. A conexão entre duas ou mais microrredes dá origem às multimicrorredes, também conhecidas como microrredes interligadas. Assim, este Capítulo objetiva apresentar as multimicrorredes: o que são, seu estado-da-arte, suas características, benefícios, desafios e perspectivas futuras.

3.1 O que são as Multimicrorredes?

As multimicrorredes, por vezes chamadas também de microrredes interligadas, *clusters* de microrredes ou microrredes comunitárias, constituem um tema de pesquisa recente e que vem ganhando cada vez mais espaço nos últimos tempos devido aos seus potenciais benefícios. Entretanto, ainda não há consenso acerca do termo “microrrede comunitária”, uma vez que o termo “comunidade” pode assumir diferentes significados na literatura sobre energia comunitária: comunidade como parte interessada, como espaço/lugar e comunidade de interesse ou visão compartilhada [78]. Alguns trabalhos, como [79, 80], tratam as microrredes comunitárias como uma microrrede que atende uma comunidade ou conjunto de cargas, enquanto outros autores tratam como diversas microrredes operando de forma conjunta [81–83].

De forma geral, uma multimicrorrede refere-se à interligação e interoperabilidade de duas ou mais microrredes através de chaves que permitem a conexão/desconexão entre estas. Essa possibilidade ocasiona aumentos na confiabilidade e resiliência das

microrredes interconectadas, devido à possibilidade de diversas topologias de operação através da abertura e/ou fechamento dos Pontos de Conexão Comum (PCCs). Ao se realizar a interconexão de diversas microrredes, é possível ocorrer o intercâmbio de energia entre as microrredes, como também entre as microrredes e o sistema de distribuição, de forma a alcançar um objetivo pré-determinado, como a minimização dos custos de operação ou a maximização da confiabilidade e segurança operativa da rede.

A existência de multimicrorredes torna possível o escoamento do excesso de geração de uma microrrede, podendo ser vendido para o sistema de distribuição, como também para outra microrrede que esteja com déficit de geração naquele instante. Já em condições de emergência, como na ocorrência de uma contingência na rede principal, o *cluster* de microrredes pode se desconectar do sistema de distribuição e continuar alimentando as suas cargas. Devido à intermitência das fontes renováveis, a possibilidade de intercâmbio de energia entre as microrredes é uma poderosa ferramenta para o aumento da resiliência das microrredes, uma vez que torna possível que aquela com geração maior que a demanda em determinado intervalo temporal consiga atender as cargas de uma microrrede vizinha que esteja passando por um momento de déficit de geração, desde que respeitados os limites físicos de transferência de energia do sistema que interliga as diversas microrredes, aumentando assim a resiliência do *cluster*.

As microrredes contribuem com o sistema elétrico provendo flexibilidade e aumento da resiliência e confiabilidade, por conta da sua capacidade de operar de forma ilhada. No caso das multimicrorredes, os benefícios são semelhantes, mas em escalas diferentes, devido à interconexão de múltiplas microrredes. Dentre estes, pode-se destacar [20]:

1. **Melhor utilização dos dispositivos de geração:** com a interligação entre microrredes, os dispositivos de geração locais em uma MR tornam-se capazes de fornecer energia às cargas de MRs vizinhas em períodos de necessidade [84, 85];
2. **Redução do custo total:** a integração de grandes quantidades de fontes renováveis (como FV e eólica) ajuda na redução de custos, uma vez que os custos de manutenção desses dispositivos são baixos, podendo causar reduções de, pelo menos, 10% durante a operação normal do sistema de distribuição [84];
3. **Serviços ancilares:** são fundamentais para o desempenho adequado do sistema, uma vez que auxiliam durante os desequilíbrios entre geração-carga e ajudam o sistema em sua recuperação após o acontecimento de um evento desastroso. Assim, por conta de sua elevada flexibilidade, as multimicrorredes podem prover diversas possibilidades de serviços ancilares [86];

4. **Melhoria na resiliência:** um sistema resiliente é aquele que é capaz de absorver e responder de forma adequada e rápida a eventos disruptivos na rede principal. Com a ocorrência de grandes eventos desastrosos, as multimicrorredes contribuem fortemente para o rápido reestabelecimento do atendimento às cargas;
5. **Melhoria na confiabilidade:** a melhoria na resiliência também causa aumento nos níveis de confiabilidade do sistema, referindo-se à capacidade do sistema de manter o fornecimento consistente, considerando a ocorrência de eventos desastrosos de menor nível destrutivo e maiores probabilidades de ocorrência [87].

Por ser um modelo de rede com estudos ainda em desenvolvimento, as multimicrorredes ainda apresentam diversos desafios a serem estudados com mais atenção. Apesar dos diversos benefícios, encontram-se também desafios operacionais mais complexos, tais como estruturas de controle multicamadas mais complexas, interações harmônicas entre os diversos controladores, falhas de comunicação e riscos de ataque cibernético [12]. Além destes, destacam-se também problemas relacionados à estabilidade do sistema [88], coordenação da proteção [89], privacidade na comunicação [90] e segurança cibernética [91].

3.2 Estado-da-Arte

A apresentação do estado-da-arte das multimicrorredes é de fundamental importância para o entendimento do cenário atual das pesquisas acerca desse modelo de rede, uma vez que é um tema que vem ganhando notoriedade mais recentemente. Por se tratar de um conjunto de microrredes operando de maneira interligada, as multimicrorredes apresentam os mesmos desafios operacionais das microrredes, mas com maiores níveis de dificuldade. Dentre os temas de maior importância dentro das multimicrorredes, ressaltam-se a arquitetura de interconexão e os sistemas de controle e comunicação.

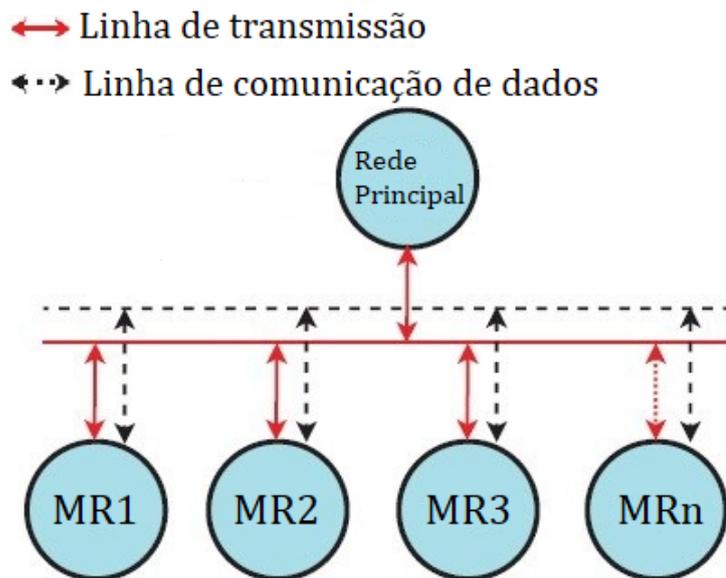
3.2.1 Arquiteturas

A arquitetura das multimicrorredes refere-se às topologias que as microrredes podem assumir considerando uma operação conjunta, tornando possível a existência de diversas maneiras para se interligarem e poderem operar de maneira colaborativa. Em [92] é apresentada uma revisão bibliográfica acerca dos sistemas de controle em microrredes colaborativas e, além disso, é realizada a classificação de microrredes interligadas baseado na sua formação topológica. Os autores classificam as multimicrorredes baseados em três tipos de arquitetura: radial, anel e em malha.

3.2.1.1 Arquitetura Radial

Nesta configuração, todas as microrredes constituintes do sistema se interligam através de um barramento comum, que também é responsável pela conexão entre o conjunto de microrredes e a rede principal. Alguns trabalhos que utilizam desta topologia podem ser encontrados em [93–95]. A Figura 3.1 apresenta este tipo de arquitetura.

Figura 3.1 – Arquitetura radial.



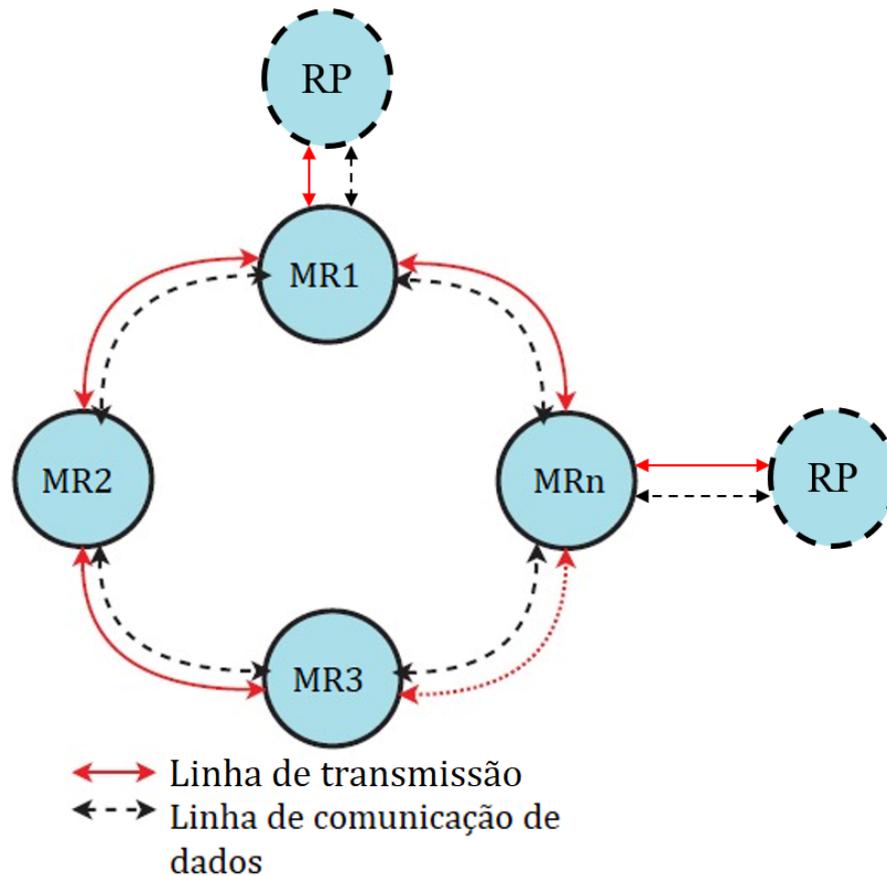
Fonte: Adaptado de [92].

A ampla utilização deste tipo de arquitetura se deve ao seu aspecto econômico, devido à redução da quantidade de linhas específicas necessárias para o acoplamento entre as microrredes, uma vez que todas elas se comunicam através de um barramento comum. Entretanto, por dependerem apenas de um único barramento para realizar a conexão, esta topologia causa uma diminuição na confiabilidade do sistema, pois uma falta na barra comum comprometeria a comunicação entre os agentes do sistema.

3.2.1.2 Arquitetura em Anel

Nesta topologia, cada microrrede se conecta com suas vizinhas, formando um caminho contínuo para o intercâmbio de energia e de informações entre as MRs constituintes do sistema. Em relação à comunicação do *cluster* de microrredes com o sistema de distribuição, há a possibilidade de cada uma se comunicar separadamente com a rede principal (RP), oferecendo mais privacidade na troca de informações, como também pode ser realizada apenas por uma das microrredes, uma vez que há um caminho contínuo para a energia. A Figura 3.2 ilustra esta arquitetura.

Figura 3.2 – Arquitetura em anel.



Fonte: Adaptado de [92].

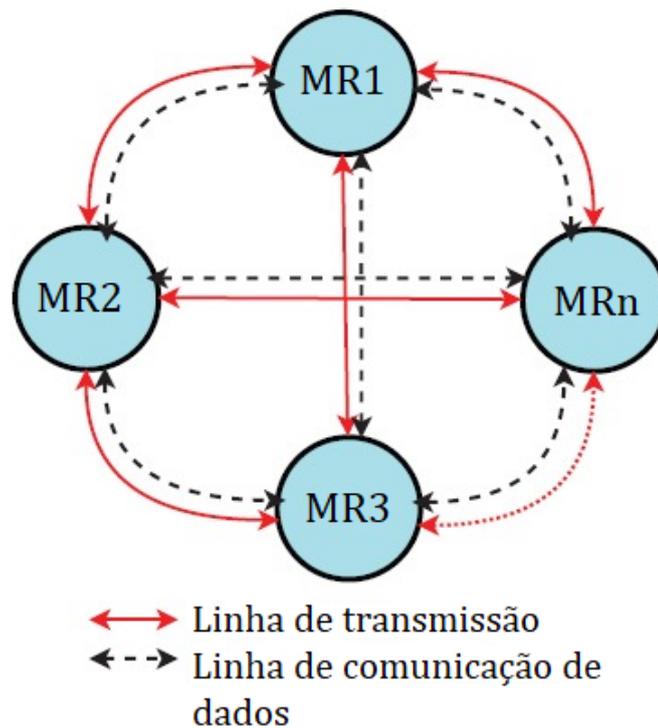
Quando se compara as arquiteturas radial e em anel, é possível observar que a topologia em anel fornece maior flexibilidade e confiabilidade em relação à configuração radial, uma vez que há maior redundância nos caminhos possíveis para a energia e dados de comunicação, não havendo a dependência de um barramento específico como no caso da arquitetura radial. Trabalhos que utilizam desta arquitetura podem ser encontrados em [96–98].

3.2.1.3 Arquitetura em Malha

Esta configuração se assemelha com a arquitetura em anel, entretanto, apresenta maior nível de redundância das linhas que conectam as microrredes. Diferentemente da topologia em anel em que as microrredes se conectavam apenas com suas vizinhas e/ou com o sistema de distribuição, na configuração em malha há uma linha exclusiva de conexão de uma microrrede com todas as outras que constituem o *cluster* [99, 100]. Neste modelo, a rede principal pode se interligar apenas com uma MR ou cada MR separadamente. A Figura 3.3 ilustra este modelo de arquitetura.

Quando se compara com as configurações apresentadas anteriormente, a arqui-

Figura 3.3 – Arquitetura em malha.



Fonte: Adaptado de [92].

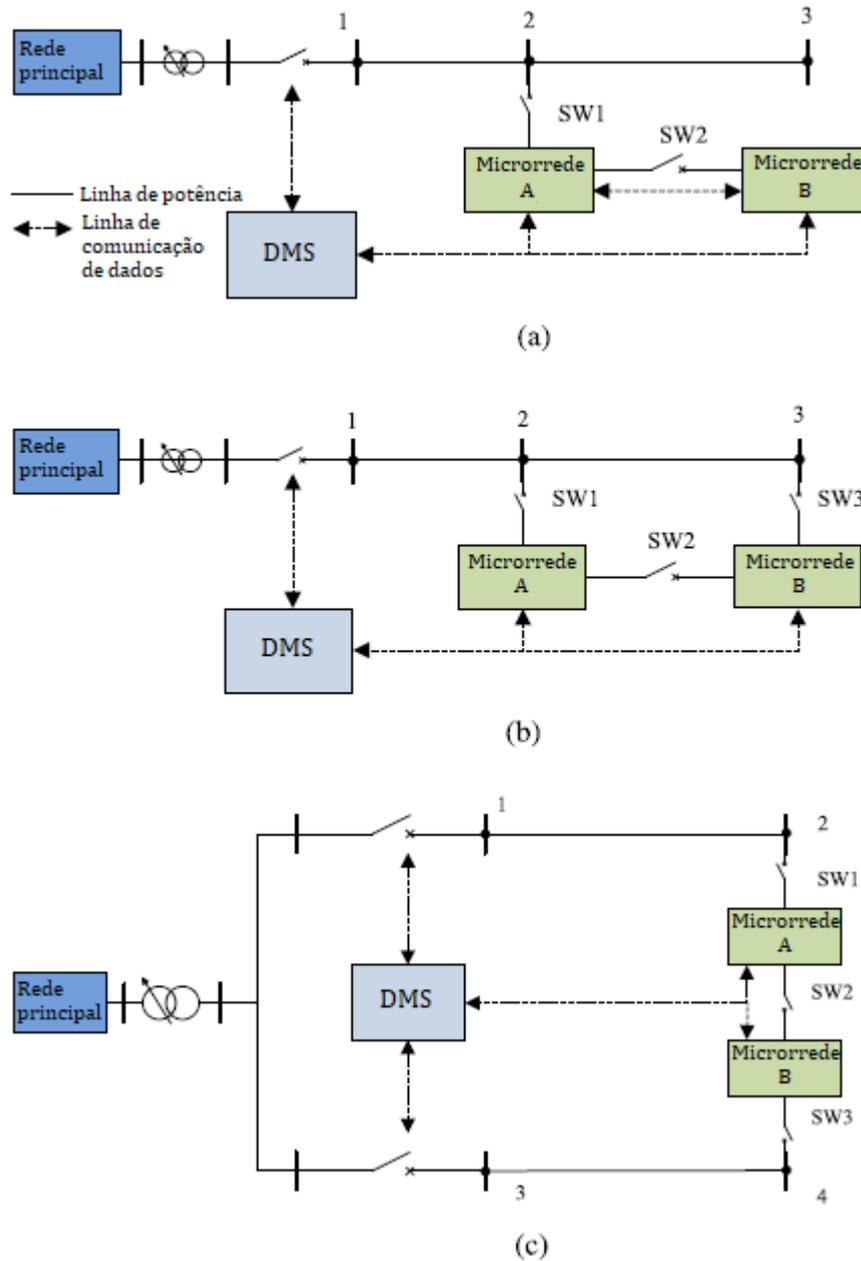
tetura em malha apresenta maiores níveis de flexibilidade, confiabilidade e privacidade para os intercâmbios de energia, uma vez que na ocorrência de uma falta em alguma linha, terá outros caminhos possíveis para o fluxo de energia e informações entre as microrredes.

3.2.1.4 Arquiteturas considerando os alimentadores do Sistema de Distribuição

As configurações apresentadas anteriormente consideram apenas a maneira que as microrredes são interligadas entre si e com o sistema de distribuição. A classificação de arquitetura proposta em [85], além de considerar a forma de conexão entre as microrredes, leva em conta também as formas de conexão com os alimentadores do sistema de distribuição, podendo ser classificados como: **a) microrredes seriais com alimentador simples**, **(b) microrredes paralelas com alimentador simples** e **(c) microrredes interconectadas com múltiplos alimentadores**. A Figura 3.4 apresenta tais tipos de arquitetura.

As chaves presentes na Figura 3.4 (SW1, SW2 e SW3) tornam possível a obtenção de diferentes topologias, como as mencionadas anteriormente, tornando mais perceptível a flexibilidade da operação colaborativa de microrredes. A arquitetura (a) possui nível de confiabilidade menor quando comparada às outras duas topologias, pois só há um caminho possível para a conexão da microrrede B à rede principal. Além disso, só

Figura 3.4 – Arquitetura (a) MRs seriais com alimentador simples, (b) MRs paralelas com alimentador simples e (c) MRs interligadas com múltiplos alimentadores.



Fonte: Adaptado de [20].

há a presença de um único alimentador, diminuindo a flexibilidade da configuração.

A arquitetura (b) apresenta maior nível de flexibilidade quando comparada à configuração (a) pois, neste caso, ambas as microrredes possuem conexão direta entre a microrrede B e a rede principal, tornando possível que esta possa operar de forma *on-grid*, mas isolada da microrrede A, possibilidade que não existe na topologia (a). Entretanto, ainda há a existência de apenas um alimentador, o que influencia na confiabilidade da arquitetura, uma vez que, na saída deste, todas as microrredes irão operar isoladamente.

A arquitetura (c) é aquela que apresenta os maiores níveis de confiabilidade e flexibilidade, pois ambas as microrredes estão diretamente ligadas à rede principal e interligadas entre si. Além disso, não há a dependência de um único alimentador. Na ocorrência de alguma contingência em um dos alimentadores, ainda terá o outro para tornar possível a conexão ao sistema principal.

As possibilidades de conexão entre as microrredes em uma operação conjunta é de fundamental importância para a modelagem e desenvolvimento de estratégias ótimas de gerenciamento de energia do sistema. Além da arquitetura, as microrredes devem possuir robustez na sua infraestrutura física para lidar adequadamente com os possíveis eventos extremos [101]. Em [102] é proposto um modelo de otimização robusta para o projeto de microrredes considerando a ocorrência de eventos climáticos desastrosos através da definição de um conjunto de incertezas multiestágio e multiárea a fim de representar a dinâmica espacial de tais eventos. A representação estocástica das contingências considerando as áreas afetadas fornece uma nova perspectiva aos projetistas do sistema, tornando possível que a confiabilidade da microrrede interligada possa ser considerada ainda na fase de projeto e, assim, podendo ser definida a melhor arquitetura a ser utilizada.

3.2.2 Sistemas de Controle

Os sistemas de controle das microrredes são de fundamental importância, pois são os responsáveis pela estabilidade do sistema através do controle carga-frequência-tensão, objetivando manter os parâmetros essenciais dentro das faixas de valores pré-determinados pelos órgãos reguladores responsáveis, tais como os níveis de tensão e frequência. Partindo desta preocupação, em [103] é apresentado um sistema de controle carga-frequência em multimicrorredes através da utilização de sistemas de armazenamento de energia. Em [104] é proposto um sistema de controle que visa o controle das potências ativa e reativa intercambiadas com a rede principal, bem como a operação ótima e segura de cada microrrede interconectada no *cluster*.

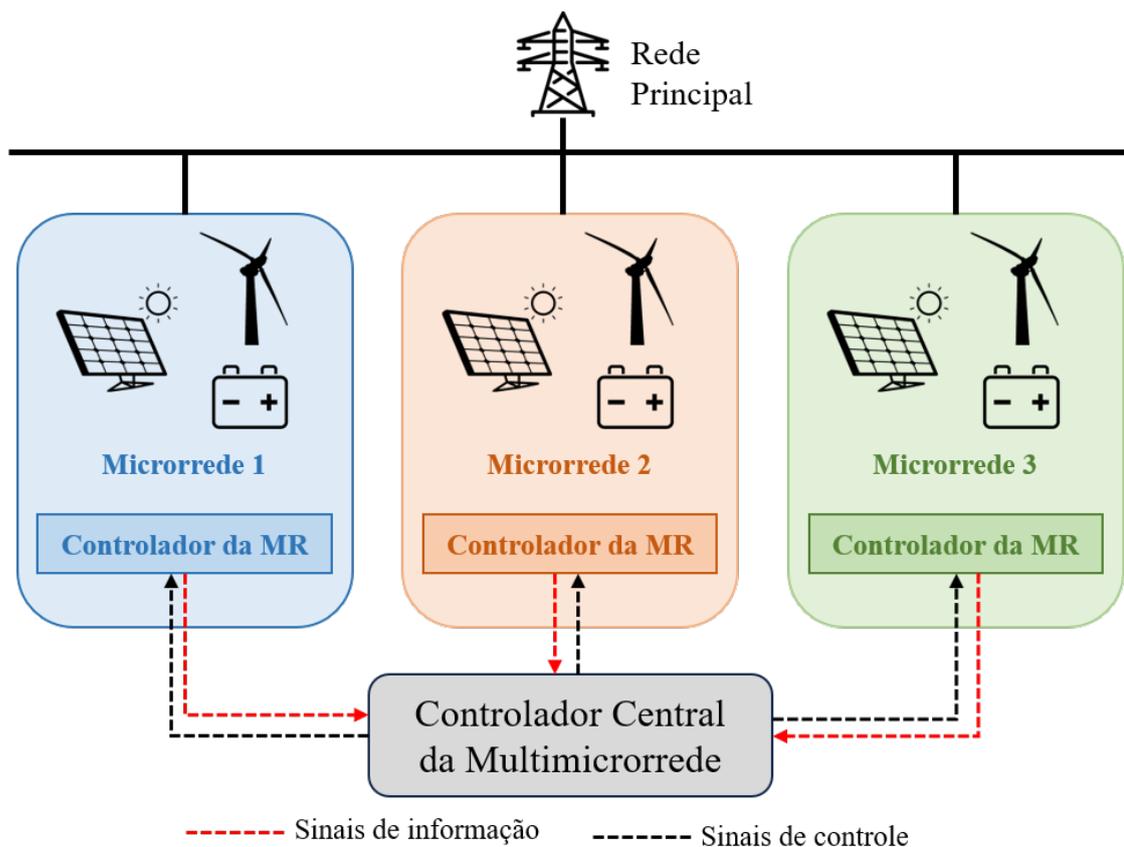
Para o caso das microrredes, alguns dos sistemas de controle utilizados são

o controle centralizado, descentralizado, distribuído e hierárquico, em que os três primeiros referem-se à disposição física dos equipamentos e o último diz respeito à organização do sistema de controle em diferentes níveis [105–107]. Para os sistemas multimicrorredes, entretanto, existem desafios extras a serem considerados, devido à possibilidade de intercâmbio de energia entre diferentes microrredes [20,108].

3.2.2.1 Controle Centralizado

Nesta arquitetura de controle, há a presença de um controlador central responsável por receber todas as informações necessárias advindas das microrredes constituintes do *cluster* (vide Fig. 3.5), como a capacidade de geração disponível (despachável e não-despachável), a demanda, o SOC dos sistemas de armazenamento e as cargas prioritárias. A partir do recebimento de tais informações, o controlador central é responsável por executar os algoritmos de gerenciamento e operação e enviar os comandos para cada microrrede, de acordo com os objetivos operacionais definidos [105,106].

Figura 3.5 – Arquitetura de controle centralizado.



Fonte: Adaptado de [105].

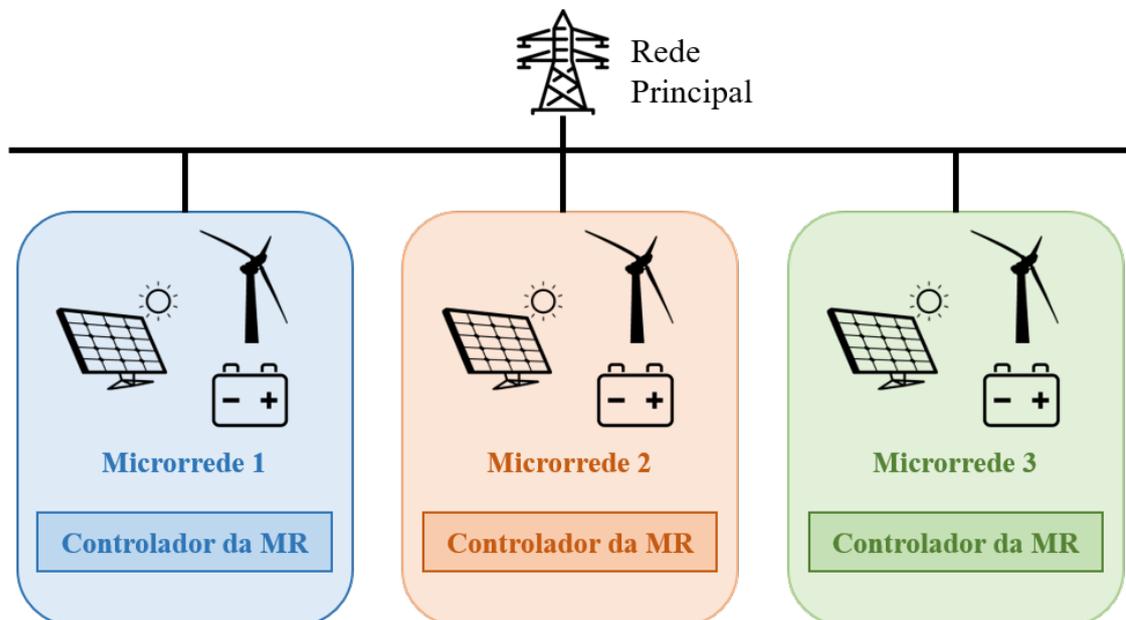
Por depender de um controlador central, torna-se simples de implementar a coordenação das diferentes MRs constituintes do *cluster*. Além disso, por possuir uma visão global da operação, torna-se mais fácil a otimização da operação do conjunto, de acordo

com o objetivo selecionado. Entretanto, a dependência de um único controlador diminui a confiabilidade do sistema, uma vez que uma falha neste componente comprometeria todo o funcionamento do sistema de controle e gerenciamento do *cluster* [106]. Dentre os principais objetivos implementados nos sistemas centralizados estão a minimização dos custos de operação do *cluster* [109–111], da energia comprada da rede principal [112], do corte de carga [113] e a mitigação das incertezas associadas às fontes [114].

3.2.2.2 Controle Descentralizado

Diferentemente do controle centralizado, não há a presença de um controlador central responsável pela tomada de decisões das ações de controle e do gerenciamento energético do *cluster*. Nesta configuração, os controladores de cada microrrede operam de forma independente (vide Fig. 3.5), melhorando a autonomia e a defesa contra ataques e falhas que possam afetar o funcionamento do conjunto inteiro. Entretanto, devido à falta da visão global da operação, torna-se difícil a otimização global da operação colaborativa [111].

Figura 3.6 – Arquitetura de controle descentralizado.



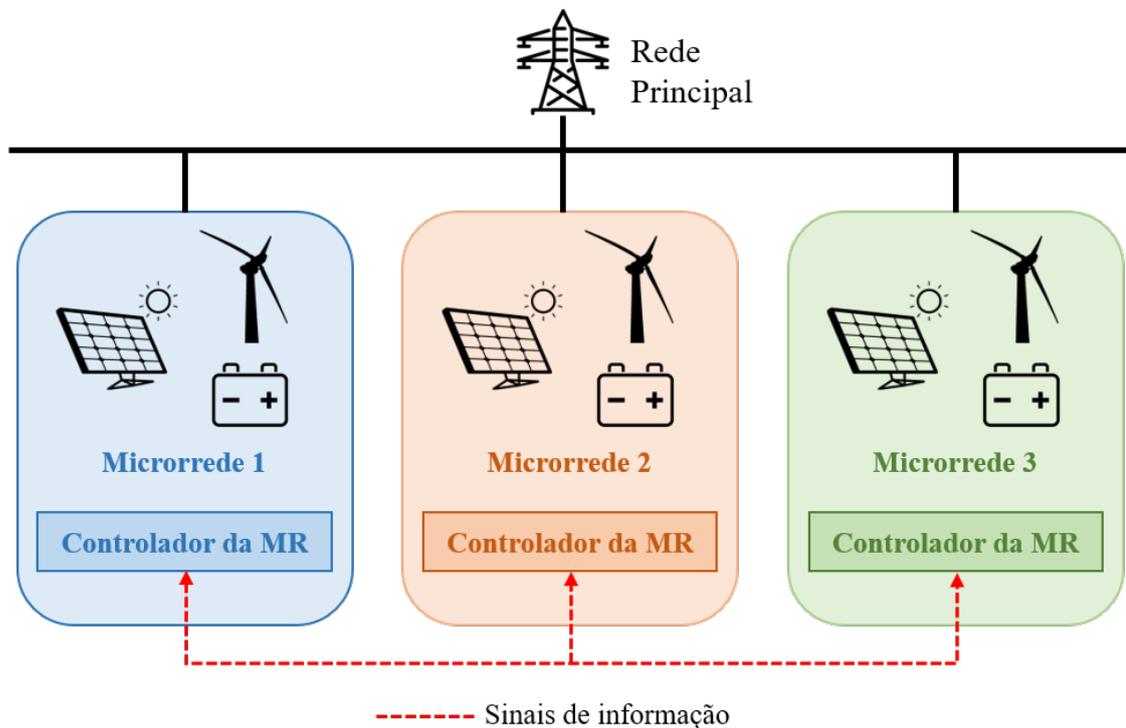
Fonte: Adaptado de [105].

Os resultados apresentados em [115] mostram que o controle descentralizado ocasiona em uma diminuição da performance do *cluster*, devido à falta de cooperação de informações entre as microrredes constituintes do conjunto. Em [116] é proposto um sistema de controle descentralizado, baseado no controle *droop*, a fim de realizar a regulação de tensão e frequência em multimicrorredes.

3.2.2.3 Controle Distribuído

O controle distribuído, apresentado na Figura 3.7, pode ser entendido como um intermediário entre o centralizado e o descentralizado, compartilhando características de ambos [105]. Assim, há a comunicação entre os diferentes controladores de cada MR, como no caso do controle centralizado, permitindo que o *cluster* consiga operar objetivando um objetivo em comum, entretanto, não há um controlador central, como ocorre no controle descentralizado [117].

Figura 3.7 – Arquitetura de controle centralizado.



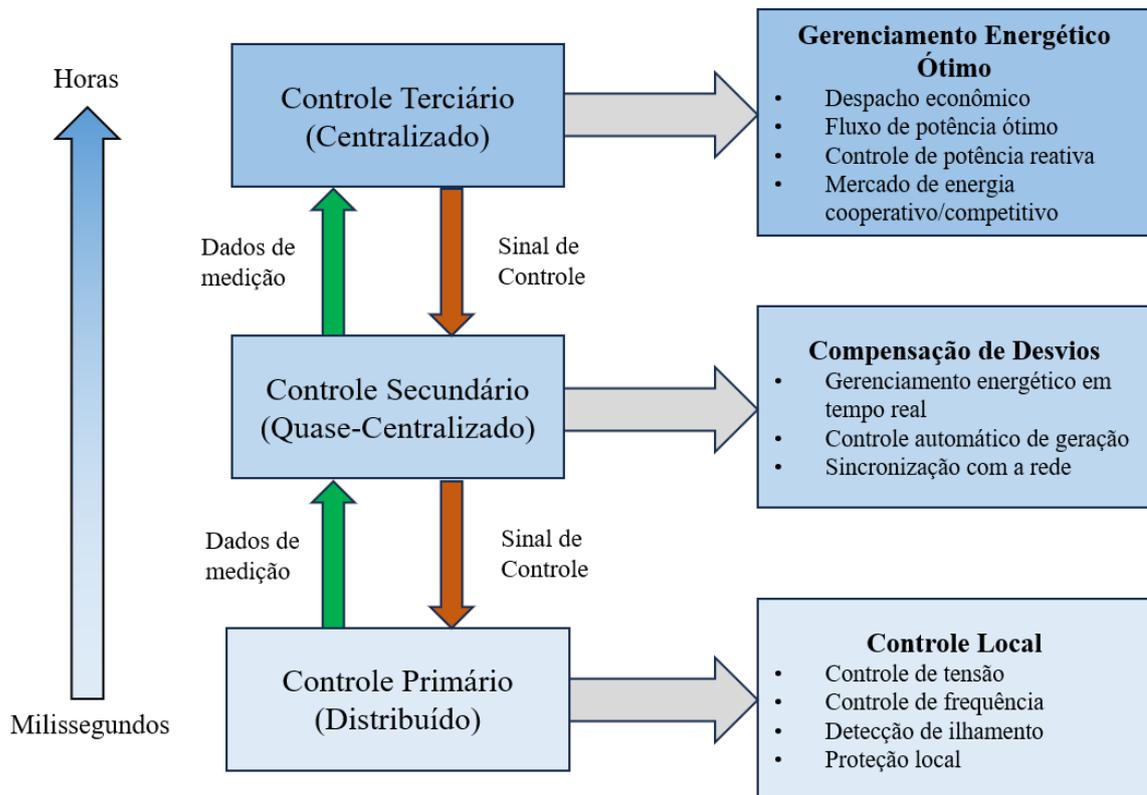
Fonte: Adaptado de [105].

Por mesclar características dos controles centralizado e descentralizado, o controle distribuído apresenta elevado nível de flexibilidade, acarreta em uma melhor integração de novos geradores distribuídos às microrredes e, conseqüentemente, facilitando a operação *plug-and-play* [20,117]. Dentre suas aplicações, encontra-se a regulação do intercâmbio de potência e da tensão média entre diferentes microrredes [118], minimização das perdas de transmissão entre microrredes vizinhas [119] e a minimização dos custos de operação do *cluster* [97].

3.2.2.4 Controle Hierárquico

Na estrutura hierárquica, há a divisão do sistema de controle em diferentes camadas, em que cada uma é responsável por desempenhar alguma função dentro do sistema da multimicrorrede, ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Controle hierárquico em multimicrorredes.



Fonte: Adaptado de [20,92].

Cada uma das camadas presente na estrutura hierárquica irá operar em diferentes escalas temporais. O controle primário, como o próprio nome sugere, é a primeira camada a atuar e sua operação se dá a nível local, atuando nos menores intervalos temporais, uma vez que sua finalidade é a manutenção da estabilidade dos níveis de tensão e frequência da microrrede. Além disso, também realiza o controle de potenciais correntes indesejadas nos conversores eletrônicos, a fim de evitar possíveis danos [108].

O controle secundário é a camada intermediária, sendo a sua atuação mais rápida que o controle primário e mais lenta que o terciário. Sua principal função é a compensação dos desvios de tensão e frequência resultantes da atuação do controlador primário [120]. Adicionalmente, o controle secundário encarrega-se também das melhorias na qualidade de energia, sincronização à rede principal e a coordenação do controle entre os diversos geradores distribuídos [83].

O controle terciário é a camada mais externa e, por conta disso, apresenta os tempos de resposta mais lentos. Por apresentar uma visão mais global do sistema, é a camada responsável pela otimização da operação, sendo responsável pelo gerenciamento ótimo de energia, cuidando de aspectos como o despacho econômico, pré-despacho, fluxo de potência ótimo e o mercado de energia que as microrredes podem estar inseridas. Neste sentido, a camada terciária pode ser entendida como a interface entre o

sistema de distribuição e as microrredes.

Por ser responsável pelo gerenciamento energético ótimo da microrrede, na camada terciária fica localizado o EMS da microrrede (do inglês, *Energy Management System*), sendo o responsável por avaliar e definir a participação de cada fonte dentro da operação da MR, de forma a atender os requisitos necessários para a operação confiável. Dentro da operação do EMS, diversos podem ser os objetivos operacionais, tais como a máxima participação de fontes renováveis na geração [121] e a restauração de microrredes após *blackouts* [122]. Devido a sua importância, diversos trabalhos acerca do EMS podem ser encontrados na literatura, tanto do lado da geração [123–126] quanto da demanda [127–130].

A operação do EMS depende também da arquitetura do sistema de controle. Em um sistema com estrutura centralizada, há o ganho da visão geral da operação conjunta de todas as microrredes conectadas, facilitando a otimização global do *cluster*, mas apresenta confiabilidade reduzida devido ao problema de ponto único de falha. Já no caso do EMS descentralizado, cada MR realiza o seu próprio gerenciamento, buscando a otimização apenas da operação local sem levar em consideração a operação do *cluster*, mas apresenta maior nível de confiabilidade [131]. Em [132] é proposto um sistema de gerenciamento energético para multimicrorredes, em que o sistema foi avaliado através de um índice probabilístico para mensurar a efetividade da estratégia de gerenciamento frente a diferentes cenários em termos de minimização de custos, considerando as incertezas associadas às fontes renováveis. Em [133] é realizada a modelagem de um mercado local de energia para o gerenciamento de energia de múltiplas microrredes interligadas, objetivando a minimização do custo de operação do sistema. Em [134] é proposta uma estratégia multiobjetiva de dois estágios em que, no primeiro estágio, o custo operacional é reduzido e, no segundo estágio, é realizada a melhoria dos programas de resposta pelo lado da demanda.

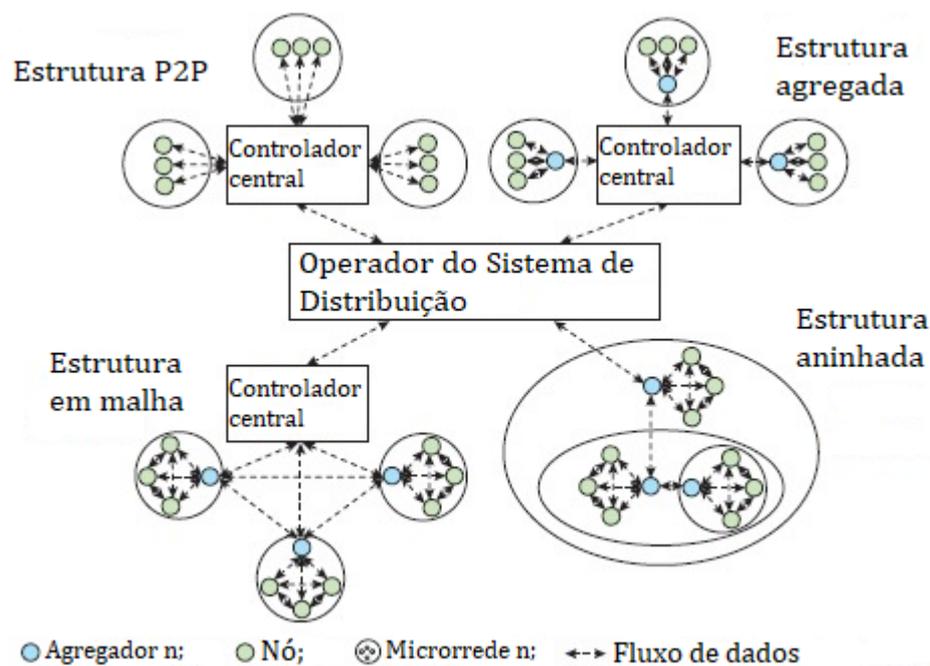
A operação de multimicrorredes incorpora ao sistema o desafio do controle de fluxo de potência entre as microrredes constituintes do *cluster*, adicionando esse objetivo à camada terciária do controle hierárquico [20, 92, 104, 108]. Entretanto, em [83], os autores pontuam que as três camadas normalmente utilizadas (primária, secundária e terciária) não se aplicam às multimicrorredes, sendo necessária a adição de uma camada na estrutura, denominada como “Quaternária”, responsável por lidar com as ações de controle a nível da operação conjunta das microrredes.

3.2.3 Sistemas de Comunicação

Os sistemas de comunicação são de fundamental importância para a operação da MR, uma vez que são os responsáveis pelo tráfego de dados e informações entre os diversos dispositivos constituintes da multimicrorrede, que serão utilizados para as

ações dos sistemas de controle e do EMS (do inglês, *Energy Management System*). Devido à criticidade da sua atuação, é essencial que todas as suas conexões apresentem cerca de 99,99% de disponibilidade [135]. De forma a manter a alta taxa de disponibilidade requerida, diversos fatores devem ser analisados no momento de escolha da tecnologia de comunicação a ser utilizada, tais como sua taxa de transmissão, área de cobertura, qualidade de serviço, confiabilidade, latência e consumo de energia [136]. Algumas topologias para redes de comunicação podem ser consideradas, tais como P2P, em malha, agregadas ou aninhadas [137], como apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Estruturas de comunicação em multimicrorredes.



Fonte: Adaptado de [137].

1. **Estrutura P2P:** na estrutura *peer-to-peer* (ponto a ponto) não há a presença de nenhum agregador, que é o componente responsável por reunir as informações de diferentes pontos e levar ao controlador central. Nesta topologia, cada nó é diretamente conectado ao controlador central, que fica sendo responsável por reunião e transmissão das informações entre o Operador do Sistema de Distribuição e a multimicrorrede [138]. As principais vantagens da estrutura P2P estão a sua simples integração e baixo custo. Entretanto, a sua dependência do controlador central para a realização de toda a troca de informações diminui a sua confiabilidade, pois um problema neste dispositivo acarretaria na paralização de toda a rede de comunicação [139];
2. **Estruturas agregadas:** nesta estrutura há um agregador em cada MR, sendo responsável por reunir as informações e levá-las ao controlador central, sendo adequada

para multimicrorredes de larga escala que possuem informações frequentemente sendo intercambiadas [140, 141]. Similarmente à estrutura P2P, também apresenta confiabilidade reduzida devido à dependência do controlador central para a realização de todas as trocas de informações;

3. **Estruturas em malha:** apresentam maior redundância quando comparadas às estruturas P2P e agregadas. Dentro de uma MR, cada nó pode se conectar a todos os outros e também com o agregador, existindo também a conexão entre todas as MRs constituintes do *cluster* e com o controlador central. Devido às diversas conexões, a estrutura em malha apresenta maior flexibilidade e confiabilidade, pois não há a dependência direta apenas do controlador central [142, 143]. Entretanto, devido ao seu nível de redundância, seus custos tornam-se elevados;
4. **Estruturas aninhadas:** utilizadas em microrredes aninhadas. As informações são trocadas apenas entre agregadores adjacentes, garantindo a privacidade das informações das interações [90]. Por não possuir um controlador central responsável pelo intercâmbio de informações, não apresenta o problema de ponto único de falha¹ e apresenta baixo custo de operação [144].

Além da estrutura física das redes de comunicação, é necessário também que sejam definidos os protocolos de comunicação a serem utilizados, que dizem respeito às regras e padrões que controlam e possibilitam a comunicação e troca de dados entre sistemas. Dentre os principais, destacam-se o *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP), o *Distributed Network Protocol* (DNP3) e o Modbus [138]. Dentre as tecnologias utilizadas para a realização da comunicação entre múltiplas microrredes podem ser empregados dispositivos com ou sem fio. Os dispositivos sem fio apresentam as vantagens de baixo custo de investimento, implantação rápida, ampla acesso e alta flexibilidade, enquanto as tecnologias com fio possuem a vantagem de não sofrerem com problemas de interferências [145].

3.3 Contribuições da Operação Colaborativa na Resiliência

Os sistemas elétricos são projetados de forma a manter o seu funcionamento mesmo frente a prováveis situações adversas de operação, como a saída de um ou dois componentes (e.g., linhas de transmissão ou transformadores), denominadas como contingências $N-1$ e $N-2$ [146]. Entretanto, na ocorrência de eventos climáticos desastrosos, como no caso de furacões, o sistema elétrico convencional não tem se demonstrado capaz de manter a continuidade da operação e do atendimento às cargas, evidenciando a necessidade de uma rede resiliente, capaz de se restaurar rapidamente.

¹ É a designação para o ponto do sistema em que, se houver uma falha, acarretará na falha de todo o sistema.

A utilização das fontes renováveis de energia, principalmente a eólica e solar, tornou possível a descentralização da geração de energia, aumentando a confiabilidade da rede, pois diminuiu a dependência de grandes centros de geração, como hidrelétricas, e, conseqüentemente, das longas linhas de transmissão que, em situações de faltas, poderiam ocasionar *blackouts* em grandes centros urbanos. Por conta de sua flexibilidade de operarem conectadas ou não à rede principal, as microrredes permitem que em situações de emergência, como na ocorrência de faltas no sistema elétrico, a MR possa se desconectar da rede faltosa e operar de forma autônoma e ilhada.

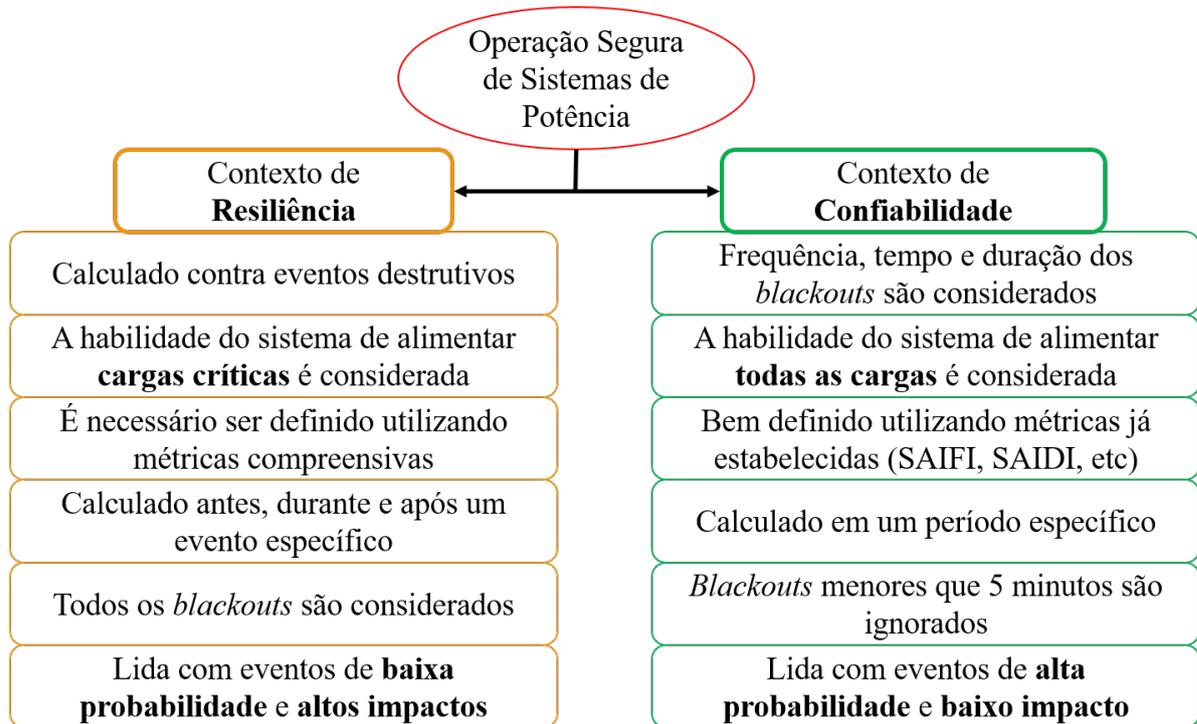
O termo “resiliência” foi inicialmente apresentado em um trabalho sobre sistemas ecológicos, sendo definido como “uma medida de persistência de sistemas e de sua capacidade de absorver mudanças e distúrbios e ainda manter as mesmas relações entre populações ou variáveis de estado [147]. Partindo desta ideia, outras definições começaram a ser apresentadas posteriormente em diferentes áreas, como em sistemas de potência. Em [148] a resiliência é definida como “habilidade dos equipamentos, sistemas e redes de prever, absorver e rapidamente se recuperar de eventos catastróficos”. Em [149] os autores citam que “a resiliência pode ser expressa como a habilidade de um sistema ou entidade de antecipar, resistir, absorver, se adaptar e se recuperar de um distúrbio”. Assim, é possível perceber que ainda não há uma definição exata para a resiliência, mas uma série de propostas seguindo a mesma linha.

Por ser um conceito que vem ganhando notoriedade mais recentemente, a definição utilizada para resiliência por vezes pode ser confundida com outros conceitos já bem estabelecidos na área de sistemas de potência, como confiabilidade e análise de contingências. Todos os termos dizem respeito à segurança operativa das redes elétricas. Entretanto, a principal diferença entre a resiliência e a confiabilidade reside no fato de que a confiabilidade lida com eventos de alta probabilidade de ocorrência e baixos efeitos destrutivos, como erros comuns que podem ocorrer na operação dos sistemas de potência, enquanto a resiliência lida com eventos de baixa probabilidade de ocorrência e altos efeitos destrutivos, como furacões e tempestades [11]. A Figura 3.10 apresenta as principais diferenças entre os conceitos de resiliência e confiabilidade [1, 150].

Já na análise de contingências são analisadas as resposta do sistema de acordo com a ocorrência dos eventos de falha mais prováveis. Assim, na análise de contingências é avaliada a habilidade do sistema de lidar com situações em que diversos componentes do sistema sofreram alguma interrupção no seu funcionamento, sendo denominado como contingência $N - 1$ na saída de um componente, $N - 2$ na saída de dois componentes e assim sucessivamente. Por ser analisado baseado nas maiores probabilidade de ocorrência, a análise de contingência pode ser classificada também em uma categoria da análise de confiabilidade [151].

Uma única microrrede conectada ao sistema de distribuição já contribui para o

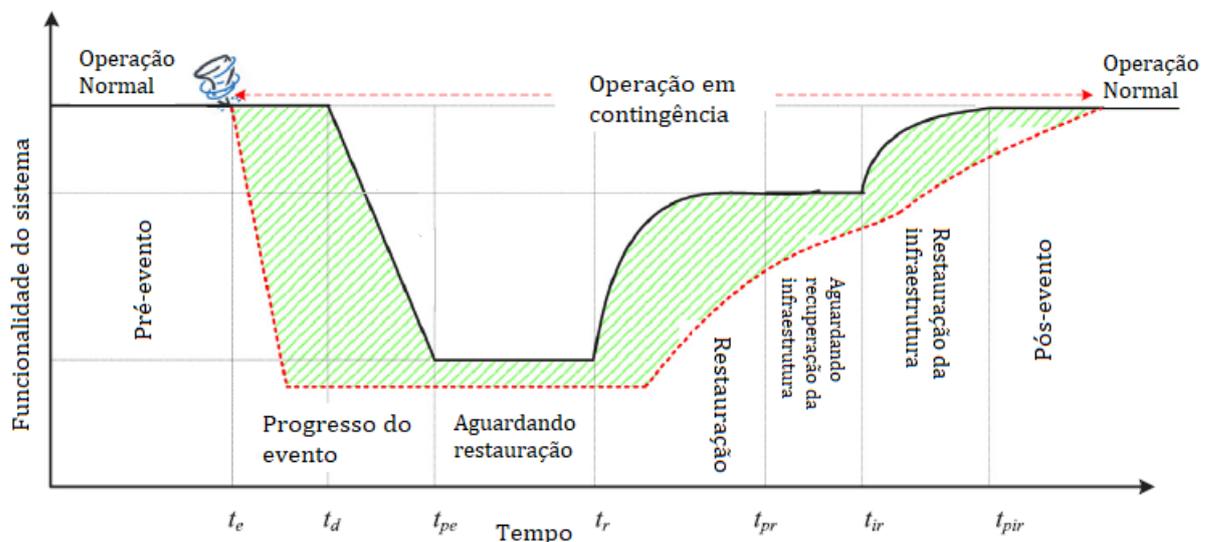
Figura 3.10 – Principais diferenças entre resiliência e confiabilidade.



Fonte: Adaptado de [1].

aumento dos índices de resiliência do sistema, devido à capacidade de operar isoladamente em situações de emergência e manter sua autossuficiência, contribuindo também para a resposta mais rápida durante a recuperação da rede frente a eventos desastrosos, conforme ilustra a Figura 3.11.

Figura 3.11 – Curva de resiliência com o impacto das microrredes.



Fonte: [1].

Conforme a curva apresentada na Figura 3.11, a presença das microrredes retarda o progresso do evento, mantendo a funcionalidade do sistema por mais tempo. Além disso, colaboram com a restauração da operabilidade de maneira mais rápida. As multimicrorredes contribuem para o aumento da velocidade de reação, uma vez que são capazes de operar em blocos, através da interligação entre diversas MRs, mantendo o fornecimento para os blocos de carga, de acordo com critério pré-definidos.

Ao realizar a interligação de diversas microrredes, as contribuições tornam-se ainda maiores, uma vez que, além de possuírem a capacidade de suprir as cargas locais, também há a possibilidade do intercâmbio de energia entre as diversas MRs constituintes do *cluster* [152–154]. Assim, diversos trabalhos vêm utilizando as multimicrorredes como forma de aumentar a resiliência, em [155] é realizada uma investigação acerca da capacidade de autorrestauração do sistema de distribuição através da divisão do sistema em múltiplas microrredes. Em [156] é proposto um método de decisão multi-critério para a conexão de múltiplas microrredes para a realização do intercâmbio de energia e melhorar a resiliência.

A resiliência de uma microrrede pode ser vista a partir de duas perspectivas: perante a **a)** eventos externos e **b)** eventos internos. A resiliência a eventos externos diz respeito à capacidade de sobrevivência da microrrede perante faltas na rede externa, devendo ser capaz de manter o fornecimento de energia às cargas pertencentes do seu limite elétrico de operação, sendo utilizada como uma fonte para a melhoria da resiliência do sistema. Já a resiliência perante eventos internos relaciona-se à capacidade da microrrede de sobreviver diante de falhas em equipamentos locais, como geradores, rede de distribuição interna, indisponibilidade das fontes, etc. Em [157] é proposto um método de melhoria da resiliência através da minimização do corte de carga durante a operação ilhada da microrrede após um evento disruptivo, em que as cargas são divididas entre críticas e não-críticas. Após a alimentação das cargas críticas, o sistema de gerenciamento realiza a decisão de fornecer energia às cargas não-críticas ou armazená-la para despachos futuros. Outros métodos encontrados na literatura acerca da melhoria da resiliência interna são o planejamento eficiente dos recursos energéticos disponíveis no momento da desconexão entre a microrrede e a rede principal [158] e a utilização de sistema de armazenamento por baterias como recurso de resiliência [159].

Nesse contexto, as multimicrorredes desempenham um papel fundamental em ambas as perspectivas de resiliência, tanto interna quanto externa. Ao se considerar uma única microrrede, uma das maneiras de ampliar a resiliência interna é a partir da redundância de equipamentos, i.e., possuir equipamentos suplentes, de forma que estes entrem em operação na ocorrência de uma falha. Entretanto, a redundância de equipamentos ocasiona em um aumento considerável dos custos de implantação da microrrede [160]. Ao se conectar diversas microrredes e obter a possibilidade de in-

tercâmbio de energia entre estas, em um momento de falha interna de qualquer uma das MRs do *cluster*, passa a existir a alternativa de comprar energia de sua microrrede vizinha, evitando assim o corte de suas cargas locais e, conseqüentemente, aumentando a resiliência tanto do sistema (perspectiva externa) quanto da própria MR (perspectiva interna).

Alguns trabalhos são encontrados na literatura acerca da utilização das multimicrorredes objetivando o aumento da resiliência do sistema. Em [153] é proposta uma arquitetura variável de acordo com a operação do sistema (normal ou de autorrestauração). Durante a operação normal da multimicrorrede, o objetivo do sistema é a minimização dos custos de operação de cada MR, resultando na otimização global do sistema. Na ocorrência de uma falta, a arquitetura da multimicrorrede é modificada e torna possível que a capacidade de geração local de cada microrrede possa ser utilizada para fornecer suporte à porção do sistema que se encontra em emergência. Em [6] é proposta a utilização de microrredes interligadas para facilitar a integração de recursos energéticos variáveis a fim de melhorar os aspectos econômicos e de resiliência nas microrredes. Em [161] é realizado um estudo acerca dos impactos das multimicrorredes na estabilidade e resiliência das microrredes do *cluster*. Os resultados indicam os benefícios da utilização de microrredes interligadas ao invés da operação isolada. Além dos trabalhos mencionados, diversos outros podem ser encontrados no âmbito da utilização de multimicrorredes no contexto da resiliência [162–166].

Assim como a sua definição, não há uma métrica única para a quantificação do índice de resiliência do sistema. Diversos trabalhos podem ser encontrados com propostas de métricas para a estimativa da resiliência. Em [1] é realizada uma revisão bibliográfica acerca das tendências futuras no âmbito da resiliência de sistemas de potências. Os autores apresentam métricas propostas em diversos trabalhos encontrados na literatura, classificando-as de acordo com as variáveis que levam em consideração para a realização do cálculo do índice: confiabilidade, evento, estrutura física, compatibilidade, nível de aplicação e horizonte temporal. Dentre os trabalhos citados pelos autores, a métrica apresentada em [167] é a mais abrangente, levando em consideração todas as variáveis avaliadas em [1], além da probabilidade de perda de carga, demanda não atendida esperada, fragilidade do sistema, dificuldades de recuperação do sistema e a habilidade de recuperação do sistema após um evento destrutivo. Em [168] podem ser encontradas diversas outras métricas, através da revisão bibliográfica realizada pelos autores, dentre elas, aquelas propostas em [18]:

$$\mathcal{R}_I = \frac{T_U}{T} = \frac{T_U}{(T_U + T_D)} \quad (3.1)$$

$$\mathcal{R}_B = \frac{\sum_{i=1}^N T_{U,i}}{NT} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{U,i}}{\sum_{i=1}^N (T_{U,i} + T_{D,i})} \quad (3.2)$$

em que as Equações 3.1 e 3.2 dizem respeito ao índice de resiliência de uma única carga e de um grupo de cargas, respectivamente. Os termos T_U e T_D são os tempos de recuperação e de perda de alimentação das cargas, respectivamente, enquanto $T_{U,i}$ e $T_{D,i}$ são os tempos de recuperação e de perda de alimentação de uma carga i específica. Em [169], o índice de resiliência proposto é descrito como:

$$\mathcal{R} = \frac{1}{NT} \sum_{h=1}^{NT} \sum_{i=1}^N \sum_{t=h+1}^{h+H} \Delta t \cdot LS_{i,t} \quad (3.3)$$

em que NT é a quantidade de intervalos de tempo em um dia; h e H são o tempo inicial e duração do distúrbio, respectivamente; i e N são o índice e a quantidade de microrredes, respectivamente; Δt é o intervalo de duração e LS é a carga que foi necessário ser cortada. Em [170] a resiliência é proposta como:

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\frac{1}{t_{fim} - t_{inicio}} \int_{t_{inicio}}^{t_{fim}} \frac{P_0 - P(t)}{P(t)} dt} \quad (3.4)$$

em que t_{inicio} e t_{fim} são os instantes de início e fim do distúrbio, respectivamente, e P_0 e $P(t)$ são as potências no instante inicial e instante t durante a ocorrência do distúrbio.

Para a implantação de uma microrrede com elevados níveis de resiliência (tanto externa quanto interna), os custos associados podem tornar o projeto inviável do ponto de vista econômico. Assim, faz-se necessário observar a resiliência também do ponto de vista econômico, a fim de entender os pontos-chave a serem considerados ao realizar os investimentos e viabilizar a implantação de microrredes que possam contribuir com a resiliência do sistema elétrico. Em [171] é realizada uma revisão bibliográfica dos métodos avaliação dos investimentos realizados no sistema elétrico do ponto de vista da resiliência, em que os autores destacam a importância da quantificação dos custos associados à resiliência, de forma a garantir que não ocorra sub ou sobreinvestimentos. Trabalhos na área de análise econômica a respeito da resiliência de sistemas de potência podem ser encontrados em [172–174].

3.4 Perspectivas Futuras das Multimicrorredes

Os principais desafios encontrados na operação das microrredes estão relacionados às incertezas das fontes de geração, dificultando o desenvolvimento das estratégias de controle e gerenciamento. Nas multimicrorredes, além destes desafios, aparecem

também aqueles relacionados à interoperabilidade entre diversas MRs. Por serem redes mais complexas, os esquemas de proteção das multimicrorredes devem ser desenvolvidos apropriadamente para permitir a operação segura durante a conexão/desconexão de múltiplas microrredes no sistema de distribuição convencional. Neste sentido, podem ser mencionados alguns aspectos que merecem atenção para o desenvolvimento das multimicrorredes [175]:

- O desenvolvimento de estratégias de controle adequadas. Por se tratar de múltiplas microrredes interconectadas e operando em conjunto, os sistemas de controle tornam-se mais complexos;
- A aplicação de algoritmos de computação quântica [176–178] pode ser uma solução promissora para a otimização da coordenação entre as múltiplas MRs e das estruturas de controle;
- Em um sistema com múltiplas microrredes, existem diversos proprietários e partes interessadas. A privacidade e proteção de dados devem ser adequadas;
- A otimização da operação da multimicrorrede depende da alocação ótima dos geradores distribuídos e devem ser consideradas as interações entre diversas microrredes, como os limites dos fluxos de potência nas linhas, incluindo o compartilhamento de potência reativa.

Além dos aspectos operacionais, o cenário regulatório também necessita de atenção. O desenvolvimento de políticas de incentivo são de fundamental importância para a difusão das multimicrorredes, uma vez que as regulamentações irão permitir que os interessados possam ter uma forma de calcular os riscos inerentes ao investimento.

3.5 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral acerca das multimicrorredes, como seus benefícios, desafios e perspectivas futuras. Dentre os benefícios, pode-se destacar a contribuição para o aumento dos índices de confiabilidade e resiliência do sistema, uma vez que possibilita o intercâmbio de energia entre as diversas microrredes constituintes do *cluster*, contribuição também para a redução dos montantes de energia vertida. Em contrapartida, o gerenciamento da operação se torna mais complexo em tais sistemas.

Apresentou-se as principais arquiteturas encontradas na interligação de microrredes e dos sistemas de controle utilizados nas multimicrorredes, bem como suas principais características. Em sistemas com múltiplas microrredes conectadas, diversos

podem ser os objetivos definidos para a operação: maximização da receita, minimização de perdas, maximização dos índices de confiabilidade, etc. De acordo com o objetivo acordado entre os agentes do sistema, deve-se escolher a arquitetura de controle que mais se adequa àquela meta.

A partir do estado-da-arte, foi possível identificar e apresentar as principais tendências no tema. Dentre estes, destaca-se o desenvolvimento de estruturas de controle adequadas para a operação conjunta, bem como algoritmos para a otimização da coordenação entre múltiplas microrredes e suas estratégias de controle. Além dos desafios operacionais, o cenário regulatório também necessita de maiores esforços a fim de prover novas políticas de incentivo para a difusão da utilização das multimicrorredes.

Após a apresentação geral acerca das multimicrorredes realizada neste Capítulo, o Capítulo 4 apresenta os resultados da operação em cenários de múltiplas microrredes operando colaborativamente, a fim de se averiguar os potenciais benefícios trazidos por este modelo de operação.

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE MICRORREDES COLABORATIVAS

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões acerca das simulações da operação de microrredes (MRs) operando de forma colaborativa, com a possibilidade de intercâmbio de energia entre os agentes constituintes do sistema. Para tal, as simulações dos cenários foram desenvolvidas no ambiente MATLAB, utilizando dados reais de operação.

4.1 Formulação do Problema

O problema a ser analisado visa um melhor entendimento acerca da utilização de microrredes interligadas como uma maneira de melhorar a flexibilidade e resiliência das redes elétricas, além de explorar melhor a infraestrutura existente e obter ganhos financeiros. Como apresentado na seção anterior, a utilização das microrredes já possui aplicações variadas, tanto operacionais, como a melhoria de diferentes aspectos da operação do sistema elétrico, quanto ambientais, como a descarbonização da rede.

Como apresentado em trabalhos presentes na literatura, a operação de microrredes interconectadas traz consigo benefícios para a operação da rede principal, devido a sua flexibilidade operacional. Entretanto, além de benefícios, são observados também alguns desafios operacionais, tendo em vista que as fontes utilizadas nas microrredes são, em sua maioria, de caráter renovável e possuem incertezas associadas às fontes primárias de energia, como a intensidade da irradiância e dos ventos.

A operação de uma única microrrede no modo ilhado já apresenta desafios no seu gerenciamento energético, devido às incertezas associadas à geração. Assim, quando se pensa na operação colaborativa entre múltiplas microrredes, esses desafios se tornam

ainda maiores pois, neste caso, deve-se lidar com a natureza estocástica da geração de diversas fontes nas diferentes microrredes, dificultando ainda mais o gerenciamento energético.

4.1.1 Operação Colaborativa

A modelagem de múltiplas microrredes operando de forma colaborativa contribui para a observação da maneira que os diversos agentes do sistema colaboram entre si para uma melhor operação e um gerenciamento energético mais eficiente. Neste sentido, para modelar a operação colaborativa entre M microrredes, considera-se que cada microrrede esteja fornecendo $E_i^{(g)}$ e $E_i^{(BESSout)}$ (fontes e sistema de armazenamento, respectivamente), consumindo $E_i^{(c)}$ e absorvendo $E_i^{(BESSin)}$ unidades de energia. Além disso, cada i -ésima microrrede do *cluster* pode vender energia para a j -ésima MR ($E_{i,j}$) e comprar da k -ésima MR ($E_{k,i}$). Assim, do ponto de vista energético e sem considerar a rede principal na operação, pode-se modelar a operação colaborativa como [179]:

$$E_i^{(g)} + E_i^{(BESSout)} + \mathbf{e}_i^T \mathbf{A}^T \mathbf{E}_i^{(b)} = E_i^{(c)} - E_i^{(cut)} + E_i^{(BESSin)} + \mathbf{e}_i^T \mathbf{A} \mathbf{E}_i^{(s)} \quad (4.1)$$

em que $E_i^{(g)}$ é o montante de energia gerada localmente, $E_i^{(BESSout)}$ é a energia fornecida pelo sistema de armazenamento, \mathbf{e}_i^T é um vetor composto pela i -ésima coluna da matriz identidade, \mathbf{A} é a matriz de interconexão entre as microrredes do conjunto, $E_i^{(c)}$ é a energia demandada, $E_i^{(cut)}$ é a parcela de energia não atendida e $E_i^{(BESSin)}$ é a parcela de energia absorvida pelo sistema de armazenamento, sendo todas as variáveis referentes à operação da i -ésima microrrede. Os termos $\mathbf{E}_i^{(b)}$ e $\mathbf{E}_i^{(s)}$ são vetores coluna das parcelas comprada e vendida pela microrrede i , sendo definidos pela Equação 4.2:

$$\mathbf{E}_i^{(b)} = \begin{bmatrix} E_{1,i} \\ E_{2,i} \\ \vdots \\ E_{M,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1,i}^{exc} + E_{1,i}^{BESS} \\ E_{2,i}^{exc} + E_{2,i}^{BESS} \\ E_{3,i}^{exc} + E_{3,i}^{BESS} \\ \vdots \\ E_{M,i}^{exc} + E_{M,i}^{BESS} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{E}_i^{(s)} = \begin{bmatrix} E_{i,1} \\ E_{i,2} \\ \vdots \\ E_{i,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{i,1}^{exc} + E_{i,1}^{BESS} \\ E_{i,2}^{exc} + E_{i,2}^{BESS} \\ E_{i,3}^{exc} + E_{i,3}^{BESS} \\ \vdots \\ E_{i,M}^{exc} + E_{i,M}^{BESS} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

em que os termos $E_{i,M}$ diz respeito ao montante de energia fluindo de uma microrrede i em direção a uma microrrede M , sendo tal termo composto por uma parcela advinda do excedente de geração da microrrede i (vendedora), representada por $E_{i,M}^{exc}$ e por uma fração advinda da energia proveniente do sistema de armazenamento, representada por $E_{i,M}^{BESS}$.

A matriz \mathbf{A} possui dimensões $M \times M$ e representa o estado de conexão entre uma microrrede i e uma microrrede j . A diagonal principal de \mathbf{A} é nula, uma vez que a matriz representa a conexão entre duas microrredes distintas, sendo descrita como:

$$\mathbf{A} = [a_{i,j}]_{M \times M} \begin{cases} a_{i,i} = 0, \text{ por convenção} \\ a_{i,j} = a_{j,i} = 0, \text{ se as microrredes não possuírem conexão} \\ a_{i,j} = a_{j,i} = 1, \text{ se as microrredes possuírem conexão} \end{cases} \quad (4.3)$$

De forma geral, os custos associados à operação colaborativa das microrredes devem levar em consideração os custos de produção de sua energia local, juntamente com os custos da energia intercambiada com as outras microrredes do *cluster*. Assim, isolando o termo $E_i^{(g)}$ na Equação 4.1, tem-se a expressão descrita na Equação 4.4.

$$E_i^{(g)} = \left(E_i^{(c)} - E_i^{(cut)} + E_i^{(BESSin)} - E_i^{(BESSout)} + \mathbf{e}_i^T \left(\mathbf{A} \mathbf{E}_i^{(s)} - \mathbf{A}^T \mathbf{E}_i^{(b)} \right) \right) \quad (4.4)$$

Denominando $\gamma \left(\mathbf{E}_i^{(b)} \right)$ como o custo associado à compra de energia por uma microrrede i , pode-se descrevê-lo de acordo com a Equação 4.5:

$$\gamma \left(\mathbf{E}_i^{(b)} \right) = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 E_{1,i}^{exc} + \beta_1 E_{1,i}^{BESS} + \sigma_{1,i} \left(E_{1,i}^{exc} + E_{1,i}^{BESS} \right) \\ \varepsilon_2 E_{2,i}^{exc} + \beta_2 E_{2,i}^{BESS} + \sigma_{2,i} \left(E_{2,i}^{exc} + E_{2,i}^{BESS} \right) \\ \varepsilon_3 E_{3,i}^{exc} + \beta_3 E_{3,i}^{BESS} + \sigma_{3,i} \left(E_{3,i}^{exc} + E_{3,i}^{BESS} \right) \\ \vdots \\ \varepsilon_M E_{M,i}^{exc} + \beta_M E_{M,i}^{BESS} + \sigma_{M,i} \left(E_{M,i}^{exc} + E_{M,i}^{BESS} \right) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

em que ε_i e β_i referem-se às tarifa da energia em excesso e da energia contida nos sistemas de armazenamento, respectivamente, da i -ésima microrrede, e $\sigma_{M,i}$ é a tarifa do uso do sistema físico utilizado para o intercâmbio de energia entre as microrredes i e M .

Considerando os custos de produção de energia localmente pela microrrede i e os custos associados à importação de energia de uma microrrede vizinha $\gamma \left(\mathbf{E}_i^{(b)} \right)$, a função multiobjetivo a ser minimizada na operação da multimicrorrede pode ser escrita segundo a Equação 4.6.

$$\mathcal{F} = \min \sum_{i=1}^M \underbrace{C_i \left(E_i^{(c)} - E_i^{(cut)} + E_i^{(BESSin)} - E_i^{(BESSout)} + \mathbf{e}_i^T \left(\mathbf{A} \mathbf{E}_i^{(s)} - \mathbf{A}^T \mathbf{E}_i^{(b)} \right) \right)}_{(I)} + \underbrace{\sum_{i=1}^M \mathbf{e}_i^T \mathbf{A}^T \gamma \left(\mathbf{E}_i^{(b)} \right)}_{(II)} + \underbrace{\sum_{i=1}^M \rho_i L_i^{cut} \Delta t}_{(III)} \quad (4.6)$$

sujeito a

$$\left\{ \begin{array}{l} SOC_i^{min} \leq SOC_i \leq SOC_i^{max} \\ P_j + \sum_{i=1}^M P_{ij} = P_j^{load} \\ P_{i,j} \leq \Phi_{i,j} \\ PV_i^{min} \leq PV_i \leq PV_i^{max} \\ WT_i^{min} \leq WT_i \leq WT_i^{max} \end{array} \right. \quad (4.7)$$

em que SOC_i^{min} e SOC_i^{max} representam os estados de carga mínimo e máximo da i -ésima microrrede; P_j é a potência de geração disponível pela microrrede j ; $P_{i,j}$ é a potência fluindo da microrrede i em direção a uma microrrede j ; P_j^{load} é a potência de carga da microrrede j ; $\Phi_{i,j}$ é o limite físico da interconexão entre duas microrredes i e j ; PV_i^{min} e PV_i^{max} são os limites mínimo e máximo da geração fotovoltaica na i -ésima microrrede, respectivamente e, por fim, WT_i^{min} e WT_i^{max} são os limites mínimo e máximo da geração eólica em uma microrrede i .

O termo (I) na Equação 4.6 diz respeito aos custos associados à energia líquida local disponível na microrrede i , como apresentado na Equação 4.4. O termo (II) é associado aos custos de importação de energia de uma microrrede vizinha, como demonstrado através da Equação 4.5. O termo (III) refere-se à penalidade de corte de carga na microrrede i , de acordo com o termo ρ_i , em um intervalo de tempo Δt .

4.1.2 Operação Ilhada

A formulação da operação ilhada pode ser entendida a partir da Equação 4.1. Entretanto, os vetores $\mathbf{E}_i^{(b)}$ e $\mathbf{E}_i^{(s)}$ são nulos, pois não há intercâmbio de energia entre as diversas microrredes do *cluster*. Assim, a operação ilhada pode ser modelada do ponto de vista energético de acordo com a Equação 4.9.

$$E_i^{(g)} + E_i^{(BESS_{out})} + \mathbf{e}_i^T \mathbf{A}^T \mathbf{E}_i^{(b)} = E_i^{(c)} - E_i^{(cut)} + E_i^{(BESS_{in})} + \mathbf{e}_i^T \mathbf{A} \mathbf{E}_i^{(s)} \quad (4.8)$$

$$E_i^{(g)} + E_i^{(BESS_{out})} = E_i^{(c)} - E_i^{(cut)} + E_i^{(BESS_{in})} \quad (4.9)$$

Desta forma, ao isolar a energia gerada pela microrrede i , obtém-se a Equação 4.10.

$$E_i^{(g)} = E_i^{(c)} - E_i^{(cut)} + E_i^{(BESS_{in})} - E_i^{(BESS_{out})} \quad (4.10)$$

Considerando os custos associados à geração de energia localmente em cada microrrede, a função objetivo pode ser expressa de acordo com a Equação 4.11.

$$\mathcal{F}^{isol} = \min C_i \underbrace{\left(E_i^{(c)} - E_i^{(cut)} + E_i^{(BESS_{in})} - E_i^{(BESS_{out})} \right)}_{(I)} + \underbrace{\rho_i L_i^{cut} \Delta t}_{(II)} \quad (4.11)$$

Os termos (I) e (II) da Equação 4.11 referem-se ao custo da geração e à penalidade de corte de carga em um intervalo temporal, respectivamente. Comparando as funções multiobjetivos das operações ilhada (Eq. 4.11) e colaborativa (Eq. 4.6), pode-se observar que ambas almejam a minimização dos custos associados à geração, juntamente com a redução do corte de carga em um determinado intervalo de tempo, a fim de colaborar com o aumento dos índices de continuidade de serviço.

4.1.3 Quantificação de Resiliência

Além da minimização dos custos da operação das microrredes, busca-se também a minimização dos montantes de corte de carga, de forma a contribuir com o aumento da resiliência e confiabilidade. Como apresentado na Seção 3.3, há diversas métricas propostas na literatura para a quantificação da resiliência, considerando diversos fatores e variáveis. Neste trabalho será utilizado o quantificador de resiliência sugerido em [170], definido de acordo com a Equação 4.12:

$$\mathcal{R} = \frac{1}{L^{cut}} \quad (4.12)$$

em que \mathcal{R} representa o índice de resiliência e L^{cut} diz respeito ao corte de carga. É possível observar analiticamente que a resiliência e o corte de carga da multimicrorrede são inversamente proporcionais, isto é, quanto menor for a perda de carga, o *cluster* apresentará um maior nível de índice de resiliência. Assim, pode-se inferir então que quando $L^{cut} \rightarrow \infty$, $\mathcal{R} \rightarrow 0$; da mesma forma, quando $L^{cut} \rightarrow 0$, $\mathcal{R} \rightarrow \infty$.

4.2 Dados de Simulação

As microrredes consideradas para o estudo de caso são constituídas exclusivamente por fontes renováveis, juntamente com sistema armazenamento de energia por baterias, denominado BESS (*Battery Energy Storage System*). A escala do BESS foi escolhida baseada nos dados de carga e geração das microrredes e por questões didáticas, mas todas as conclusões obtidas podem ser estendidas para sistemas maiores.

A microrrede 1 conta com um BESS de 15 kWh de capacidade, enquanto os BESS 2 e 3 possuem 20 e 50 kWh de capacidade, respectivamente. Tais valores foram assumidos de forma a gerar uma diversidade de situações que tornem evidentes as vantagens da operação colaborativa entre microrredes. A Tabela 4.1 apresenta a capacidade

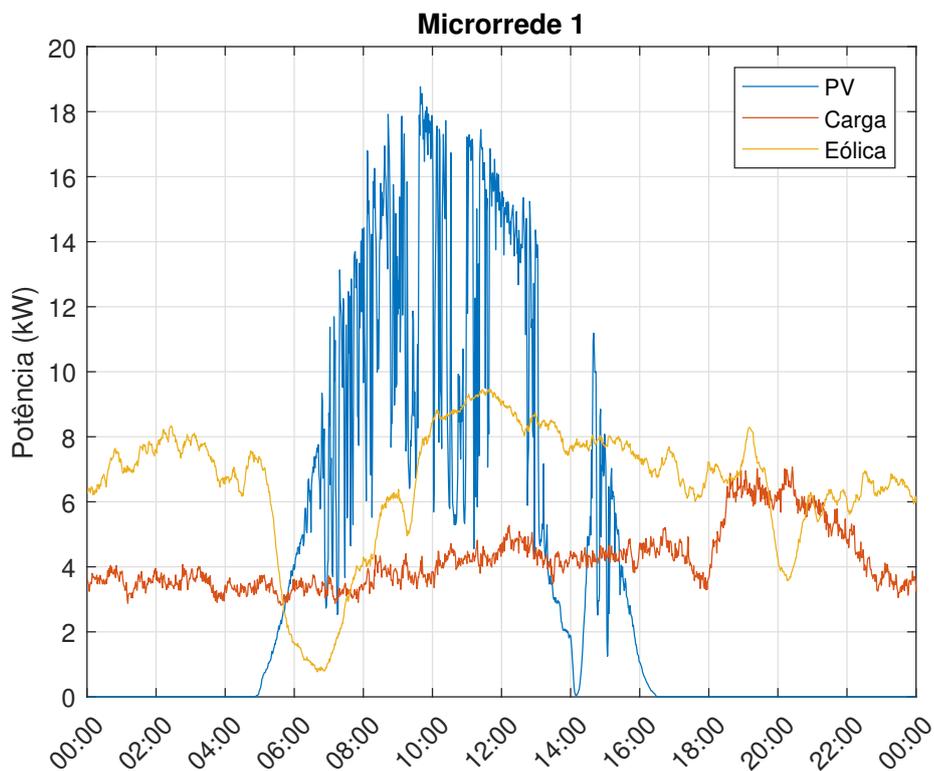
instalada em cada microrrede. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam o comportamento da demanda e da geração das microrredes utilizadas na simulação em um dia de maior geração na microrrede 1, dia de baixa geração na microrrede 2 e dia típico na microrrede 3, considerando o período de um dia e com amostragem de 1 minuto.

Tabela 4.1 – Capacidade instalada em cada microrrede.

Microrrede	Fotovoltaico (kWp)	Eólico (kW)	BESS (kW/kWh)	Demanda Máxima (kW)*
1	16,5	12,0	15/15	7,065
2	31,5	0,0	20/20	14,37
3	14,0	12,0	50/50	10,598

*No dia analisado.

Figura 4.1 – Comportamento da demanda e geração para a microrrede 1.



A microrrede 2 é composta exclusivamente pela fonte fotovoltaica e sua capacidade instalada é capaz de entregar mais potência do que apresentado na Figura 4.2. Entretanto, por ser uma fonte intermitente, há a possibilidade da geração cair drasticamente em dias mais nublados. Assim, a fim de simular um cenário de déficit energético na microrrede 2, foi selecionado o pior dia da geração renovável no período considerado, em que a fonte fotovoltaica não conseguiu entregar potência o suficiente para o atendimento à carga.

A presença da geração eólica nas microrredes 1 e 3 traz mais segurança operativa para a operação das microrredes. Como a fonte fotovoltaica gera energia apenas em

Figura 4.2 – Comportamento da demanda e geração para a microrrede 2.

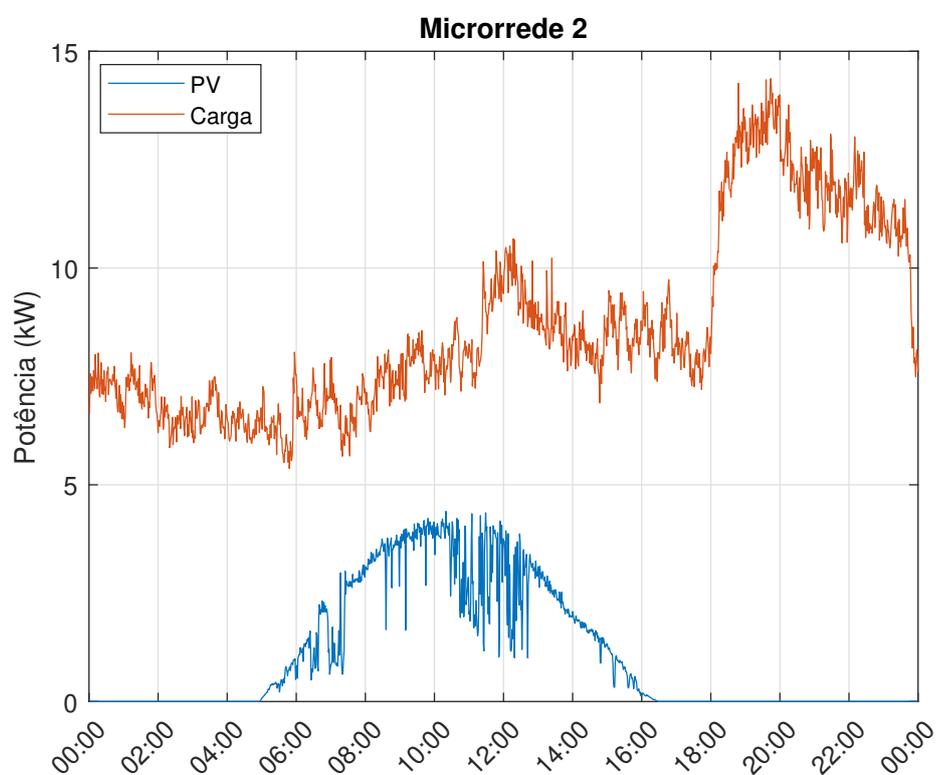
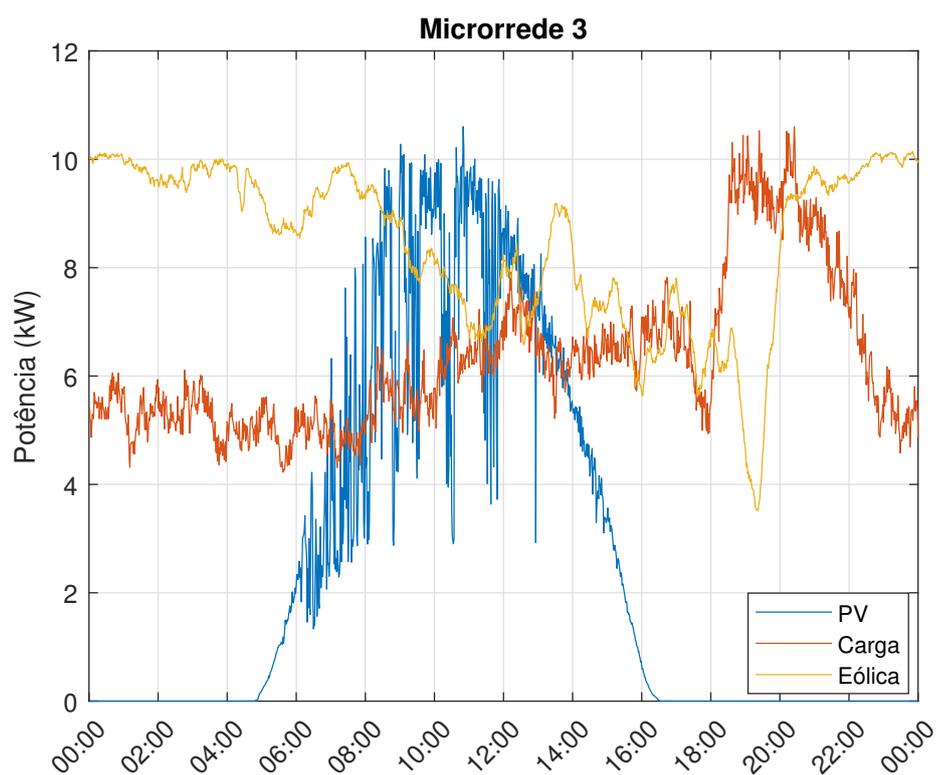


Figura 4.3 – Comportamento da demanda e geração para a microrrede 3.

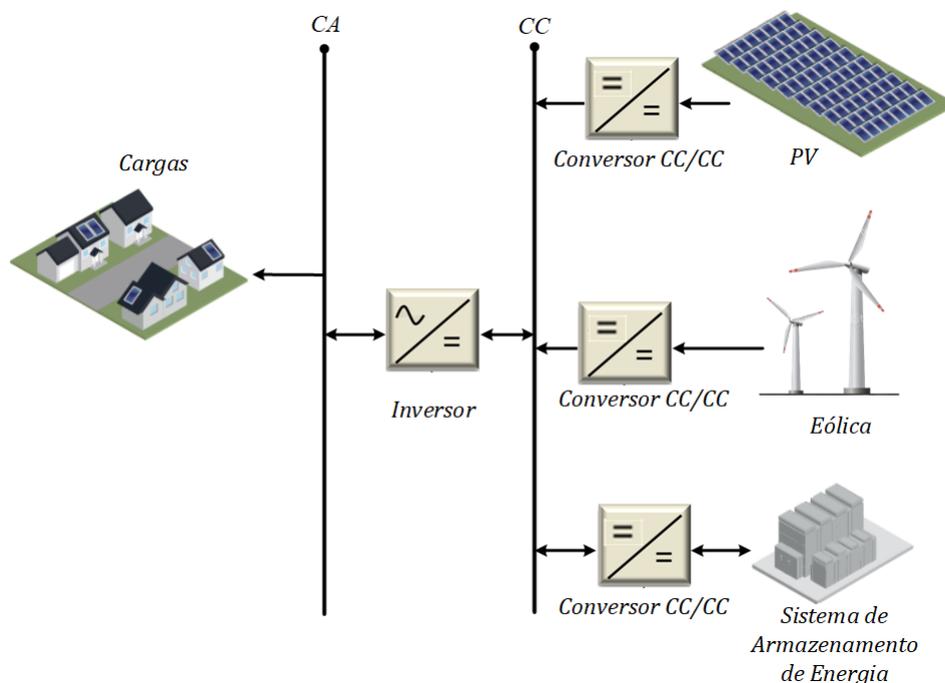


um período específico do dia, a fonte eólica se encarrega de garantir o fornecimento de energia às cargas nos períodos de indisponibilidade fotovoltaica. Já no período em que ambas estão gerando simultaneamente, há a possibilidade do armazenamento da geração excedente no BESS e, caso este esteja completamente carregado, a venda de energia para a rede ou para microrredes vizinhas, no caso da operação colaborativa, juntamente com a possibilidade de comercialização da energia contida nos sistemas de armazenamento.

4.3 Configuração Física das Microrredes

A configuração básica das conexões das microrredes simuladas em operação isolada é apresentada na Figura 4.4, sendo composta pelas fontes eólica e fotovoltaica, com exceção da microrrede 2, que apresenta apenas a fonte fotovoltaica. Há a presença de dois barramentos, sendo um CC e outro CA, interligados entre si através de um inversor. O *link* desempenhado pelo inversor possibilita que as fontes, localizadas na barra CC, possam alimentar as cargas, que costumemente funcionam em CA. Além disso, todos os equipamentos de geração se conectam ao barramento CC através de um conversor CC/CC.

Figura 4.4 – Diagrama de conexão das microrredes simuladas em operação isolada.



4.3.1 Modelagem Matemática das Fontes

A modelagem matemática utilizada possui a finalidade de descrever o comportamento das fontes presentes nas microrredes. Os dados de geração eólica utilizados

são dados da operação real do subsistema norte do SIN (Sistema Interligado Nacional) com escala reduzida em 40 vezes para o caso tratado nesta dissertação. Já a geração fotovoltaica foi obtida através de dados de medição de irradiância no período de um ano, em que o valor da potência de saída foi estimada segundo a Equação 4.13:

$$PV_{out} = P_{PV,N} f_{PV} \left(\frac{G(t)}{1 \text{ kW/m}^2} \right) [1 + \alpha(T_C - T_{STC})] \quad (4.13)$$

em que PV_{out} é a potência de saída do arranjo fotovoltaico; $P_{PV,N}$ é a potência nominal do arranjo fotovoltaico; f_{PV} é o fator de redução da geração, representando perdas naturais na eficiência dos painéis; $G(t)$ é a irradiância solar no instante t ; α é o coeficiente de temperatura dos painéis; T_C é a temperatura no painel e T_{STC} é a temperatura de operação nominal.

Caso a disponibilidade de geração seja insuficiente para atender toda a carga na operação ilhada, será necessária então a complementação da geração por meio da energia armazenada no BESS. A potência de entrada do BESS pode ser estimada através da Equação 4.14:

$$P_{i,BESS_{in}}(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } SOC_i^{max} \leq SOC_i \leq SOC_i^{min} \\ (PV_i(t) + WT_i(t)) - L_i(t), & \text{se } SOC_i^{min} < SOC_i < SOC_i^{max} \end{cases} \quad (4.14)$$

sujeito a

$$\begin{cases} SOC_i^{min} \leq SOC_i \leq SOC_i^{max} \\ PV_i^{min} \leq PV_i \leq PV_i^{max} \\ WT_i^{min} \leq WT_i \leq WT_i^{max} \end{cases} \quad (4.15)$$

A potência na entrada do BESS será determinada pelas potências de geração eólica e fotovoltaica e também pela carga demandada. Analisando as possibilidades, temos as seguintes situações:

- $P_{i,BESS_{in}} < 0$: esta situação ocorre quando a diferença entre carga e geração é positiva, isto é, há déficit de geração ($L_i(t) - (PV_i(t) + WT_i(t)) > 0$), indicando que $L_i(t) > (PV_i(t) + WT_i(t))$. Neste caso, a potência disponível pelas fontes ($PV_i(t) + WT_i(t)$) é menor que o necessário para manter o balanço carga-geração. Deste modo, o BESS será o responsável pelo fechamento do balanço de potência, sendo o seu montante calculado de acordo com a Equação 4.14. A convenção do sinal negativo se dá devido ao descarregamento do BESS.
- $P_{i,BESS_{in}} = 0$: decorre da impossibilidade do sistema de armazenamento absorver ou liberar energia. Esta situação é ocasionada quando há energia disponível

para o carregamento do BESS, mas não há mais capacidade para armazená-la, transformando-a em energia vertida ou comercializada (quando possível), como também quando o BESS está com SOC mínimo e não é capaz de liberar energia para o sistema.

- $P_{i,BESS_{in}} > 0$: neste caso, $L_i(t) - (PV_i(t) + WT_i(t)) < 0$ e $L_i(t) < (PV_i(t) + WT_i(t))$, isto é, a geração disponível é suficiente para alimentar toda a carga demandada, existindo ainda um excedente de geração disponível que poderá ser utilizado para o carregamento do BESS ou para comercialização, podendo ser calculado por meio da Equação 4.14. O sinal positivo da potência de entrada do BESS indica o carregamento do BESS.

Desta forma, pode-se observar que as microrredes, além das fontes de geração renovável, também possuem sistemas de armazenamento de energia a fim de melhorar sua segurança operativa, devido às incertezas associadas aos recursos naturais responsáveis pela geração de energia, como a irradiação solar e a velocidade dos ventos.

4.4 Operação das Microrredes

Para a operação das microrredes, foram simulados dois períodos de operação ilhada com duração de seis hora cada. É considerada a operação ilhada durante todo o período de simulação, buscando entender de que forma a operação colaborativa pode ser benéfica. Para análise do desempenho da operação das MRs, foi observado o valor do corte de carga durante a simulação, bem como geração total no mesmo período.

4.4.1 Operação no Caso Base

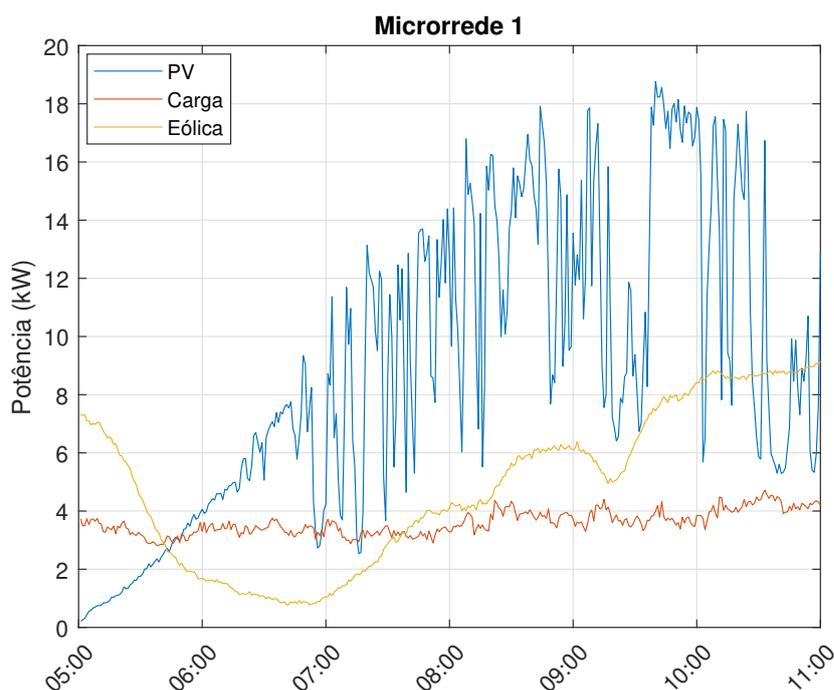
Nesta subseção serão analisados os desempenhos individuais de cada microrrede em operação ilhada, denominada nesta dissertação como **Caso Base**. Em uma Seção posterior será avaliado o desempenho em operação conjunta, a fim de avaliar os benefícios da operação colaborativa de microrredes. São considerados diferentes intervalos horários com duração de seis horas a fim de simular operação ilhada devido à ocorrência de alguma falta na rede principal. Os períodos simulados foram das 5h às 11h e das 14h às 20h.

4.4.1.1 Microrrede 1

A Figura 4.5 apresenta o perfil de geração e da carga da microrrede 1. É possível observar durante a operação ilhada que a disponibilidade de geração é maior que a demanda em todos os instantes t . Assim, considerando que no instante inicial t_0 o BESS está completamente carregado, haverá uma quantidade significativa de energia vertida,

pois há excesso de energia e não há onde alocá-la. Em um modelo de rede que seja possível a exportação de energia por parte da microrrede, o seu sobredimensionamento se justifica através do potencial de geração de receita através da venda de energia. A Figura 4.6 apresenta graficamente a potência vertida ao longo do período de operação ilhada, enquanto a Figura 4.7 apresenta o SOC do sistema de armazenamento.

Figura 4.5 – Potências instantâneas na microrrede 1 no período de operação entre 5h e 11h.



Quando se observa o comportamento do SOC do BESS 1 no período de operação ilhada (vide Fig. 4.7), é possível entender com mais clareza acerca da potência vertida apresentada na Figura 4.6. Uma vez que o BESS está completamente carregado, todo o excedente de geração, que pode ser observado na Figura 4.5, é transformado em potência vertida, uma vez que não há onde alocar este excesso, caracterizando uma perda de oportunidade de venda da energia excedente.

Do ponto de vista energético, foi analisada quantitativamente a energia gerada pelas fontes fotovoltaica e eólica, bem como a quantidade de corte de carga (se houver) e também a energia vertida. Omitindo-se as perdas, a Figura 4.8 apresenta o balanço energético da MR1 durante o período de operação isolada, utilizando amostragem de 15 minutos, onde é possível observar a contribuição de energia de cada fonte e do sistema de armazenamento. Para o BESS foi adotada a convenção do sinal negativo para o descarregamento do banco e positivo para o carregamento. Entretanto, para exposição gráfica, adotou-se a convenção de que o sinal negativo indica consumo e/ou desperdício de energia da microrrede, como no caso do carregamento do BESS ou energia vertida.

Figura 4.6 – Potência instantânea vertida na microrrede 1 no período de operação entre 5h e 11h .

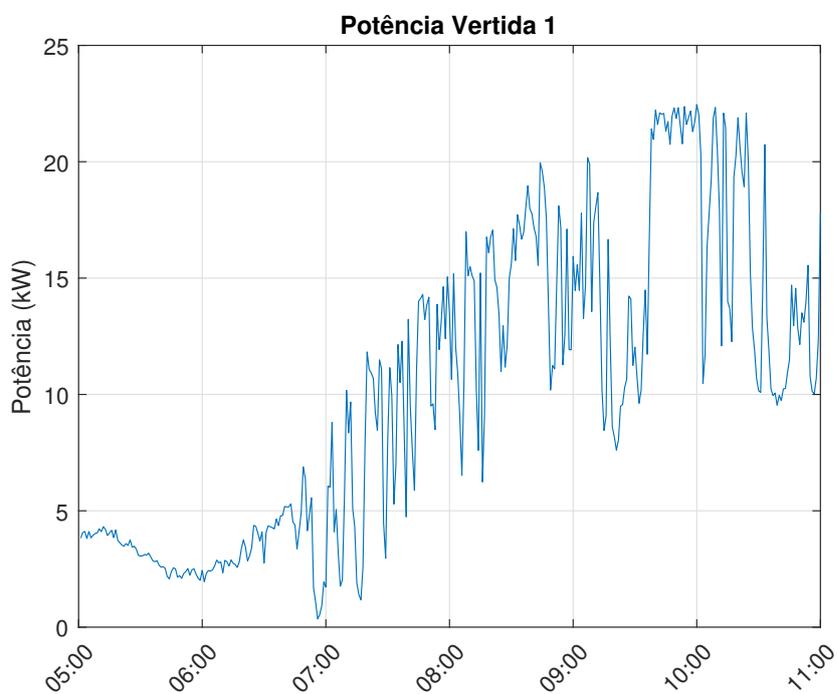


Figura 4.7 – SOC do BESS 1 no período de operação entre 5h e 11h.

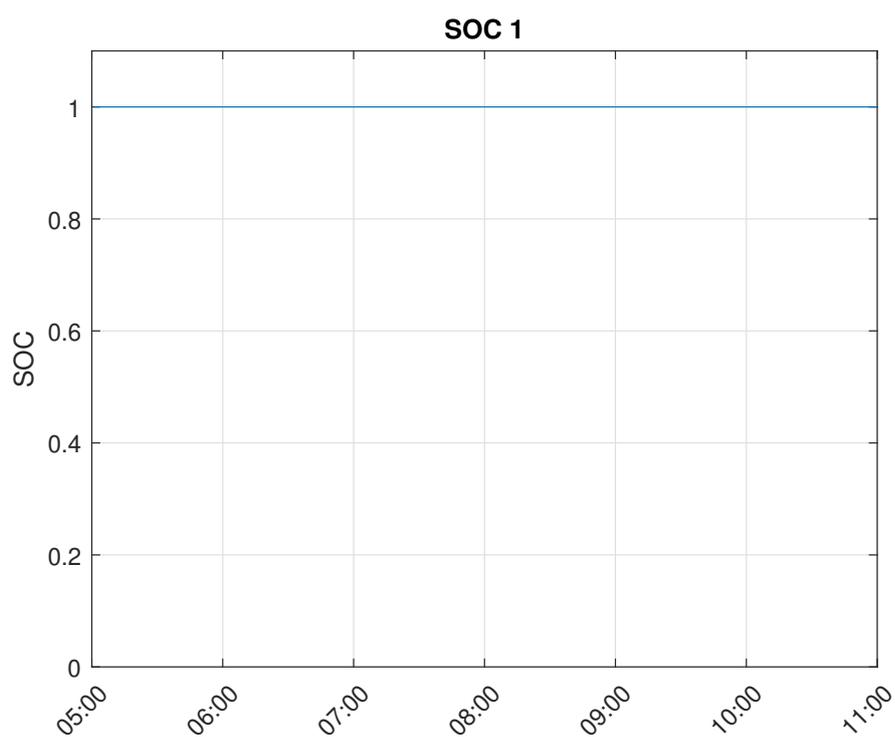
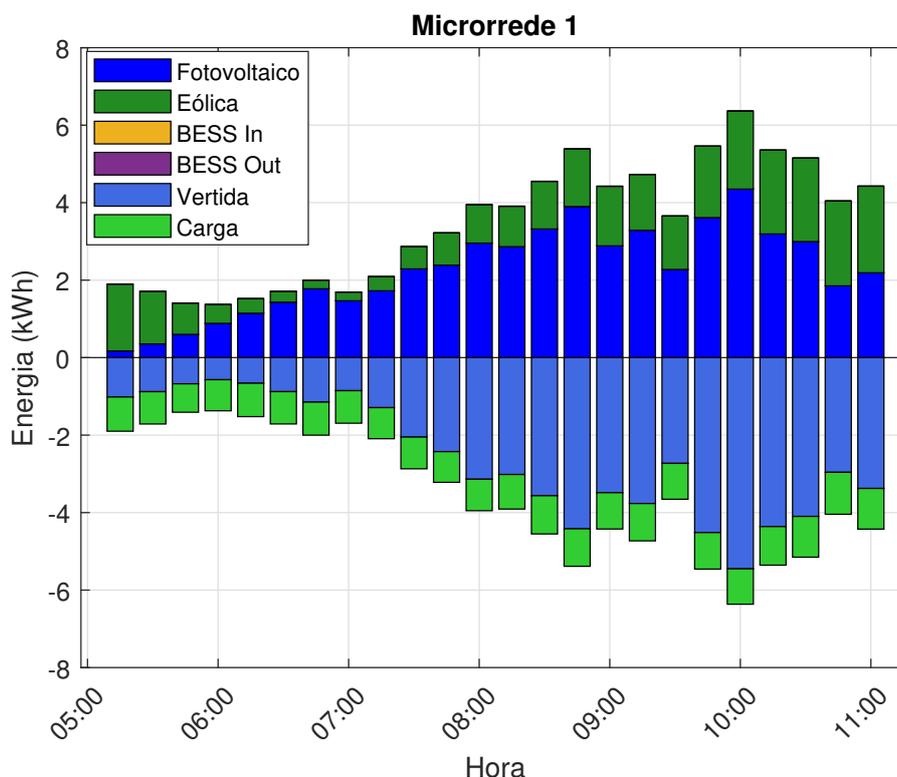


Figura 4.8 – Balanço energético da microrrede 1 no período de operação entre 5h e 11h.



Na Figura 4.8 é possível observar que não há energia fornecida ou armazenada pelo BESS, uma vez que se considerou o banco completamente carregado no início do período de simulação. As fontes de geração atendem a carga em todos os pontos do intervalo de operação, não houve a necessidade do fornecimento de energia pelo BESS. Além disso, por estar completamente carregado, o BESS não foi capaz de absorver o excesso de geração presente em diversos instantes. Por conta disso, o excesso de geração se transformou em energia vertida, uma vez que não pôde ser aproveitado. A Tabela 4.2 apresenta, de forma dividida, os valores de energia fornecida, consumida, armazenada e vertida da microrrede 1 em operação ilhada durante o período compreendido das 5h às 11h. Os montantes de energia fornecida e consumida/armazenada apresentam o balanço de potência na operação da microrrede, enquanto a energia vertida é apresentada separadamente do balanço, uma vez que ela não é processada pelos conversores.

Uma vez que a geração total disponível foi superior à carga durante todo o período analisado e por conta de o sistema de armazenamento estar completamente carregado, todo o excesso de geração, tanto fotovoltaica quanto eólica, será energia vertida. Como apresentado na Tabela 4.2, o montante de energia vertida proveniente da geração fotovoltaica foi 3,47 vezes maior que aquela advinda da fonte eólica. Tal fato se deve ao intervalo horário analisado, uma vez que a irradiação solar está disponível durante todo o período estudado, contribuindo para a alta presença da fonte fotovoltaica na geração de energia.

Tabela 4.2 – Resumo energético da microrrede 1 entre às 5h e 11h.

Descrição	Energia Gerada (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	53,9093	65,02
Geração Eólica	28,9995	34,98
Total	82,9088	100,00
Descrição	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	6,2996	29,18
Geração Eólica	15,2871	70,82
BESS Out	0,0	0,0
Total	21,5867	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	21,5867	-
Carga Atendida	21,5867	100,00
Corte de Carga	0,0	0,0
BESS In	0,0	0,0
Total	21,5867	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	47,6097	77,64
Geração Eólica	13,7124	22,36
Total	61,3221	100,00

A Figura 4.9 apresenta o comportamento da potência instantânea da carga e da geração, considerando agora a operação ilhada compreendida no intervalo das 14h às 20h. Esse intervalo temporal de simulação torna-se interesse de análise uma vez que a geração fotovoltaica torna-se indisponível por volta das 17h. Para a microrrede em questão, não ocasionou nenhum tipo de problema no atendimento às cargas, devido à disponibilidade da geração eólica. Como é possível observar graficamente, a curva da geração eólica permaneceu superior à curva de demanda em quase todo o período de operação, gerando excedente de energia produzida.

A Figura 4.10 apresenta o SOC do BESS 1 em um patamar constante, indicando que não houve fornecimento ou armazenamento de energia por parte do sistema de armazenamento, visto que a geração se manteve superior à carga em todo o período

Figura 4.9 – Potências instantâneas na microrrede 1 no período de operação entre 14h e 20h.

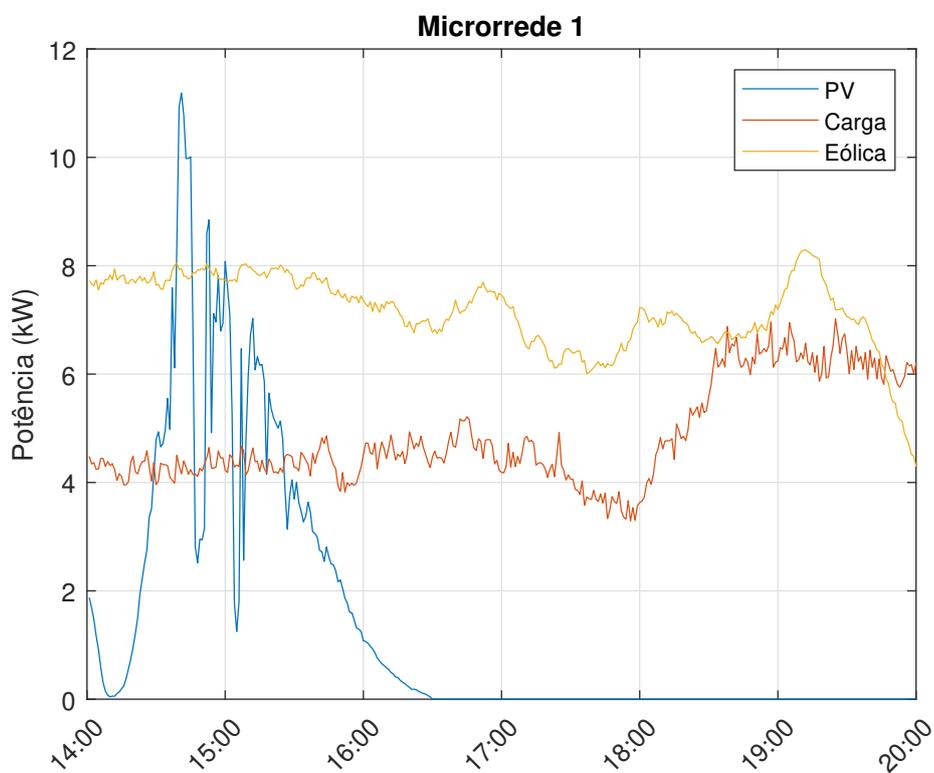
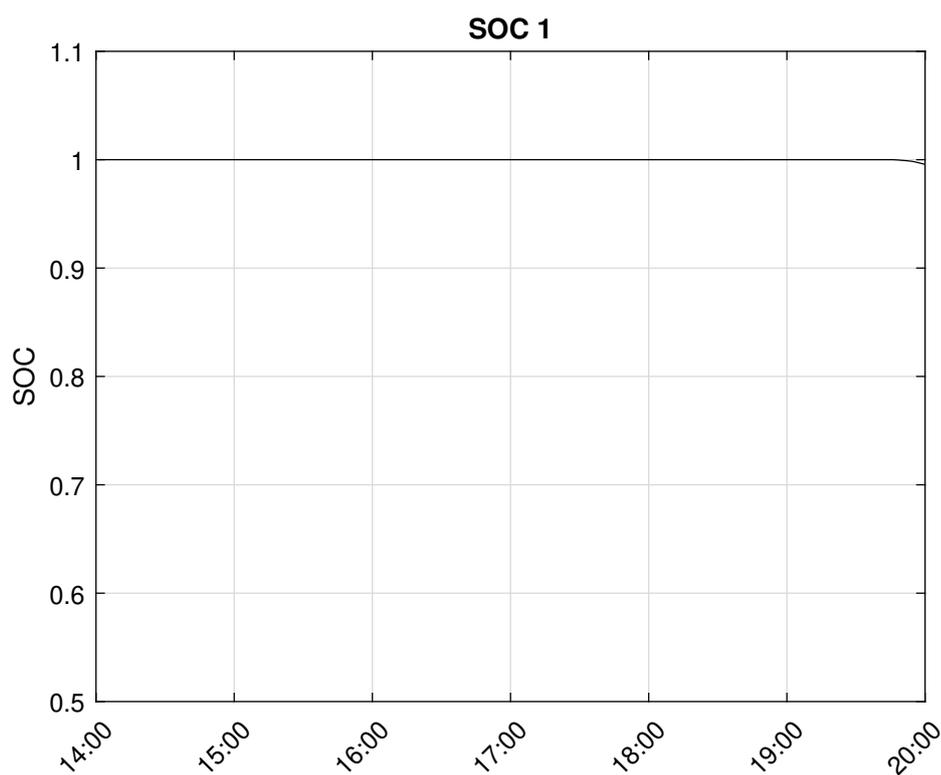
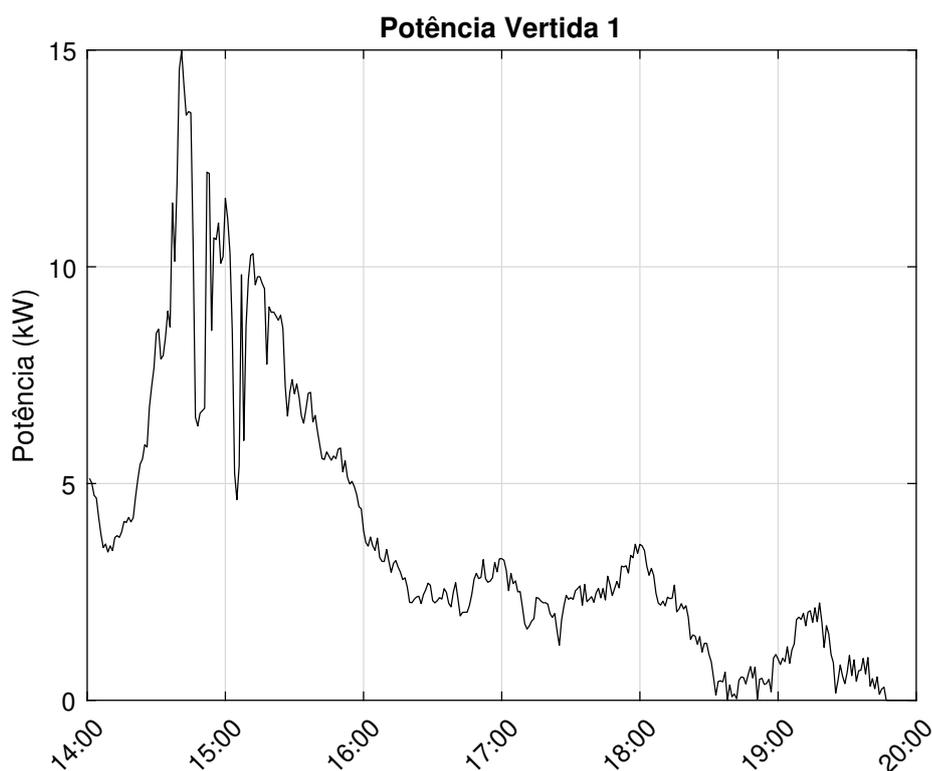


Figura 4.10 – SOC do BESS 1 no período de operação ilhada das 14h às 20h.



simulado. Por considerar que o sistema de armazenamento estava completamente carregado no início da operação ilhada e não houve a necessidade do fornecimento de energia por parte deste, todo o excedente de geração não havia como ser alocado, gerando assim montantes de energia vertida. Nesse contexto, a Figura 4.11 apresenta a potência instantânea vertida durante o período estudado.

Figura 4.11 – Potência instantânea vertida na microrrede 1 no período de operação ilhada das 14h às 20h.



Do ponto de vista energético, a Figura 4.12 apresenta o balanço energético no período de operação isolada. O quantitativo de energia em todas as horas de operação indica que, mesmo com a ausência da geração FV, a microrrede foi capaz de manter o atendimento às cargas por meio da geração eólica. Além de atender a demanda, houve também a presença de energia vertida. Tal fato indica um sobredimensionamento da microrrede, uma vez que esta foi capaz de atender 100% de sua demanda utilizando apenas uma de suas fontes durante o intervalo estudado.

Em termos quantitativos, a Tabela 4.3 apresenta o resumo energético da microrrede 1 entre às 14h e 20h. É possível perceber que não há a presença de corte de carga e um alto percentual de energia vertida. Devido ao horário, ocorreu a indisponibilidade da fonte fotovoltaica, mas é a geração eólica foi capaz de suprir praticamente toda a demanda no período avaliado. Nos momentos em que houve uma pequena queda na geração eólica, o BESS foi responsável pelo fechamento do balanço de potência da microrrede.

Figura 4.12 – Balanço energético da microrrede 1 no período de operação ilhada das 14h às 20h.

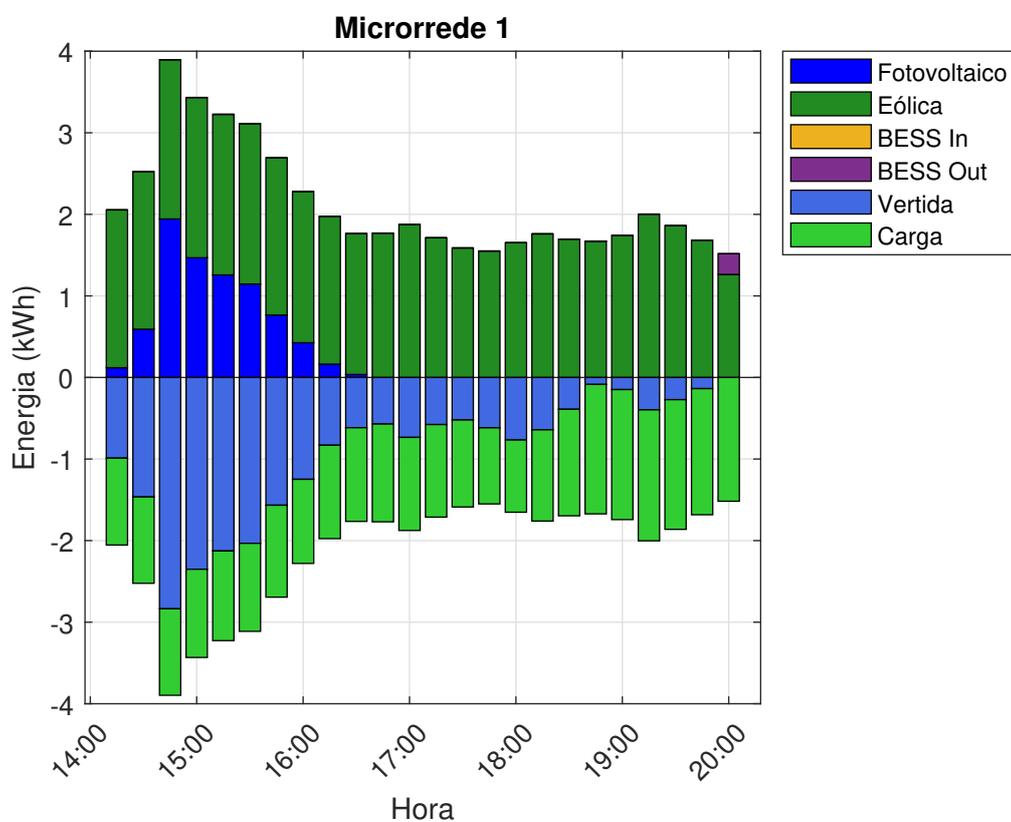


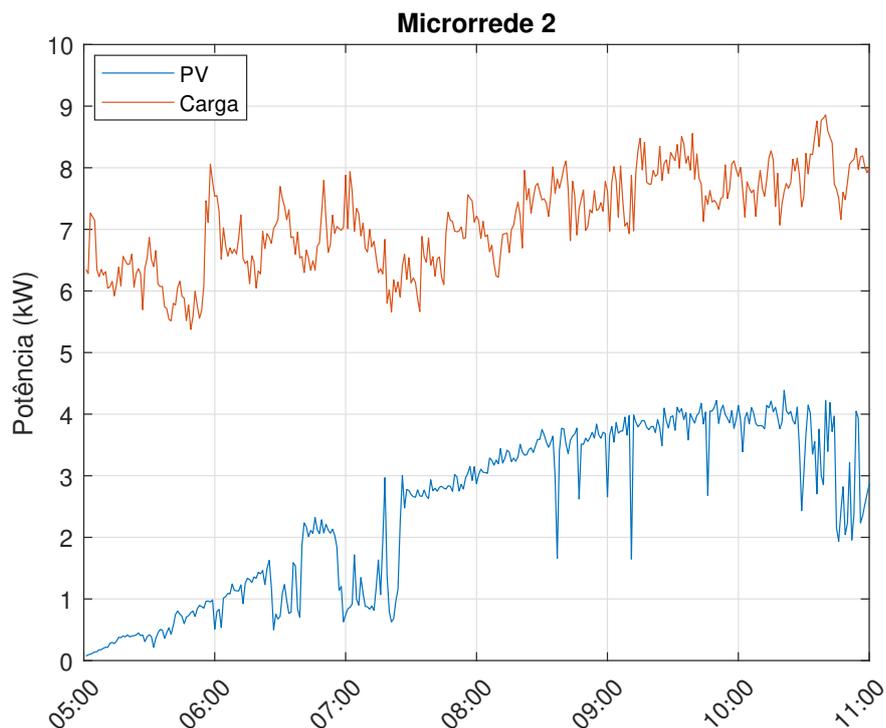
Tabela 4.3 – Resumo energético da microrrede 1 entre às 14h e 20h.

Descrição	Energia Gerada (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	7,9168	15,59
Geração Eólica	42,8704	84,41
Total	50,7872	100,00
Descrição	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	5,2479	18,02
Geração Eólica	23,6201	81,10
BESS Out	0,2561	0,88
Total	29,1242	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	29,1242	-
Carga Atendida	29,1242	100,00
Corte de Carga	0,0	0,0
BESS In	0,0	0,0
Total	29,1242	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	2,6689	12,18
Geração Eólica	19,2503	87,82
Total	21,9192	100,00

4.4.1.2 Microrrede 2

Dentre os sistemas simulados, a microrrede 2 é a única composta somente por um único tipo de fonte, neste caso, a fotovoltaica. Por conta disso, possui menos segurança operativa quando comparada às outras duas microrredes. Devido à essa dependência da fonte fotovoltaica, a possibilidade de dias com baixa produção fotovoltaica afeta fortemente a resiliência da microrrede. Assim, selecionou-se um dia com baixa produção da fonte fotovoltaica para simular como se comportaria a microrrede em uma situação de falta da rede principal. Na Figura 4.13 é apresentado o comportamento da carga e da geração na microrrede 2 no período de operação isolada, onde é possível observar que a disponibilidade de geração está abaixo da demanda durante todo o período, dependendo do sistema de armazenamento para o atendimento às cargas. A Figura 4.14 apresenta o comportamento do corte de carga e a Figura 4.15 apresenta o SOC do BESS 2.

Figura 4.13 – Potências instantâneas na microrrede 2 no período de operação entre 5h e 11h.



Quando se analisa simultaneamente os gráficos das Figuras 4.14 e 4.15, é possível observar que o corte de carga começa a ser executado a partir do momento em que o BESS não possui mais capacidade energética para realizar o fechamento do balanço de potência da microrrede.

Figura 4.14 – Corte de carga instantâneo na microrrede 2 na operação ilhada entre às 5h e 11h.

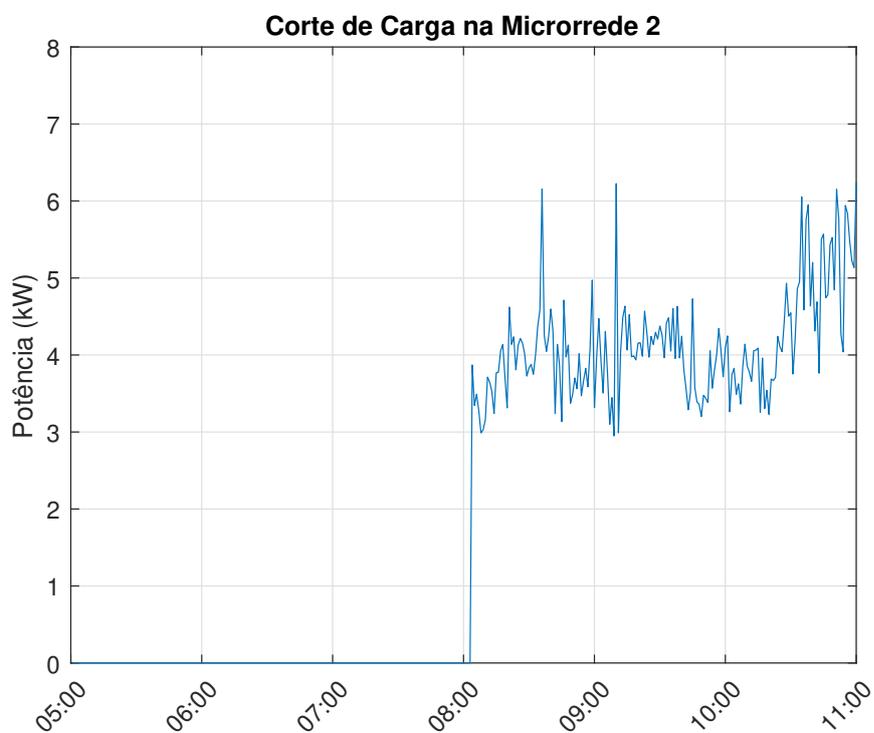
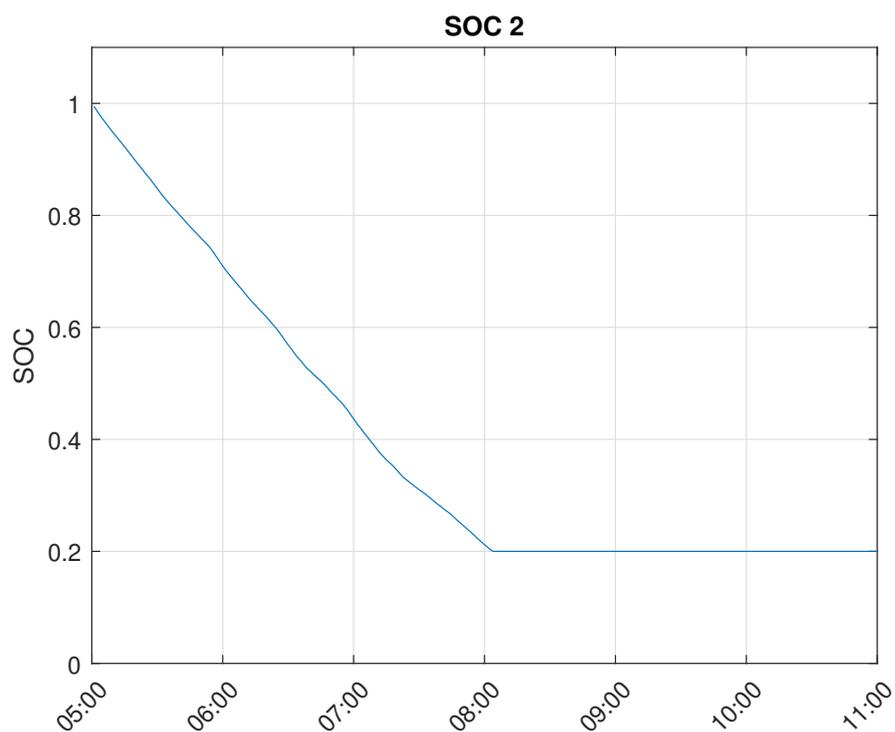
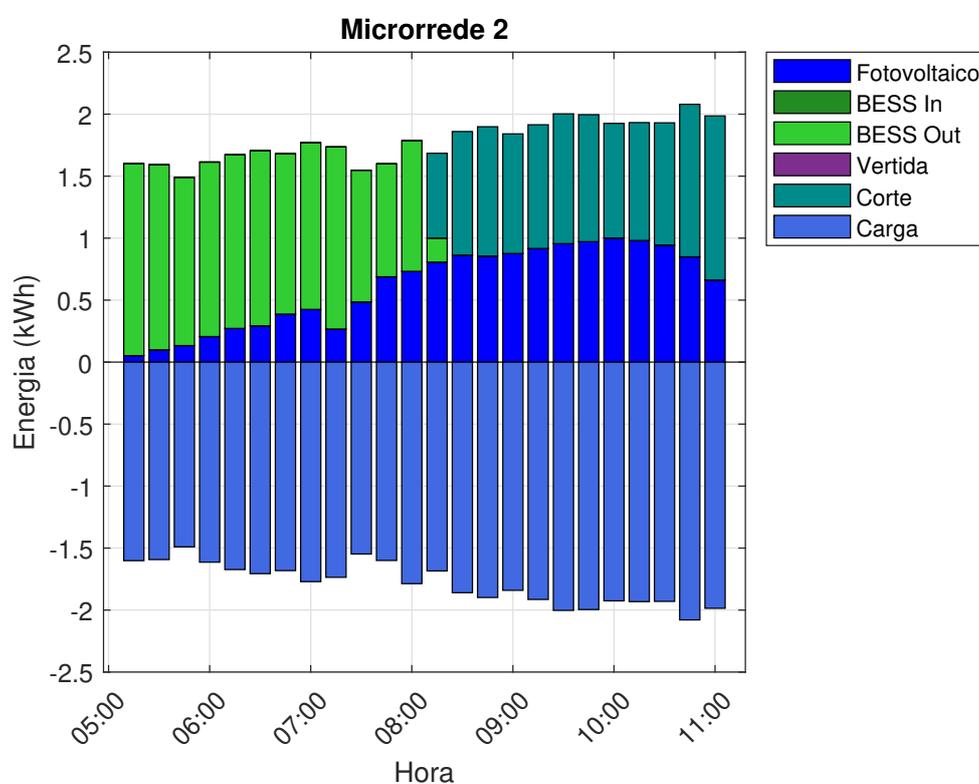


Figura 4.15 – SOC do BESS 2 na operação ilhada entre às 5h e 11h.



Do ponto de vista energético, a Figura 4.16 apresenta o balanço energético da microrrede 2 no período das 5h às 11h. Graficamente, é possível observar o aumento da energia proveniente da fonte fotovoltaica ao decorrer das horas, devido à característica de aumento gradativo da potência fornecida pela fonte fotovoltaica no início da manhã, atingindo seu ponto máximo por volta das 12h. Por conta da operação isolada e da sua dependência de um único tipo de fonte, a microrrede 2 apresenta segurança operativa reduzida quando comparada às duas outras microrredes. Por conta disso, o sistema de armazenamento, em nenhum instante do período considerado, pôde ser recarregado, uma vez que não houve excesso de geração.

Figura 4.16 – Balanço energético da microrrede 2 na operação ilhada entre às 5h e 11h.



A Tabela 4.4 apresenta os dados de energia referentes à operação da microrrede 2 no período compreendido entre às 5h e 11h. Além da operação acontecer em um período de indisponibilidade fotovoltaica, o montante de produção a partir dos painéis neste dia foi mais baixo que a média, ocasionando ainda mais desafios. Assim, durante o período, o BESS foi responsável por fornecer a energia necessária para o atendimento das cargas enquanto havia energia disponível. Contudo, devido às limitações de sua capacidade e por conta da ausência de excedente de energia (ou de uma fonte despachável) para a realização do carregamento do sistema de armazenamento, houve instantes que foi necessária a realização do corte de carga.

Tabela 4.4 – Resumo energético da microrrede 2 no período das 5h às 11h.

Descrição	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	14,7192	47,98
BESS Out	15,9554	52,02
Total	30,6746	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	42,8483	-
Carga Atendida	30,6746	71,59*
Corte de Carga	12,1736	28,41*
Total	30,6746	100,00**
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	0,0	0,0
Total	0,0	0,0

*Em relação à demanda total;

**Total consumido pela microrrede.

Considerando o período das 14h às 20h, a Figura 4.17 apresenta o comportamento instantâneo das potências de geração e carga. Por depender exclusivamente de uma fonte que gera energia apenas em determinado período do dia, a microrrede 2 fica mais vulnerável nos períodos noturnos. Assim, como é possível observar através da Figura 4.17, praticamente não há geração disponível para o atendimento à demanda. A Figura 4.18 apresenta o comportamento da potência de corte.

Mesmo com a indisponibilidade de geração em quase todo o período de operação ilhada, o corte de carga começa apenas pouco após às 16h. Tal fato se deve à capacidade do BESS, que tinha energia suficiente para fechar o balanço de potência da microrrede até certo ponto. A partir do momento em que o sistema de armazenamento atingiu o SOC_{min} (vide Fig. 4.19) e não houve geração suficiente para o seu carregamento, a microrrede foi obrigada a cortar carga, como pode ser observado através do balanço energético apresentado na Figura 4.20. Por fim, é apresentado o resumo energético da operação da microrrede 2 no período entre às 14h e 20h na Tabela 4.5.

Figura 4.17 – Comportamento da microrrede 2 na operação ilhada entre 14h e 20h.

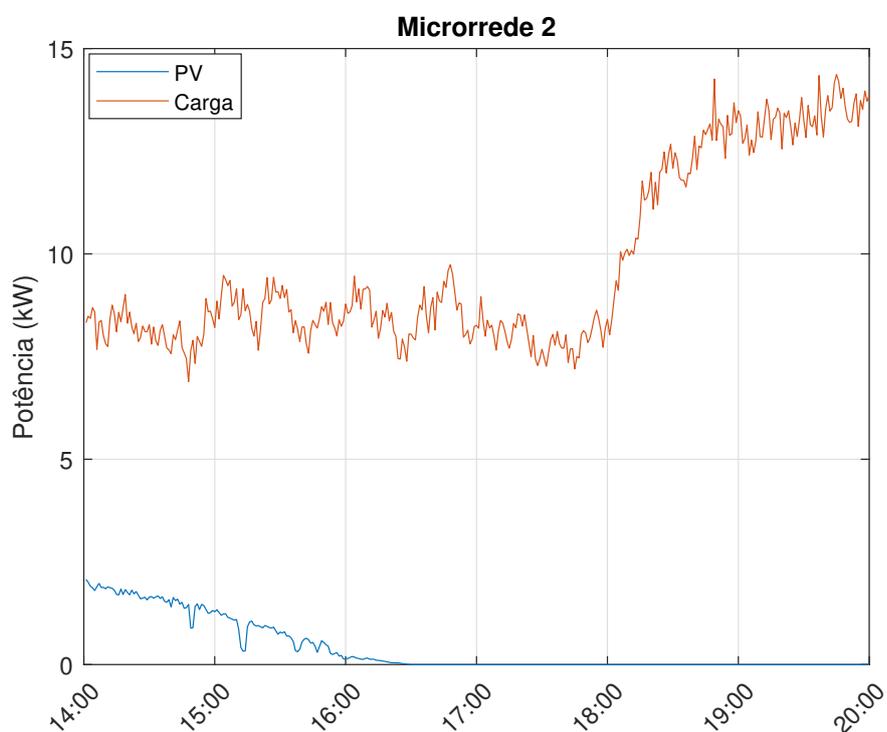


Figura 4.18 – Corte de carga instantâneo na microrrede 2 na operação ilhada entre 14h e 20h.

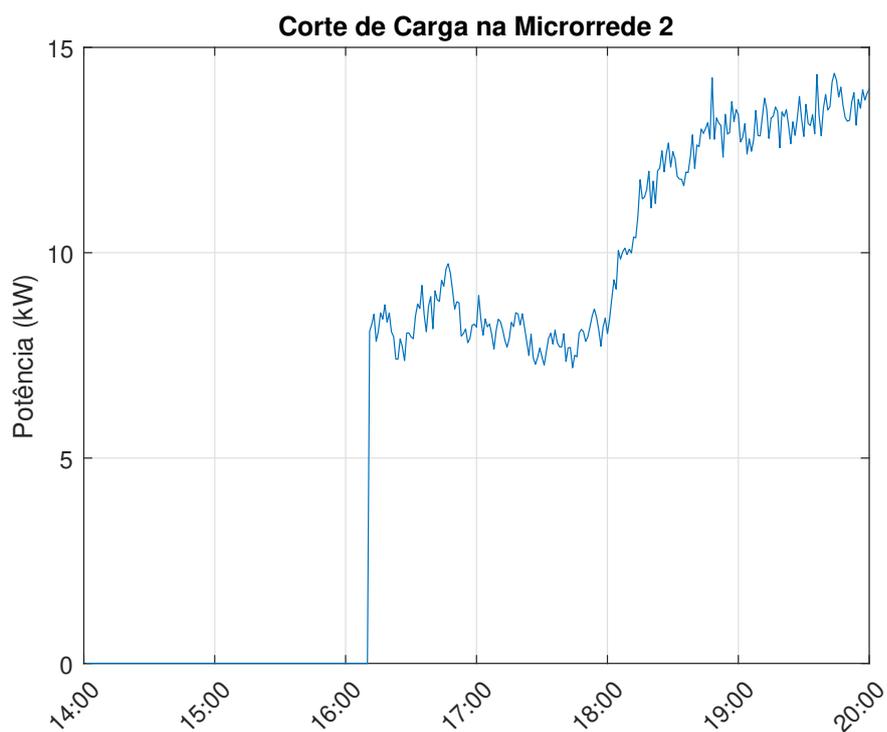


Figura 4.19 – SOC do BESS 2 na operação ilhada entre às 14h e 20h.

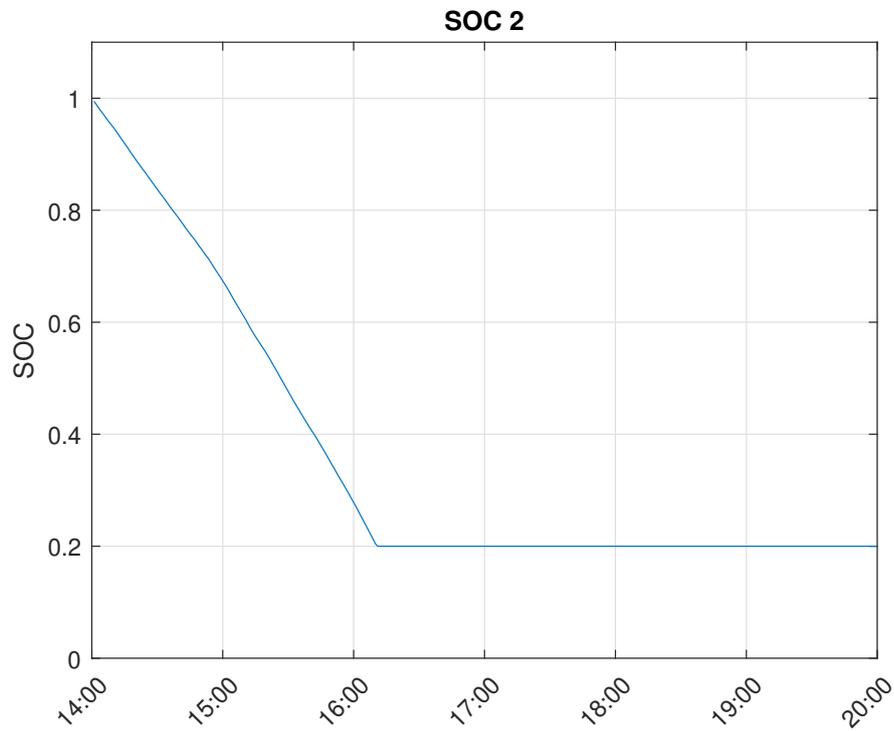


Figura 4.20 – Balanço energético da microrrede 2 na operação ilhada entre às 14h e 20h.

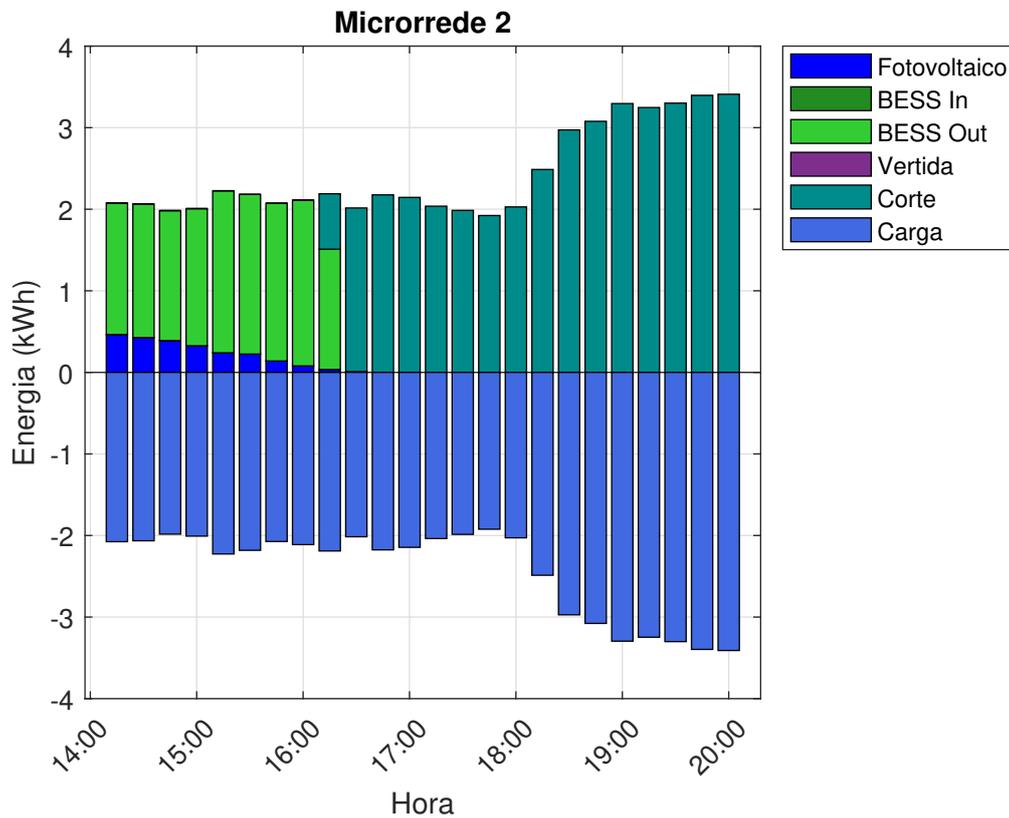


Tabela 4.5 – Resumo energético da microrrede 2 no período das 14h às 20h.

Descrição	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	2,3321	12,78
BESS Out	15,9114	87,22
Total	18,2435	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	58,4127	-
Carga Atendida	18,2435	31,23*
Corte de Carga	40,1692	68,77*
Total	18,2435	100,00**
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	0,0	0,0
Total	0,0	0,0

*Em relação à carga total;

**Total consumido pela microrrede.

4.4.1.3 Microrrede 3

Semelhante à microrrede 1, a microrrede 3 também apresenta as fontes fotovoltaica e eólica na sua composição. A Figura 4.21 apresenta o comportamento da potência instantânea de geração e carga no período das 05h às 11h.

Similarmente à microrrede 1, a microrrede 3 não apresentou corte de carga, uma vez que a curva da geração eólica apresentou superioridade sobre a curva de carga em todos os instantes da operação isolada, não sendo necessária a utilização do BESS para o fechamento do balanço de potência. Caso a microrrede fosse composta exclusivamente pela fonte fotovoltaica, como no caso da microrrede 2, seria necessária a utilização do sistema de armazenamento, pois ocorreram flutuações em que a demanda ficou maior do que a carga. A Figura 4.22 apresenta o SOC do BESS 3 durante a operação isolada.

Devido a geração ser superior à carga em todo o período de operação, não há a necessidade do BESS realizar o fechamento do balanço de potência. Assim o BESS permanece com SOC máximo durante todo o período de simulação, como pode ser observado na Figura 4.22. Entretanto, por conta do BESS estar completamente carregado, o excesso de geração durante o período de operação se transforma em energia vertida, uma vez que não há carga a ser atendida ou local onde armazená-la. A Figura 4.23 apresenta o gráfico da potência instantânea vertida e a Figura 4.24 apresenta o balanço energético da operação da microrrede 3.

Figura 4.21 – Comportamento da microrrede 3 na operação ilhada entre às 5h e 11h.

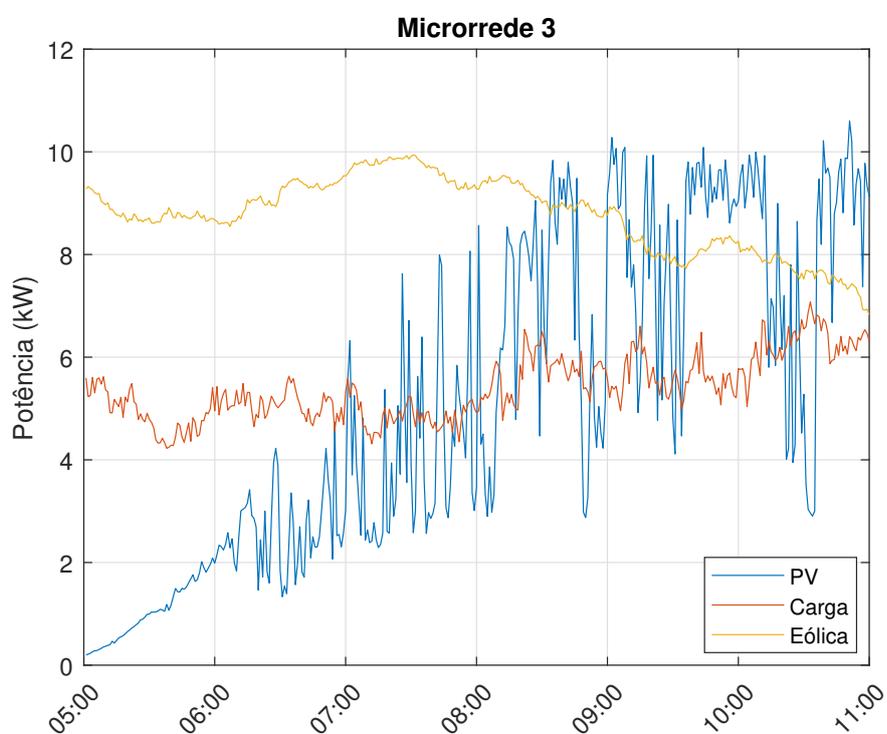


Figura 4.22 – SOC do BESS da microrrede 3 na operação isolada entre às 5h e 11h.

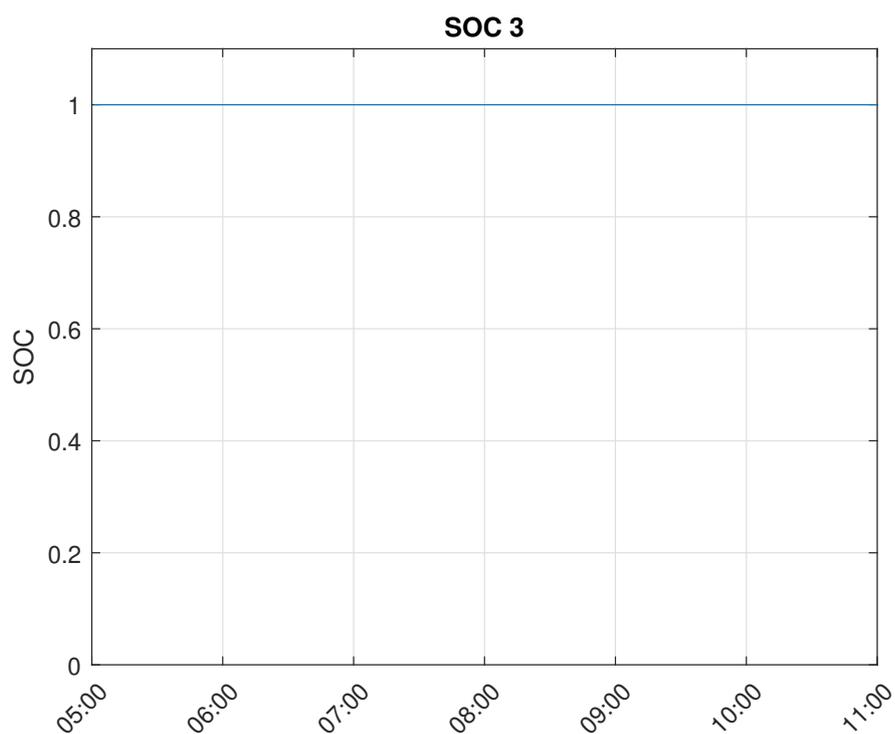
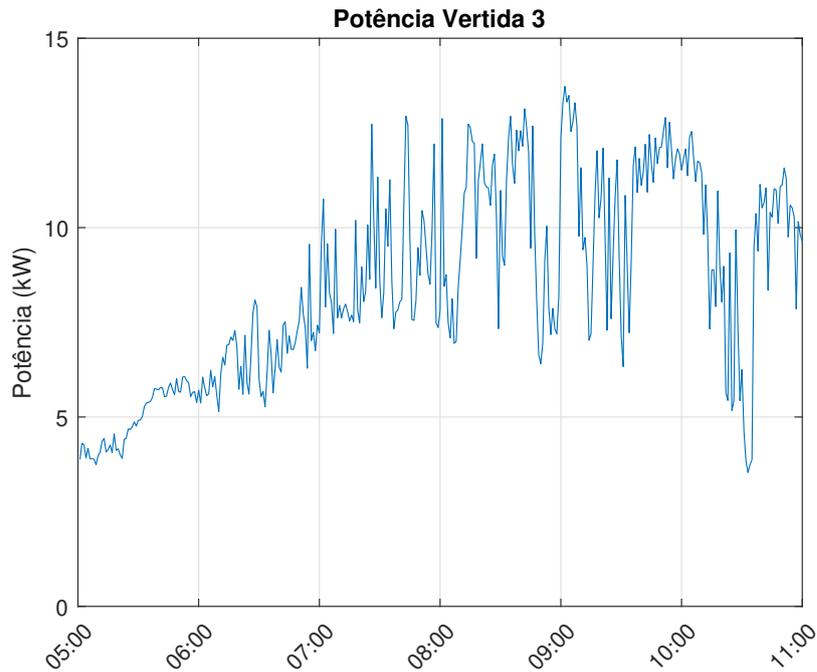


Figura 4.23 – Potência instantânea vertida no período de operação ilhada.



Através do balanço energético apresentado na Figura 4.24 e descrito na Tabela 4.6, é possível observar o montante de energia vertida apresentado na microrrede 3. A identificação deste percentual é importante para que se tenha noção se a microrrede está sub ou superdimensionada. No caso em questão, é possível perceber o superdimensionamento da microrrede 3, uma vez que há um montante considerável de energia vertida e não está sendo aproveitada.

Figura 4.24 – Balanço energético da microrrede 3 entre 5h e 11h.

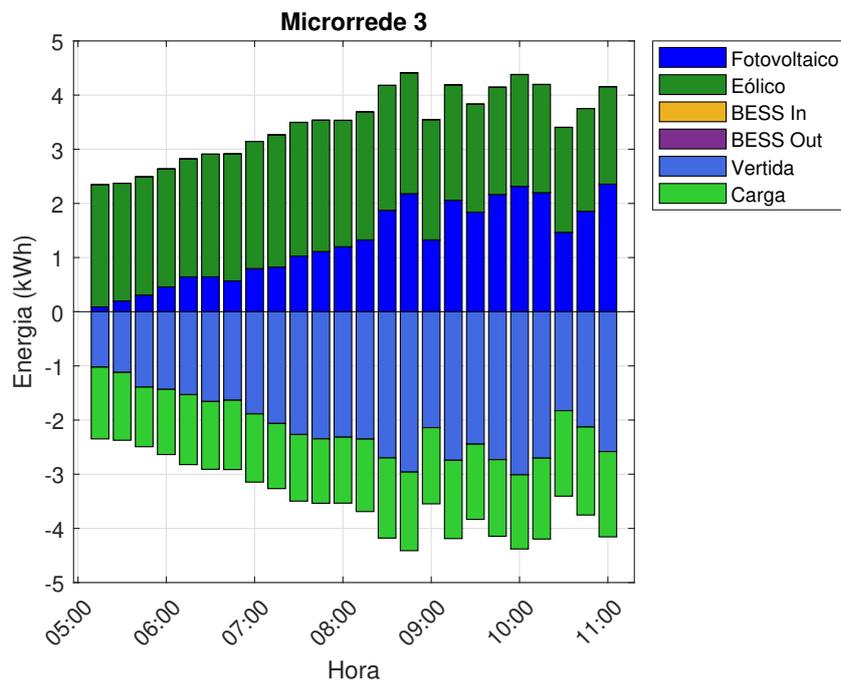


Tabela 4.6 – Resumo energético da microrrede 3 no período das 5h às 11h.

Descrição	Energia Gerada (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	30,8215	36,97
Geração Eólica	52,5382	63,03
Total	83,3597	100,00
Descrição	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	14,6722	45,31
Geração Eólica	17,7078	54,69
BESS Out	0,0	0,0
Total	32,3800	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	32,3800	-
Carga Atendida	32,3800	100,00
Corte de Carga	0,0	0,0
BESS In	0,0	0,0
Total	32,3800	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	16,1493	31,68
Geração Eólica	34,8304	68,32
Total	50,9797	100,00

*Em relação à demanda total.

Considerando o período das 14h às 20h, a Figura 4.25 apresenta o comportamento das grandezas da microrrede 3. Diferentemente da microrrede 1, em que a geração eólica se manteve superior à demanda em praticamente todo o período de operação isolada, na microrrede 3 a disponibilidade eólica se manteve entrelaçado com a curva de carga, superando-a em alguns instantes e sendo menor em outros.

De forma a observar o comportamento do excesso de geração na microrrede 3, a Figura 4.26 apresenta a potência vertida. Devido à geração eólica operar em pontos próximos à carga, é possível observar que a potência vertida acompanha o comportamento da geração fotovoltaica. Além disso, a potência vertida pode ser entendida também por meio da Figura 4.27, onde é apresentada a curva do SOC do BESS 3.

Figura 4.25 – Comportamento da microrrede 3 na operação ilhada entre 14h e 20h.

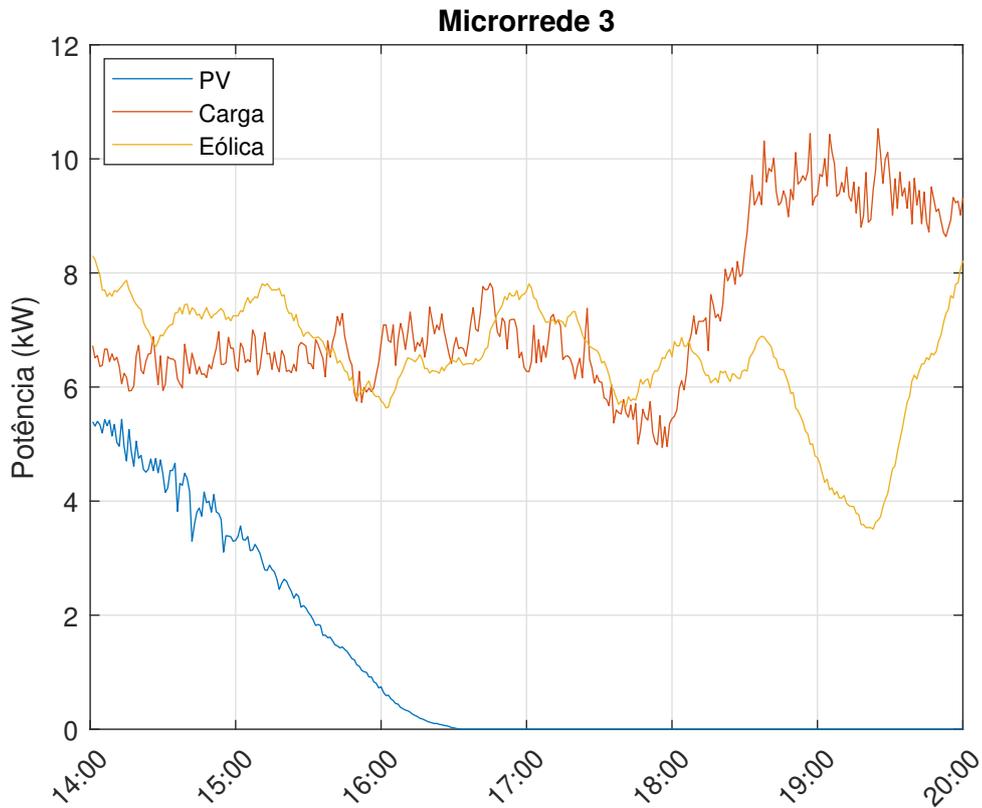


Figura 4.26 – Potência instantânea vertida na microrrede 3 no período de operação ilhada das 14h às 20h.

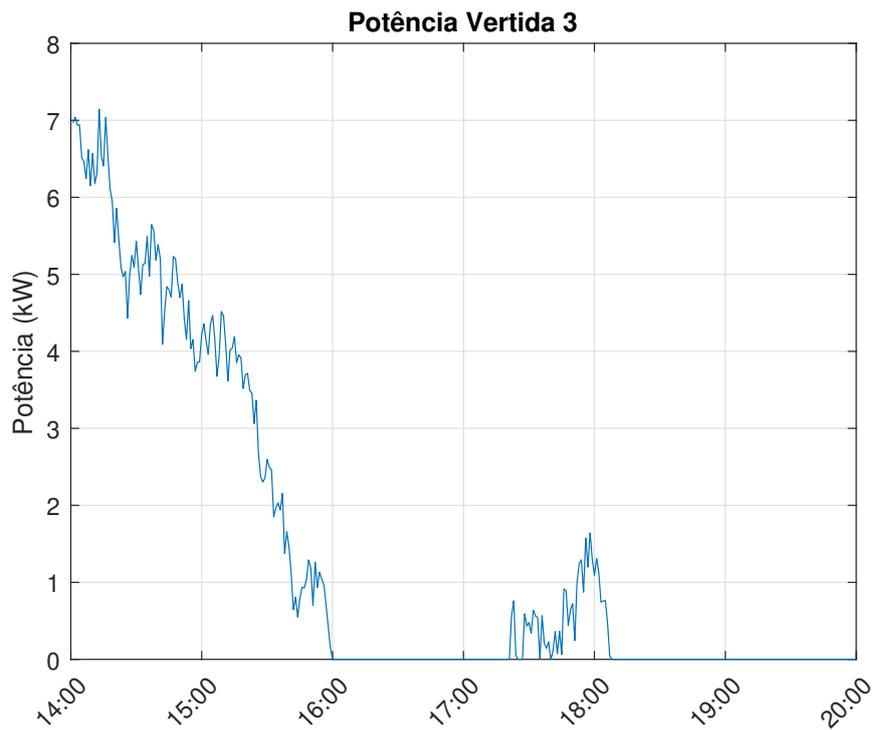
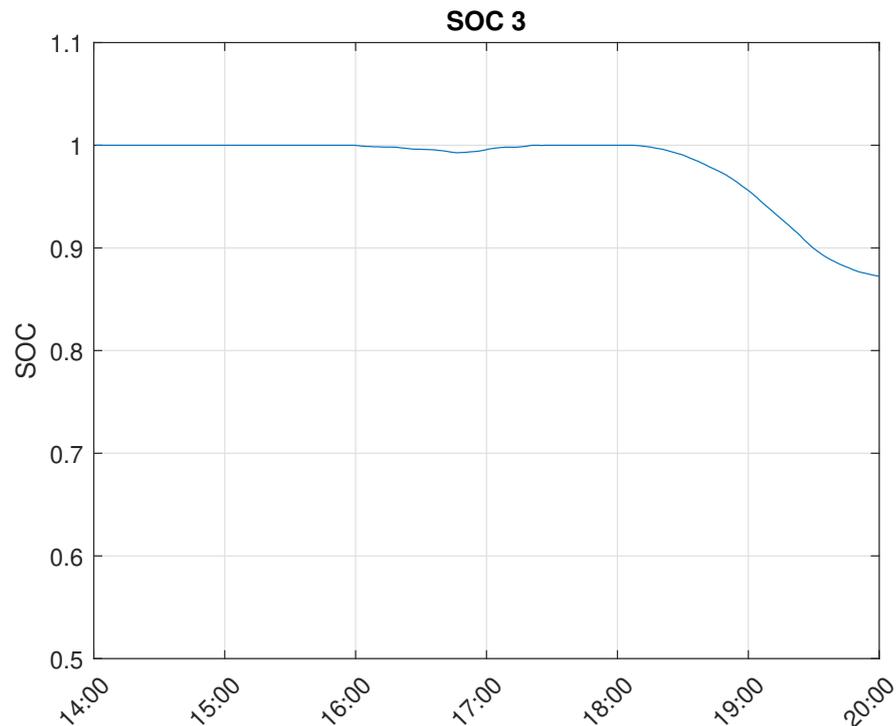


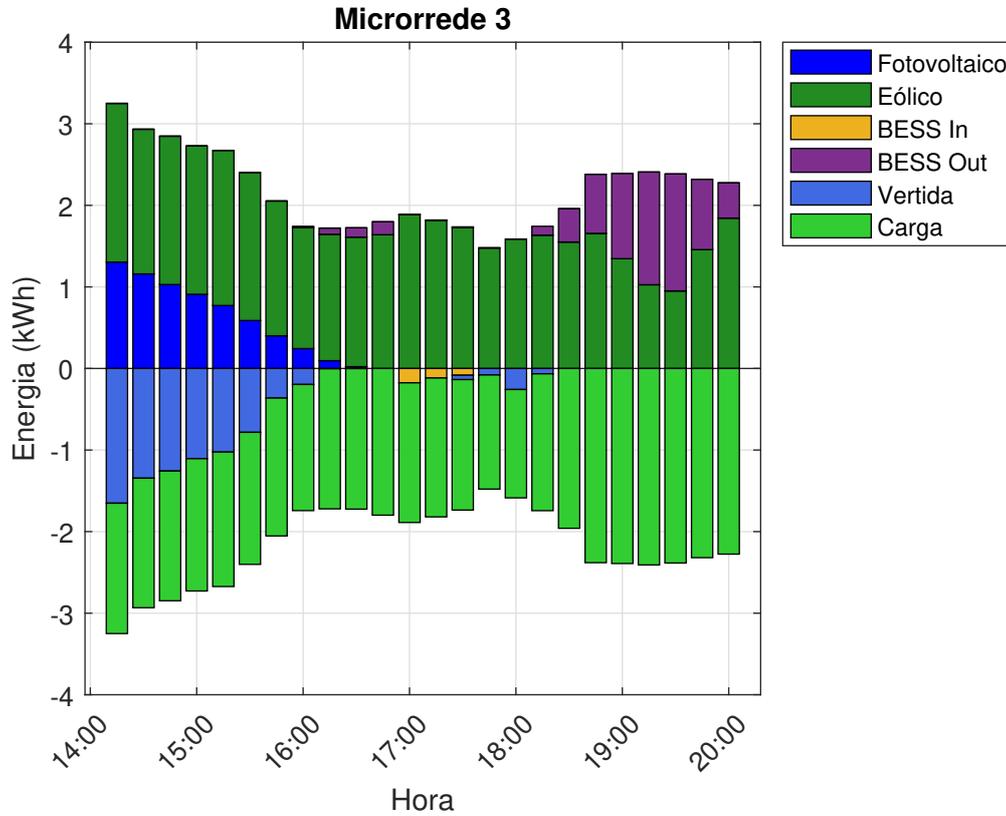
Figura 4.27 – SOC do BESS 3 no período de operação ilhada das 14h às 20h.



Comparando as Figuras 4.26 e 4.27 é possível observar que o SOC do BESS 3 sofre oscilações nos pontos onde não há potência vertida, indicando que houve um déficit de geração e o BESS foi o responsável pelo fechamento do balanço de potência da microrrede. Em contrapartida, nos momentos que há potência vertida, o BESS está com SOC máximo. Assim, por não haver onde alocar ou consumir o excesso de potência, esta se transforma em vertida.

Pela perspectiva energética, a Figura 4.28 apresenta o balanço energético da microrrede 3 para o período compreendido entre 14h e 20h. Na quarta hora do intervalo, é possível observar o comportamento de carregamento do BESS, mesmo que com pouca energia. Além disso, percebe-se também que há a presença de energia vertida. Tal fato ocorre devido à quantidade de energia em excesso, sendo suficiente para realizar o carregamento do BESS e ainda se transformar em energia vertida. A Tabela 4.7 apresenta o resumo energético da microrrede 3 para o período das 14h às 20h.

Figura 4.28 – Balanço energético da microrrede 3 no período de operação ilhada entre às 14h e 20h.



4.4.2 Operação Colaborativa

Anteriormente foram apresentados os resultados da operação isolada das três microrredes simuladas. Nesta subseção serão apresentados os resultados da operação colaborativa entre as diversas microrredes constituintes do sistema, a fim de observar quais foram as vantagens e/ou desvantagens da operação interligada. Para isso, será considerada a configuração física apresentada na Figura 4.29. Para análise da melhoria advindas da operação colaborativa, serão considerados o índice de resiliência apresentado na Equação 4.12 e o indicador de atendimento às cargas, descrito na Equação 4.16:

$$\kappa_i = \frac{1}{L_i^{tot}} \sum_{t=1}^T L_i^{atend} \quad (4.16)$$

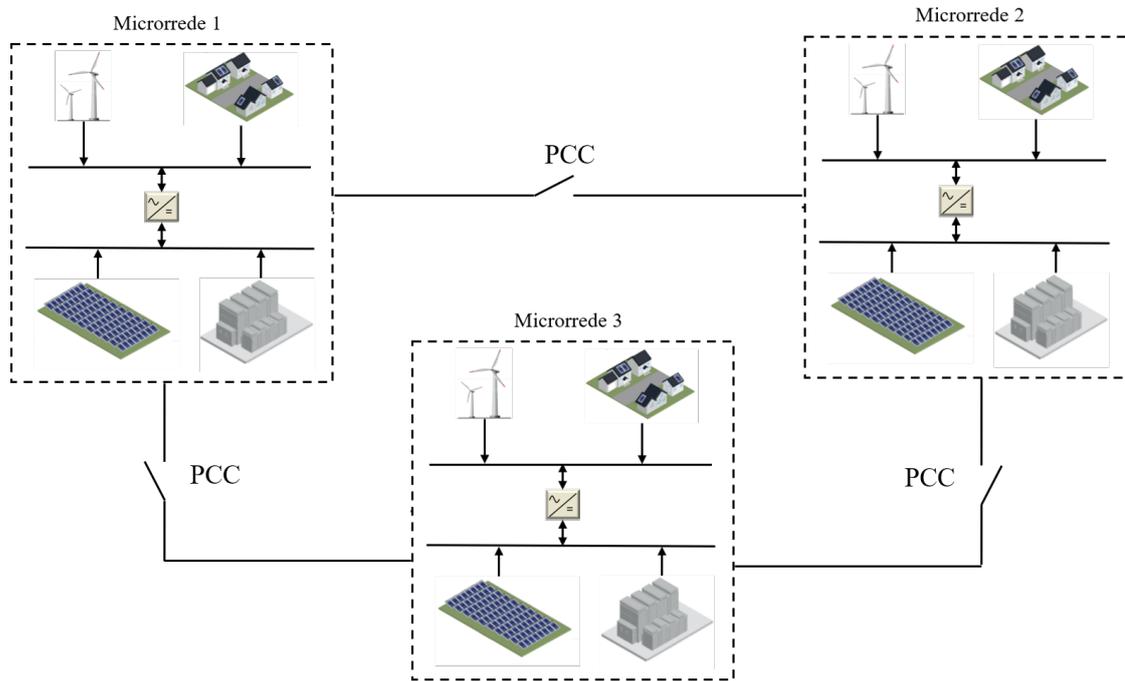
em que κ_i é o índice de atendimento às cargas da microrrede i , L_i^{tot} é a carga total da microrrede i e L_i^{atend} é a carga atendida pela microrrede i . Observando as Equações 4.12 e 4.16 é possível observar que os índices de resiliência e de atendimento às cargas são proporcionais, uma vez que quanto maior o valor de κ , menor será o montante de corte de carga e, conseqüentemente, maior será o valor de \mathcal{R} .

Tabela 4.7 – Resumo energético da microrrede 3 no período das 14h às 20h.

Descrição	Energia Gerada (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	6,5233	14,35
Geração Eólica	38,9443	85,65
Total	45,4676	100,00
Descrição	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	6,5233	14,80
Geração Eólica	30,7624	69,80
BESS Out	6,7813	15,40
Total	44,0670	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	43,6863	-
Carga Atendida	43,6863	99,14
Corte de Carga	0,0	0,0
BESS In	0,3807	0,86
Corte de Carga	0,0	0,0
Total	44,0670	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	0,0	0,0
Geração Eólica	8,1819	100,00
Total	8,1819	100,00

Por meio da Figura 4.29, é possível observar que as microrredes se conectam através de linhas de transmissão com a presença de Pontos de Conexão Comum (PCC), sendo uma chave que pode abrir e fechar para iniciar ou interromper a operação interligada entre as MRs. Uma das principais vantagens da possibilidade da operação interligada entre microrredes se dá no aspecto de intercâmbio de energia, pois existem instantes da operação em que há a presença de excedentes de energia, isto é, toda a carga local já está sendo atendida e o BESS está completamente carregado. Caso não haja nenhuma aplicabilidade para este excesso de energia, o mesmo será transformado em energia vertida. Assim, há a possibilidade desse excedente ser vendido para as outras microrredes, caso haja a necessidade. Aplicando a Equação 4.1 para o sistema utilizado, obtém-se:

Figura 4.29 – Configuração física da interligação entre as microrredes.



$$\begin{cases} E_1^{(g)} + E_1^{(BESS_{out})} + \mathbf{e}_1^T \mathbf{A}^T \mathbf{E}_1^{(b)} = E_1^{(c)} - E_1^{(cut)} + E_1^{(BESS_{in})} + \mathbf{e}_1^T \mathbf{A} \mathbf{E}_1^{(s)}, \text{ para a microrrede 1} \\ E_2^{(g)} + E_2^{(BESS_{out})} + \mathbf{e}_2^T \mathbf{A}^T \mathbf{E}_2^{(b)} = E_2^{(c)} - E_2^{(cut)} + E_2^{(BESS_{in})} + \mathbf{e}_2^T \mathbf{A} \mathbf{E}_2^{(s)}, \text{ para a microrrede 2} \\ E_3^{(g)} + E_3^{(BESS_{out})} + \mathbf{e}_3^T \mathbf{A}^T \mathbf{E}_3^{(b)} = E_3^{(c)} - E_3^{(cut)} + E_3^{(BESS_{in})} + \mathbf{e}_3^T \mathbf{A} \mathbf{E}_3^{(s)}, \text{ para a microrrede 3} \end{cases} \quad (4.17)$$

sendo

$$\mathbf{e}_1^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\mathbf{e}_2^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\mathbf{e}_3^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

A matriz \mathbf{A} representa as conexões entre as diversas MRs do sistema. Nos cenários utilizados, todas as microrredes conectam entre si e, portanto, a matriz \mathbf{A} é simétrica e pode ser escrita como:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Os vetores das energias comprada ($\mathbf{E}_i^{(b)}$) e vendida ($\mathbf{E}_i^{(s)}$) podem ser escritos da seguinte forma:

$$\mathbf{E}_1^{(b)} = \begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{2,1} \\ E_{3,1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_1^{(s)} = \begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{1,2} \\ E_{1,3} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{E}_2^{(b)} = \begin{bmatrix} E_{1,2} \\ E_{2,2} \\ E_{3,2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_2^{(s)} = \begin{bmatrix} E_{2,1} \\ E_{2,2} \\ E_{2,3} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$\mathbf{E}_3^{(b)} = \begin{bmatrix} E_{1,3} \\ E_{2,3} \\ E_{3,3} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_3^{(s)} = \begin{bmatrix} E_{3,1} \\ E_{3,2} \\ E_{3,3} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Substituindo os termos descritos nas Equações 4.18 a 4.24 na Equação 4.17, obtém-se para a microrrede 1:

$$E_1^{(g)} + E_1^{(BESS_{out})} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{2,1} \\ E_{3,1} \end{bmatrix} = E_1^{(c)} + E_1^{(BESS_{in})} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{1,2} \\ E_{1,3} \end{bmatrix}$$

$$E_1^{(g)} + E_1^{(BESS_{out})} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{2,1} \\ E_{3,1} \end{bmatrix} = E_1^{(c)} + E_1^{(BESS_{in})} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{1,2} \\ E_{1,3} \end{bmatrix}$$

$$E_1^{(g)} + E_1^{(BESS_{out})} + \underbrace{(E_{2,1} + E_{3,1})}_{(I)} = E_1^{(c)} + E_1^{(BESS_{in})} + \underbrace{(E_{1,2} + E_{1,3})}_{(II)}$$

em que os termos (I) e (II) representam os montantes de energia comprada e vendida, respectivamente, pela microrrede 1 em relação às microrredes 2 e 3. Similarmente, para a microrrede 2:

$$E_2^{(g)} + E_2^{(BESS_{out})} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,2} \\ E_{2,2} \\ E_{3,2} \end{bmatrix} = E_2^{(c)} + E_2^{(BESS_{in})} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2,1} \\ E_{2,2} \\ E_{2,3} \end{bmatrix}$$

$$E_2^{(g)} + E_2^{(BESS_{out})} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,2} \\ E_{2,2} \\ E_{3,2} \end{bmatrix} = E_2^{(c)} + E_2^{(BESS_{in})} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2,1} \\ E_{2,2} \\ E_{2,3} \end{bmatrix}$$

$$E_2^{(g)} + E_2^{(BESS_{out})} + \underbrace{(E_{1,2} + E_{3,2})}_{(III)} = E_2^{(c)} + E_2^{(BESS_{in})} + \underbrace{(E_{2,1} + E_{2,3})}_{(IV)}$$

em que os termos (III) e (IV) equivalem à energia comprada e vendida pela MR 2, respectivamente. Por fim, para a MR 3:

$$E_3^{(g)} + E_3^{(BESS_{out})} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,3} \\ E_{2,3} \\ E_{3,3} \end{bmatrix} = E_3^{(c)} + E_3^{(BESS_{in})} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{3,1} \\ E_{3,2} \\ E_{3,3} \end{bmatrix}$$

$$E_3^{(g)} + E_3^{(BESS_{out})} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,3} \\ E_{2,3} \\ E_{3,3} \end{bmatrix} = E_3^{(c)} + E_3^{(BESS_{in})} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{3,1} \\ E_{3,2} \\ E_{3,3} \end{bmatrix}$$

$$E_3^{(g)} + E_3^{(BESS_{out})} + \underbrace{(E_{1,3} + E_{2,3})}_{(V)} = E_3^{(c)} + E_3^{(BESS_{in})} + \underbrace{(E_{3,1} + E_{3,2})}_{(VI)}$$

em que os termos V e VI representam os montantes de energia comprada e vendida pela microrrede 3.

Por meio dos resultados apresentados na Seção anterior acerca da operação isolada de cada microrrede, é possível observar que apenas a microrrede 2 possui momentos que houve a necessidade de cortar carga. Na operação interligada, há a possibilidade da MR2 comprar energia das outras constituintes do sistema multimicrorrede, uma vez que estas possuam a disponibilidade para o atendimento. Assim, serão consideradas duas situações para o desenvolvimento das simulações na operação colaborativa: venda exclusiva da energia vertida e venda através da energia armazenada no BESS.

4.4.2.1 Venda exclusiva de energia vertida

Neste cenário, será permitida apenas a venda advinda do excesso de energia presente nas microrredes. Por enquanto, não será considerada a possibilidade de vender a energia presente nos sistemas de armazenamento. Assim, a Figura 4.30 apresenta o comportamento do corte de carga na microrrede 2, juntamente com a curva de potência comercializada das microrredes vizinhas. Além disso, é apresentada também a curva do corte de carga após a realização da compra com as microrredes vizinhas.

Conforme apresentado nos resultados da operação ilhada de cada microrrede, o período compreendido entre as 5h e 11h apresenta menor criticidade em relação ao

Figura 4.30 – Comportamento do corte de carga e transações de potência da microrrede 2 na operação colaborativa entre 5h e 11h.

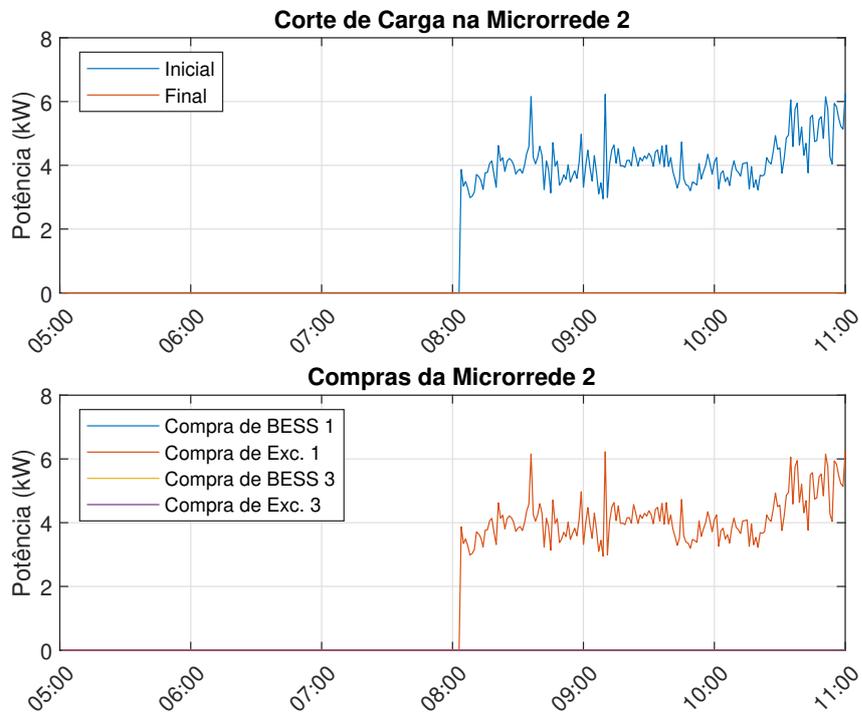
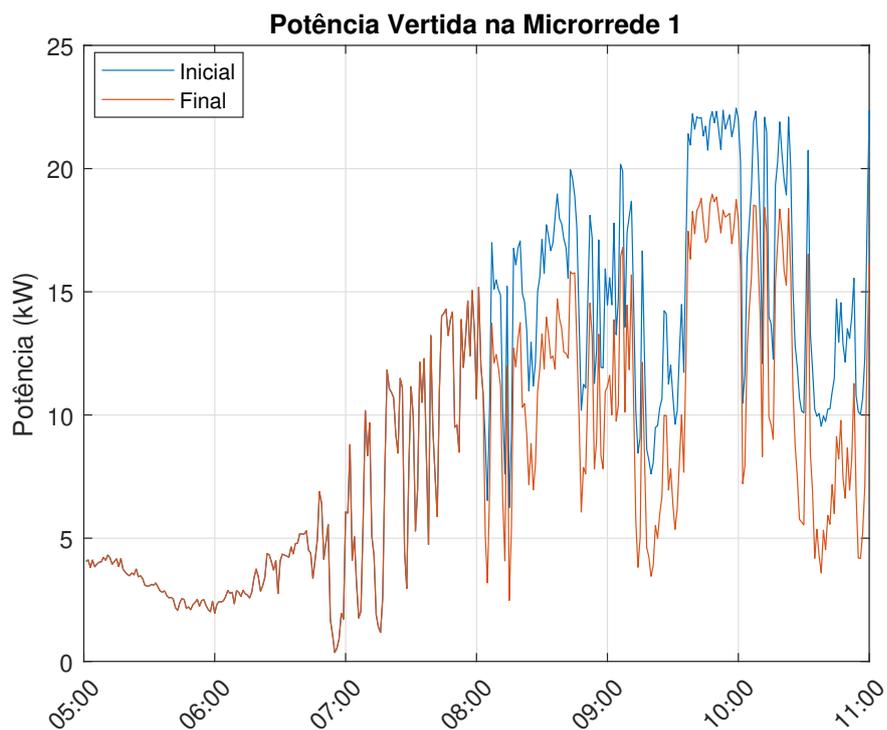


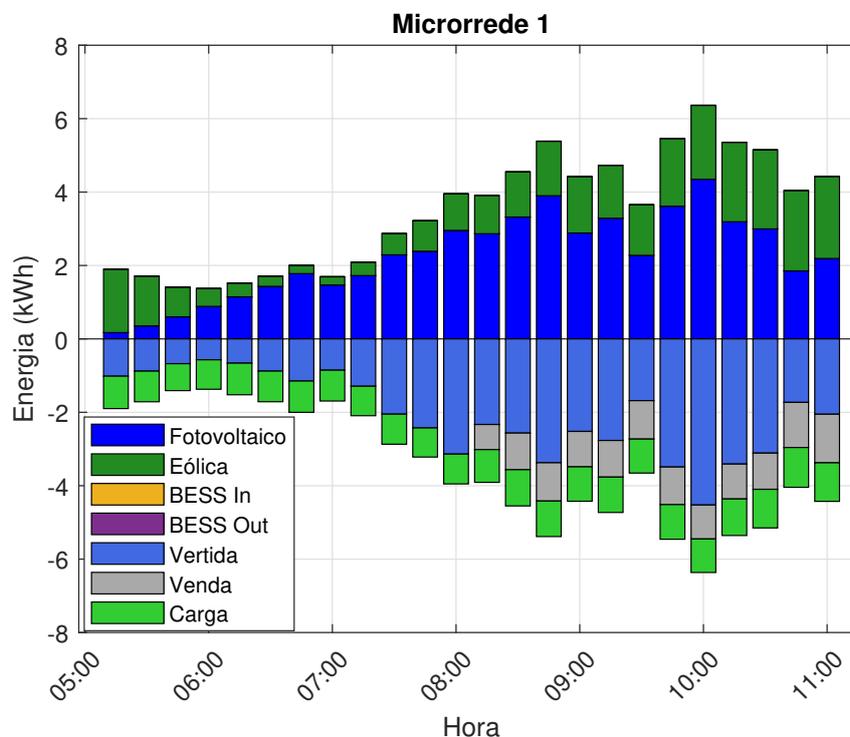
Figura 4.31 – Potência instantânea vertida na operação colaborativa na microrrede 1.



montante de carga a ser cortada, uma vez que há a presença da geração fotovoltaica. Através da Figura 4.30 é possível observar que o corte de carga inicialmente apresentado na operação ilhada, foi evitado através do intercâmbio de potência advinda da microrrede 1, que dispunha de energia excedente o suficiente para o atendimento às cargas da microrrede 2, sem a necessidade de compra também da microrrede 3. Por conta do intercâmbio, a potência vertida anteriormente presente na MR1 também obteve redução no seu montante (vide Fig. 4.31), uma vez que foi encontrada aplicação para a energia excedente.

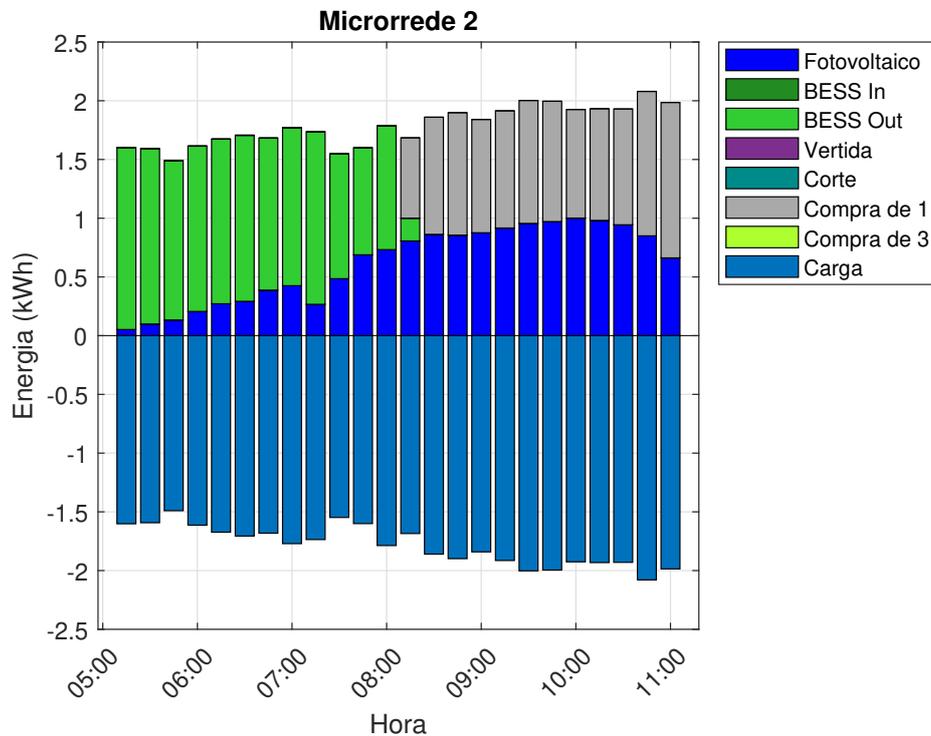
Para a microrrede 3, não houve mudanças em relação à sua operação, uma vez que não necessitou comprar e nem vendeu energia. As Figuras 4.32 e 4.33 apresentam o balanço energético das microrredes 1 e 2 na operação colaborativa. Para a microrrede 1, em relação ao gráfico apresentado para a operação isolada (Fig. 4.8), ocorre a diminuição do montante de energia vertida, que foi vendida. Já para o caso da microrrede 2, o montante que anteriormente era de corte de carga (vide Fig. 4.16), foi substituída pela energia comprada, garantindo assim o fechamento do balanço de potência.

Figura 4.32 – Balanço energético da microrrede 1 na operação colaborativa entre às 5h e 11h.



Considerando o indicador de atendimento às cargas apresentado anteriormente na Equação 4.16, o corte de carga na operação isolada da microrrede 2 no período entre às 5h e 11h representava 28,41% de toda a carga durante o período considerado ($\kappa_2^{isol} = 0,7159$). A partir do momento em que houve a possibilidade do intercâmbio de energia entre as microrredes através da operação colaborativa, todas as cargas da MR2

Figura 4.33 – Balanço energético da microrrede 2 na operação colaborativa entre às 5h e 11h.



pueram ser atendidas ($\kappa_2^{colab} = 1$).

Para o período compreendido entre 14h e 20h, os valores de corte de carga foram superiores ao período entre 5h e 11h, como apresentado na Figura 4.34, devido à indisponibilidade da geração fotovoltaica. Além disso, os valores excedentes de potência gerada também diminuem, como apresentado na Figura 4.35, uma vez que há a indisponibilidade de uma fonte.

Além da redução natural da potência vertida por conta da indisponibilidade de geração fotovoltaica no horário, é percebido também um aumento da carga demandada a partir das 18h, contribuindo fortemente para a diminuição da potência excedente disponível para intercâmbios. Tais comportamento são melhor evidenciados ao observar o balanço energético das microrredes na operação colaborativa, apresentados nas Figuras 4.36 e 4.37.

Figura 4.34 – Comportamento do corte de carga e transações de potência da microrrede 2 na operação colaborativa entre 14h e 20h.

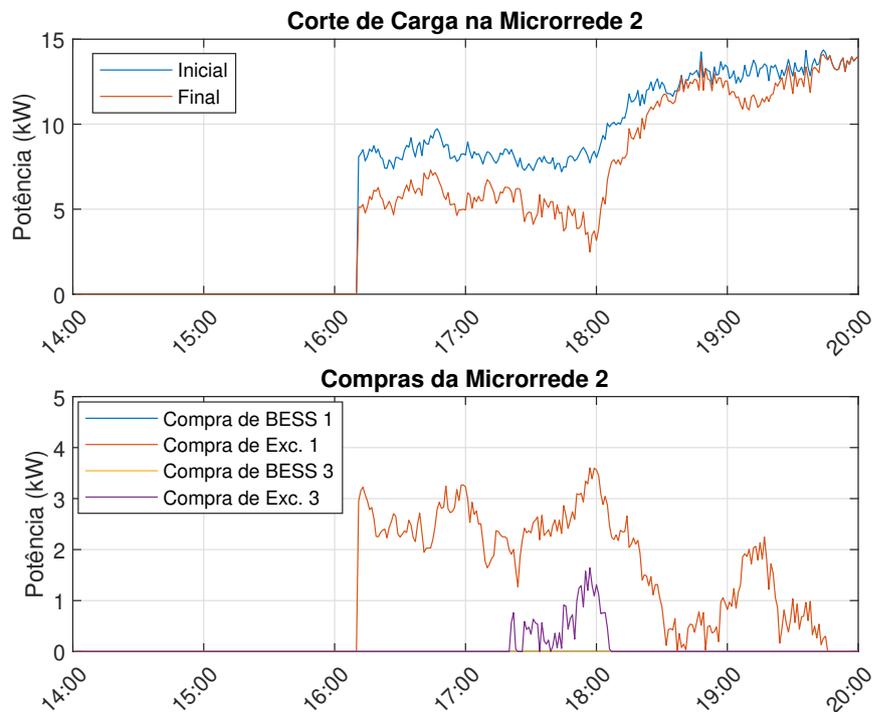
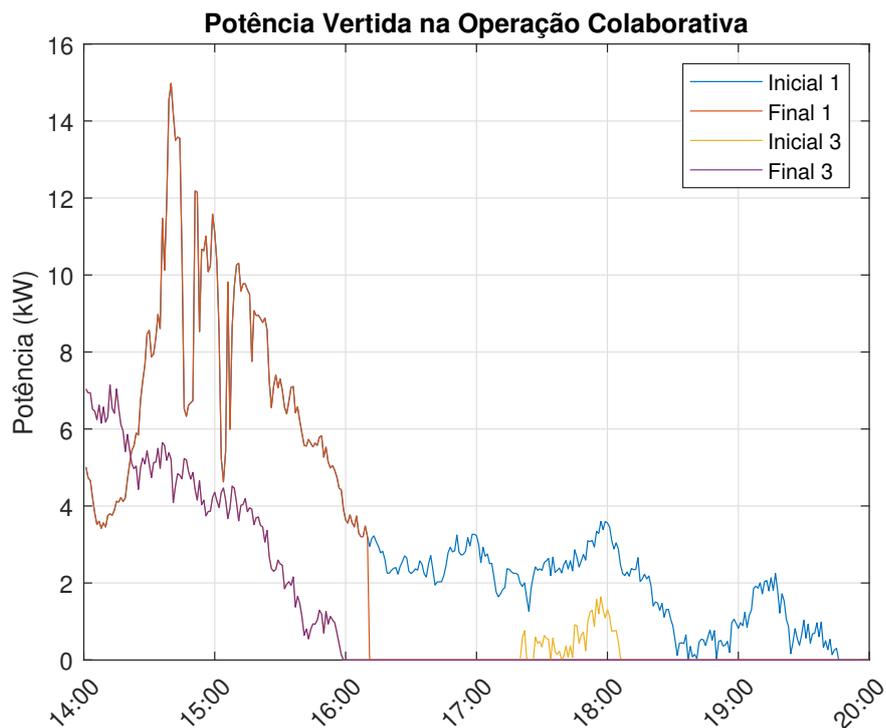


Figura 4.35 – Potência instantânea vertida nas microrredes 1 e 3 na operação colaborativa entre 14h e 20h.



Para o caso da microrrede 1, é possível perceber a redução do montante de energia vertida, uma vez que os excedentes de geração puderam ser vendidos. Nas primeiras horas da operação colaborativa, ainda há a presença de uma quantidade considerável de energia vertida na microrrede 1, devido ao fato do BESS 2 ainda possuir capacidade o suficiente para o atendimento de suas cargas locais e não houve a necessidade da microrrede 2 importar energia. A partir do momento em que o BESS 2 se descarregou completamente e não houve excedente de geração para o seu carregamento, a microrrede 1 começou a realizar o intercâmbio de acordo com sua capacidade disponível. Durante a operação isolada, a energia vertida presente na MR1 atingiu o montante de 21,9192 kWh, já na operação colaborativa foi reduzido para 15,1899 kWh, indicando uma redução de 30,7%, devido à parcela que foi comercializada.

Para a microrrede 2, a disponibilidade de energia a ser vendida pelas outras microrredes não foi suficiente para evitar o corte de carga, apenas para reduzi-lo, como apresentado na Figura 4.37. Comparando os índices de resiliência e atendimento às cargas na operação isolada e colaborativa da microrrede 2:

$$\kappa_2^{isol} = \frac{1}{L_2^{tot}} \sum_{t=1}^T L_2^{atend}(t) = \frac{18,2435}{58,4127} = 0,3123 \quad (4.25)$$

$$\kappa_2^{colab} = \frac{1}{L_2^{tot}} \sum_{t=1}^T L_2^{atend}(t) = \frac{18,2435 + 6,7293 + 0,4562}{58,4127} = \frac{25,429}{58,4127} = 0,4353 \quad (4.26)$$

$$\mathcal{R}_2^{isol} = \frac{1}{L_{2,isol}^{cut}} = \frac{1}{40,1692} = 0,02489 \quad (4.27)$$

$$\mathcal{R}_2^{colab} = \frac{1}{L_{2,colab}^{cut}} = \frac{1}{32,9837} = 0,03032 \quad (4.28)$$

As equações 4.25 e 4.26 apresentam os índices de atendimento às cargas na operação isolada e colaborativa da microrrede 2, respectivamente, onde observa-se que a operação colaborativa trouxe um aumento de 12,3% no atendimento às cargas, em que a parcela destacada em azul se refere à compra de energia realizada da microrrede 1, enquanto a vermelha é a energia comprada da microrrede 3. O impacto causado no índice de resiliência, apresentado nas Equações 4.27 e 4.28, indicou aumento de 21,82% na operação colaborativa em relação à isolada. Além da microrrede 2 que se beneficiou da operação interligada através da compra de energia das outras constituintes do sistema, o que colaborou para a melhoria do seu índice de atendimento às cargas, as microrredes 1 e 3 se beneficiaram através da geração de receitas por meio da venda de sua energia excedente, que anteriormente estava sendo desperdiçada.

4.4.2.2 Venda de energia pelo BESS

Na ausência de excesso de geração nas microrredes, há também a possibilidade de comercialização da energia armazenada nos BESS. Nesta situação, a quantidade disponível para venda pelo sistema de armazenamento deve ser avaliada levando em consideração a previsão de carga para as próximas horas. A avaliação é realizada tomando como base o pior caso, que é a perda de todas as fontes de geração, pois o BESS se tornaria responsável pelo atendimento integral das cargas. Assim, o intervalo analisado é $t = 1, 2, \dots, T$, sendo T o intervalo total e a cada instante de tempo t_0 é avaliada a expectativa total de carga no intervalo $[t_0, T]$, descrito de acordo com a Equação 4.29:

$$L_i^{aval} = \sum_{t=t_0}^T L_i(t) \quad (4.29)$$

em que L_i^{aval} é a carga total do instante t_0 até o instante T de operação e $L_i(t)$ é a carga na microrrede i no instante t . O ponto t_0 indica o instante inicial do período avaliado, em que este se modifica a cada nova avaliação. Assim, a energia disponível pelo BESS para comercialização sem que ocorra riscos para o atendimento às cargas locais é calculado de acordo com a Equação 4.30.

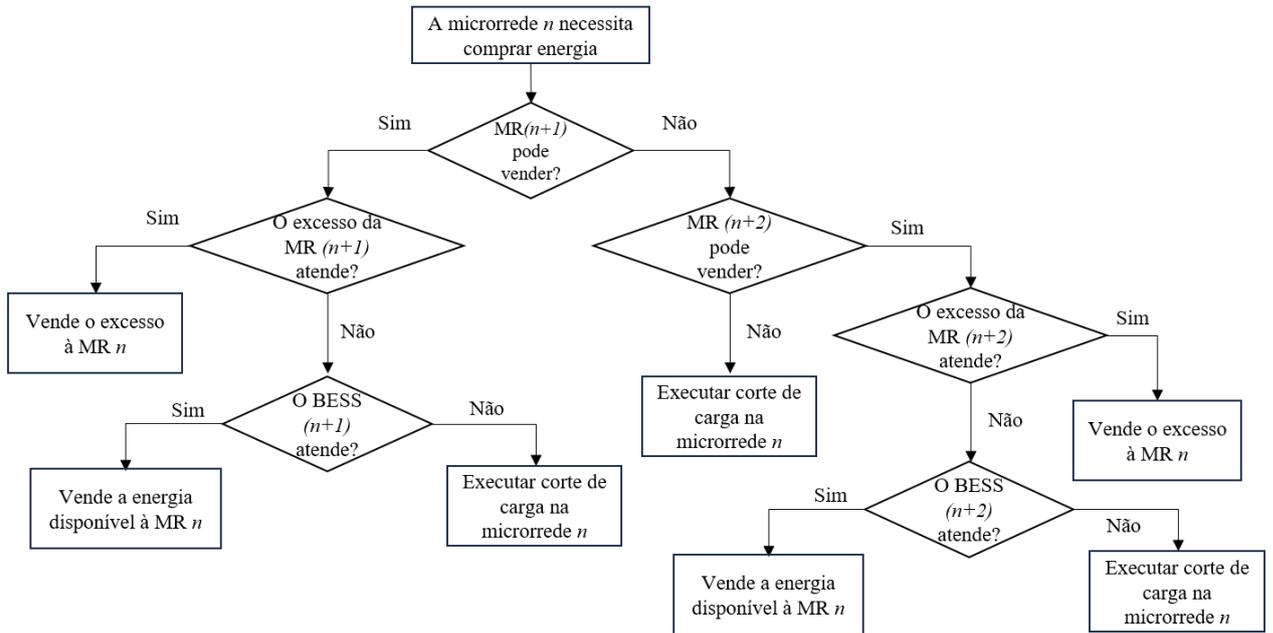
$$E_{i,BESS}^{disp} = (E_{i,BESS} - SOC_i^{min} \cdot C_{i,BESS}) - L_i^{aval} \quad (4.30)$$

em que $E_{i,BESS}^{disp}$ é a energia disponível para ser comercializada pelos sistemas de armazenamento, $E_{i,BESS}$ é a energia contida no BESS, SOC_i^{min} é o estado de carga mínimo do sistema de armazenamento da microrrede i , $C_{i,BESS}$ é a capacidade de armazenamento do BESS da i -ésima microrrede e L_i^{aval} é a carga avaliada descrita pela Equação 4.29. A Figura 4.38 apresenta o fluxograma das etapas de comercialização de energia.

Como apresentado na subseção anterior, mesmo com a operação colaborativa entre as microrredes, a microrrede 2 continuou apresentando corte de carga na sua operação, mesmo que menor que aquele da operação isolada. Tal fato se deve à possibilidade de venda apenas da energia vertida. Entretanto, nem em todos os instantes de operação haverá excesso de geração que acarretará na possibilidade de intercâmbio. Como pôde ser observado nos resultados apresentados nas subseções anteriores, os sistemas de armazenamento de algumas microrredes permaneceram completamente carregados durante quase todo o período de operação.

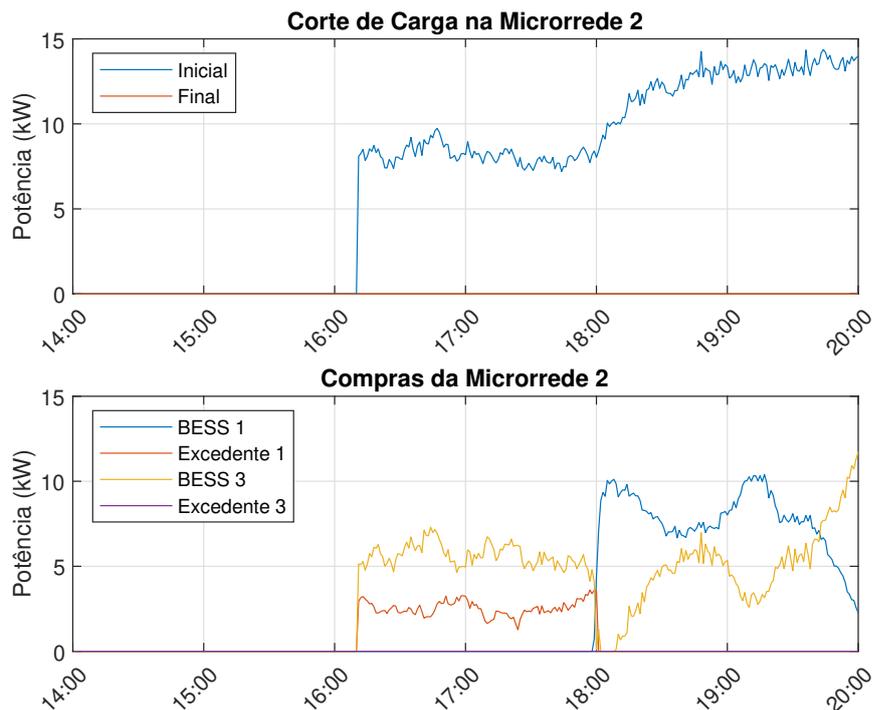
A Figura 4.39 apresenta a curva instantânea das potências de corte da microrrede 2 e do intercâmbio entre as demais, em que é possível observar que, após a possibilidade de compra da energia contida nos sistemas de armazenamento, a demanda da microrrede 2 foi inteiramente atendida. Verifica-se a predominância do intercâmbio advindo do BESS 1, que é majoritariamente acionado após às 18h. Nos intervalos anteriores, a

Figura 4.38 – Fluxograma das etapas de comercialização de energia.



microrrede 1 disponibilizava apenas de potência vertida para realizar a comercialização, não sendo suficiente para atender toda a carga da MR2 e, por conseguinte, sendo necessária o intercâmbio da microrrede 3.

Figura 4.39 – Comportamento do corte de carga e transações de potência da microrrede 2 na operação colaborativa entre 14h e 20h, com possibilidade de intercâmbio de energia do BESS.



Através da Equação 4.16, calcula-se então o índice das cargas atendidas e da resiliência após a operação colaborativa com possibilidade de compra dos sistemas de armazenamento, como apresenta a Equação 4.31.

$$\kappa_{2,BESS}^{colab} = \frac{1}{L_2^{tot}} \sum_{t=1}^T L_2^{atend}(t) = \frac{18,2435 + 20,2286 + 19,9406}{58,4127} = \frac{58,4127}{58,4127} = 1 \quad (4.31)$$

$$\mathcal{R}_{2,BESS}^{colab} = \lim_{L_{2,colab}^{cut} \rightarrow 0} \frac{1}{L_{2,colab}^{cut}} \implies \mathcal{R}_{2,BESS}^{colab} \rightarrow \infty \quad (4.32)$$

Por meio da Equação 4.31 é possível observar que toda a carga passou a ser atendida após a possibilidade de intercâmbio da energia armazenada nos sistemas de armazenamento das microrredes. Os termos destacados em azul e vermelho são os montantes de energia comprada pela microrrede 2 das microrredes 1 e 3, respectivamente. Para a microrrede 1, 76,97% de toda a energia exportada foi advinda do BESS, representando 15,5696 kWh. Já para a microrrede 3, toda a energia exportada foi advinda do sistema de armazenamento, totalizando 19,9406 kWh.

Para o índice de resiliência apresentado na Equação 4.32, sua representação se deu através do limite do corte de carga tendendo a zero, uma vez que, através da venda da energia contida nos sistemas de armazenamento, toda a carga foi suprida. Caso o cálculo fosse realizado diretamente, resultaria em uma inconsistência matemática $\left(\frac{1}{0}\right)$. Além disso, o significado prático do resultado ($\mathcal{R} \rightarrow \infty$) indica um sistema perfeitamente resiliente, o que não condiz com as situações encontradas em sistemas reais.

A Figura 4.40 apresenta o balanço energético da microrrede 2 após a possibilidade de compra de energia armazenada no BESS. Comparando com a Figura 4.37, em que não havia a possibilidade de intercâmbio da energia do BESS, é possível observar que os montantes que anteriormente eram de corte de carga, passaram a ser representados pela quantidade de energia comprada das microrredes vizinhas.

A Figura 4.41 apresenta as curvas do SOC dos sistemas de armazenamento de todas as microrredes. Através da curva de descarregamento do BESS 1, é possível observar que a possibilidade de venda da energia armazenada somente é realizada a partir do instante que não houve risco do mesmo ficar completamente descarregado durante a operação ilhada. Por meio da curva do SOC 1, é possível perceber que o seu conteúdo energético ficou próximo do SOC_{min} apenas ao final da simulação da operação isolada. O cálculo do montante disponível para venda por parte do BESS leva em conta a previsão de carga para os instantes futuros e o pior cenário das fontes, que seria a perda total de toda a geração.

Figura 4.40 – Balanço energético da microrrede 2 na operação colaborativa entre às 14h e 20h, com possibilidade do intercâmbio de energia do BESS.

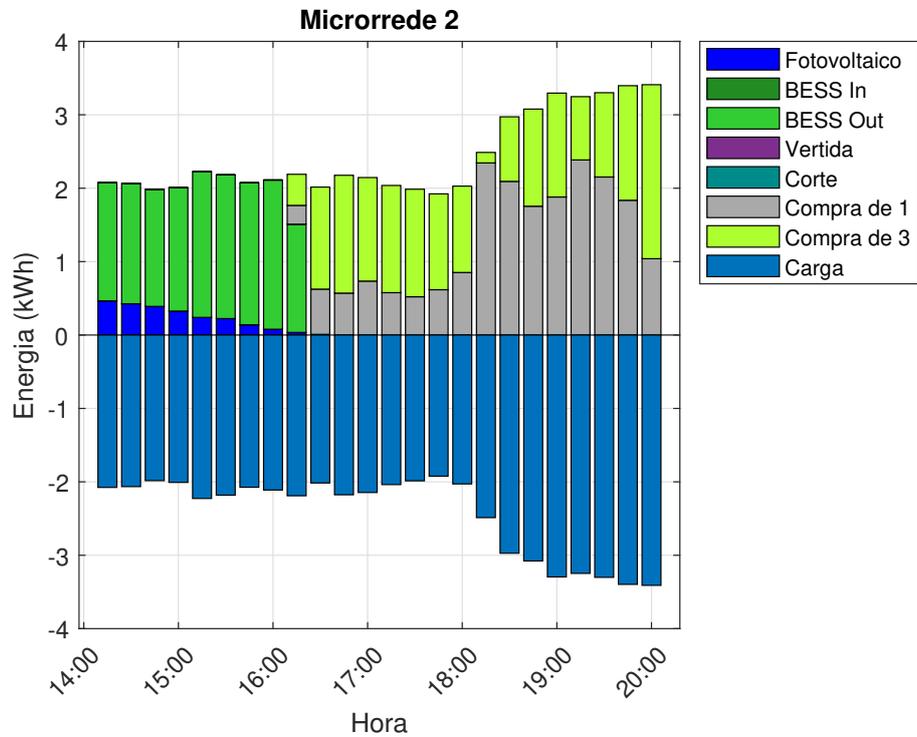
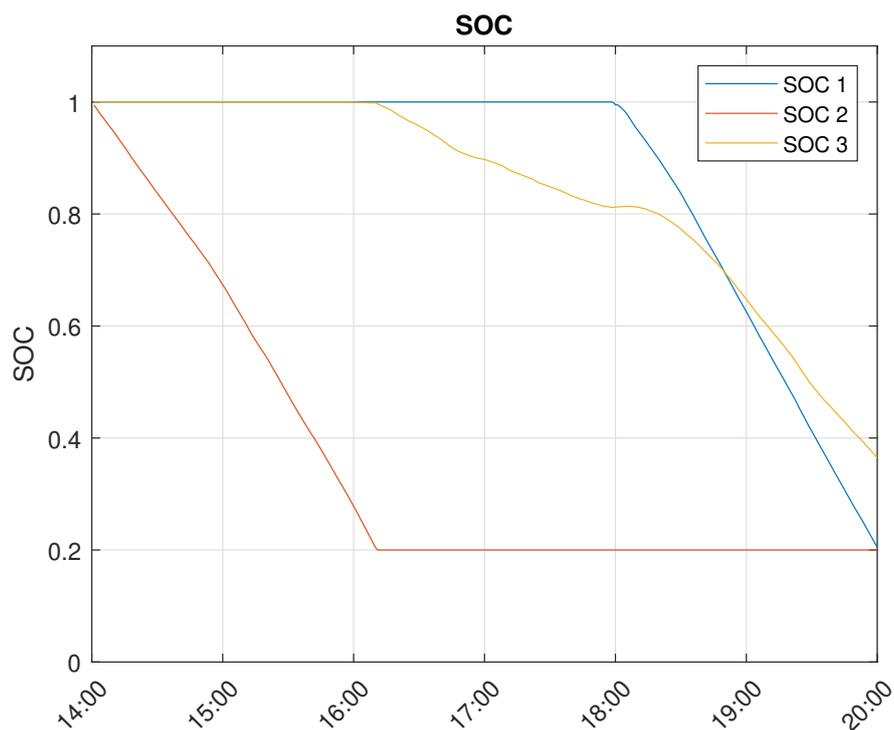
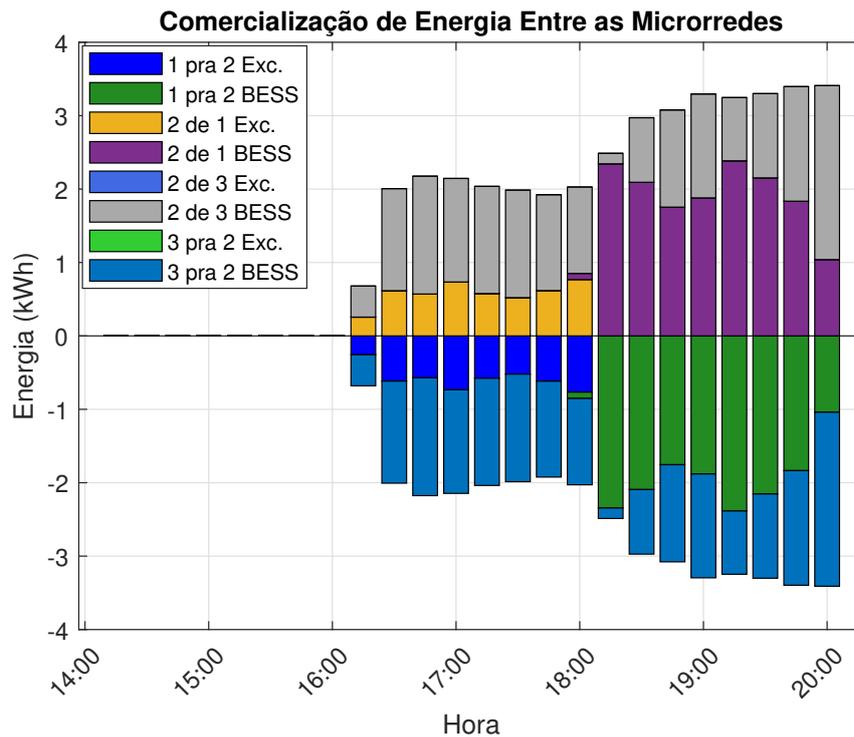


Figura 4.41 – SOC dos sistemas de armazenamento com a possibilidade de intercâmbio de energia dos BESS.



A Figura 4.42 apresenta os montantes de compra/venda de energia entre as microrredes participantes do sistema. O sinal de convenção utilizado é positivo para a compra e negativa para venda. É possível observar a composição do intercâmbio de energia, sendo a maior parte da compra por parte da microrrede 2 sendo feita da energia armazenada no BESS 3.

Figura 4.42 – Balanço energético da comercialização das microrredes.



Na legenda presente na Figura 4.42, *x de y* indica que o fluxo de potência da microrrede *y* em direção à microrrede *x*, indicando que houve importação de energia por parte da microrrede *x*, enquanto *x para y* diz respeito à exportação de energia realizada pela microrrede *x* com destino à microrrede *y*.

4.4.3 Análise Financeira

A presença de energia vertida na operação das microrredes representa prejuízos financeiros, uma vez que uma parcela da energia gerada, que possui custos intrínsecos de aquisição, operação e manutenção, acaba sendo desperdiçada por não ter onde alocá-la. Neste sentido, esta subseção tem por finalidade analisar as vantagens e/ou desvantagens da operação colaborativa de microrredes no âmbito financeiro.

Para o desenvolvimento das simulações, algumas tarifas e suas respectivas siglas serão atribuídas:

- Tarifa de Venda de Energia Excedente da Microrrede 1 (TEE_1) = R\$ 0,53/kWh

- Tarifa de Venda de Energia Armazenada da Microrrede 1 (TEA_1) = R\$ 1,32/kWh
- Tarifa de Venda de Energia Excedente da Microrrede 3 (TEE_3) = R\$ 0,68/kWh
- Tarifa de Venda de Energia Armazenada da Microrrede 3 (TEA_3) = R\$ 1,59/kWh

A TEA será considerada com um valor mais alto em relação à TEE devido aos riscos implícitos de sua comercialização, uma vez que a microrrede estará vendendo energia que armazenou, a priori, para alimentação de suas cargas locais nos momentos de falta das fontes principais. Serão avaliados os custos e ganhos da operação isolada e colaborativa considerando os dois intervalos simulados anteriormente, sendo o primeiro das 5h às 11h e o segundo das 14h às 20h.

4.4.3.1 Operação Isolada

Na operação isolada, quanto há excesso de geração e não há onde armazenar ou utilizar tal excesso, é gerada então a energia vertida. No cenário oposto, quando não há geração suficiente para atender à demanda, há corte de carga. Ambas as situações são prejudiciais à operação da microrrede, seja no caráter financeiro, no caso da energia vertida, ou operacional, quando há o corte de carga. Convencionou-se os valores negativos por serem perdas de oportunidade financeira. Assim, a Figura 4.43 apresenta quanto as microrredes que possuíram energia vertida no período das 5h às 11h deixaram de ganhar por não ter para onde escoar seu excesso de geração em cada instante de operação, com amostragem de 15 minutos, enquanto a Figura 4.44 apresenta o gráfico acumulado dessas perdas.

É possível observar por meio da Figura 4.44 que as microrredes 1 e 3 deixaram de ganhar aproximadamente R\$ 30,00 por não ter a possibilidade de escoamento do excesso de energia para outros agentes constituintes do sistema. Apesar de parecer um valor irrisório de potenciais ganhos, tais valores são escalados à medida em que a microrrede vai aumentando de tamanho.

O mesmo comportamento se observa no período das 14h às 20h. Entretanto, por possuir menores montantes de energia vertida no período, os valores de potenciais ganhos também diminuem, como apresentado nas Figuras 4.45 e 4.46, onde são evidenciados os potenciais ganhos financeiros instantâneos e acumulados para o período indicado. É possível observar que os potenciais ganhos vão diminuindo ao longo do período, uma vez que a geração fotovoltaica diminui até ficar indisponível e o excesso de geração, conseqüentemente, também diminui.

Figura 4.43 – Custo instantâneo de perda de oportunidade das microrredes 1 e 3 no período das 5h às 11h.

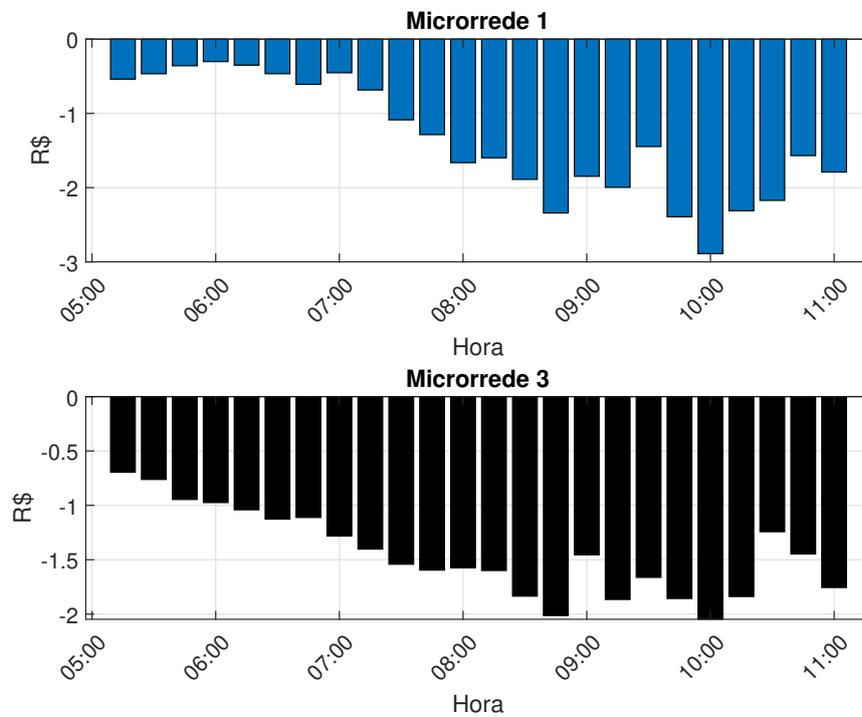


Figura 4.44 – Custo acumulado de perda de oportunidade das microrredes 1 e 3 no período das 5h às 11h.

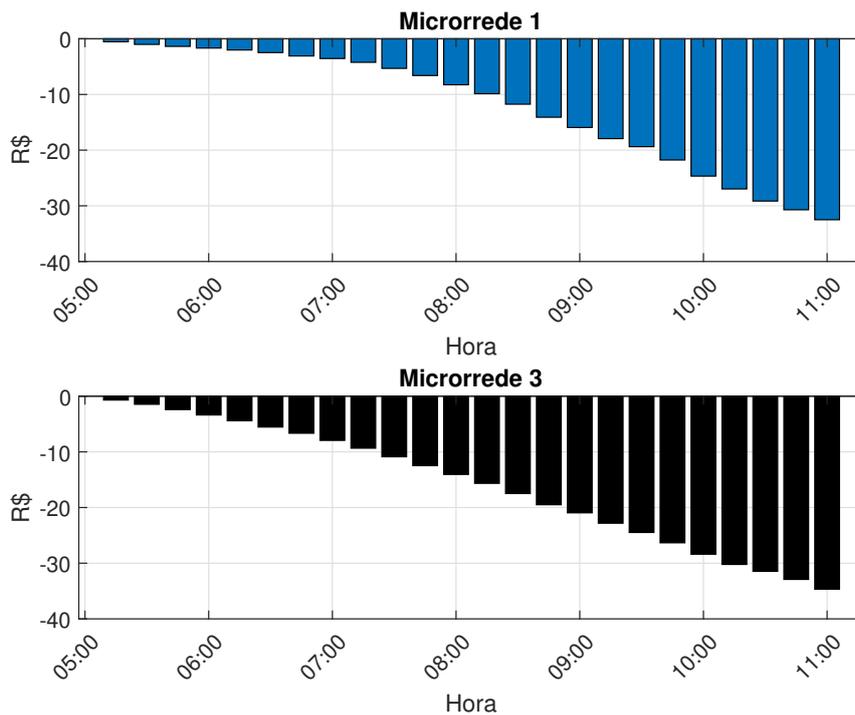


Figura 4.45 – Custo instantâneo de perda de oportunidade das microrredes 1 e 3 no período das 14h às 20h.

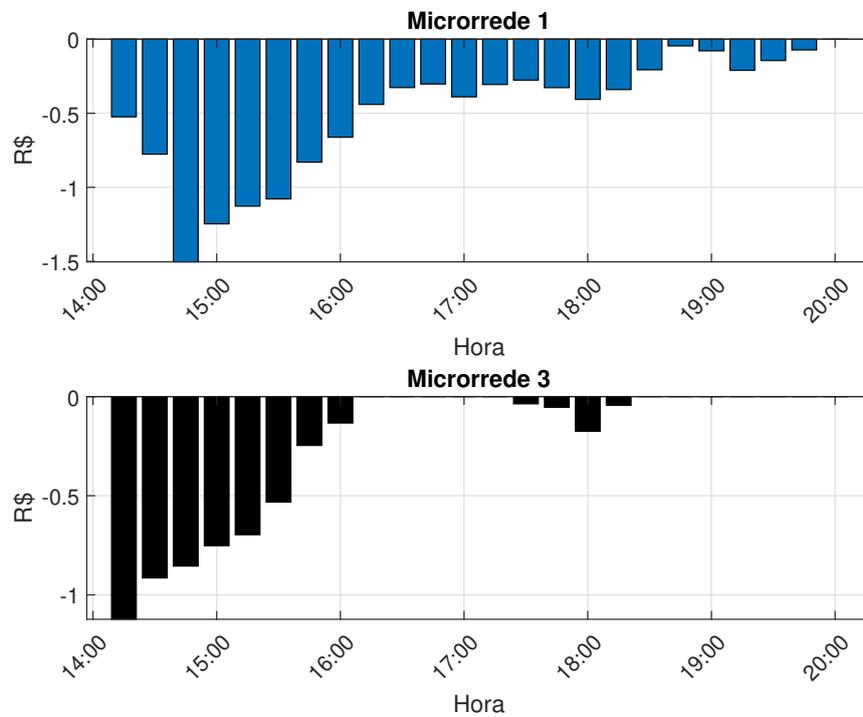
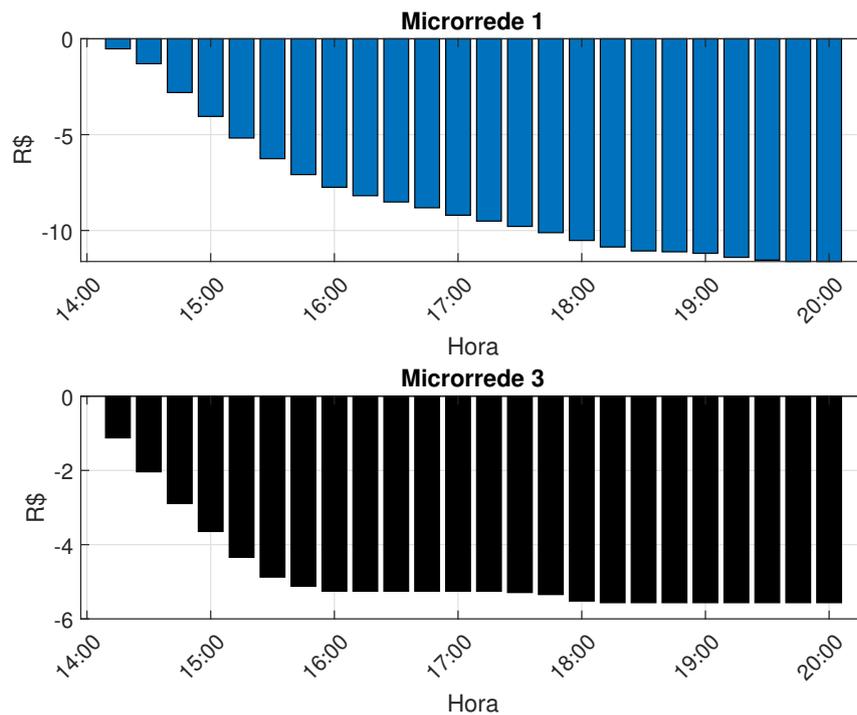


Figura 4.46 – Custo acumulado de perda de oportunidade das microrredes 1 e 3 no período das 14h às 20h.



4.4.3.2 Operação Colaborativa

A operação interligada entre microrredes possibilita o intercâmbio de energia entre as diversas microrredes que constituem o sistema. Assim, há a possibilidade de venda do excesso de geração, trazendo benefícios econômicos, pra microrrede vendedora, e operacionais, para a microrrede compradora que, após a compra, não precisará realizar corte de carga. Além disso, devido à possibilidade de realizar a compra de energia de diferentes microrredes, é financeiramente importante que o custo dessa compra seja o menor possível.

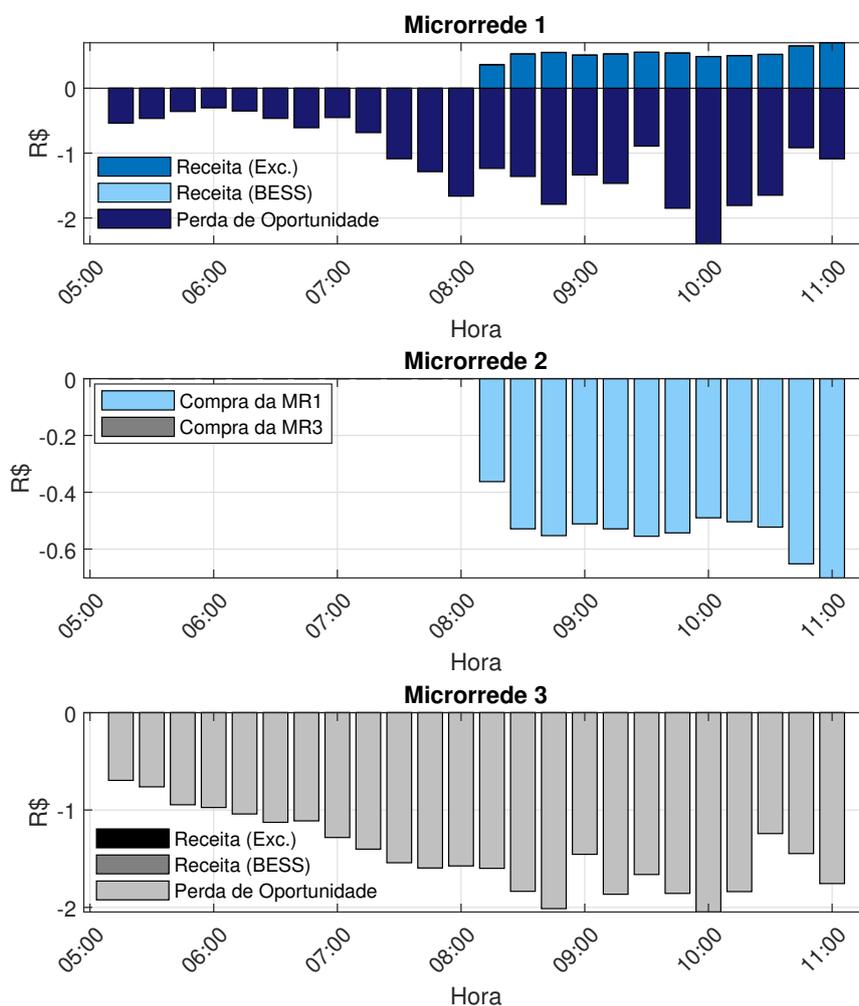
Como as tarifas ε_i e β_i são valores constantes, a minimização da função-objetivo descrita na Equação 4.6 é realizada através de uma lista de prioridade, em que a opção de compra mais barata será priorizada em todas as operações de intercâmbio. A ordem de prioridade será:

1. Energia excedente da microrrede 1;
2. Energia excedente da microrrede 3;
3. Energia armazenada no BESS da microrrede 1;
4. Energia armazenada no BESS da microrrede 3.

A Figura 4.47 apresenta a análise dos ganhos potenciais para o período compreendido entre às 5h e às 11h considerando a possibilidade de comercialização apenas do excesso de geração, onde é possível observar que a comercialização de energia excedente da microrrede 1 para a microrrede 2 começou a partir das 8h, pois foi o horário em que a microrrede 2 necessitou comprar energia. Assim, não houve a venda do excesso de geração antes desse instante, justificando as barras negativas como perda de oportunidade. A partir do momento em que começaram a acontecer os intercâmbios da geração excedente por parte da microrrede 1, a receita começou a ser gerada e as perdas de oportunidade passaram a ser amenizadas, como apresentado na Figura 4.48. Uma vez que o excedente de geração da MR1 foi suficiente para atender à demanda da MR2, não houve a necessidade de comercialização com a microrrede 3 e, por conta disso, as perdas de oportunidade da MR3 continuam iguais à operação isolada, como apresentado anteriormente na Figura 4.43.

Apesar de o acumulado total apresentado na Figura 4.48 ainda ser negativo, passou a ser menor do que o acumulado total na operação isolada (vide Fig. 4.44). Outro fator que influencia diretamente nos resultados financeiros obtidos é o horário de ocorrência do ilhamento. No período simulado até o momento (das 5h às 11h), ainda há a presença da geração fotovoltaica e o corte de carga presente na microrrede 2 se torna menor do que aquele presente entre às 14h e 20h, como discutido posteriormente.

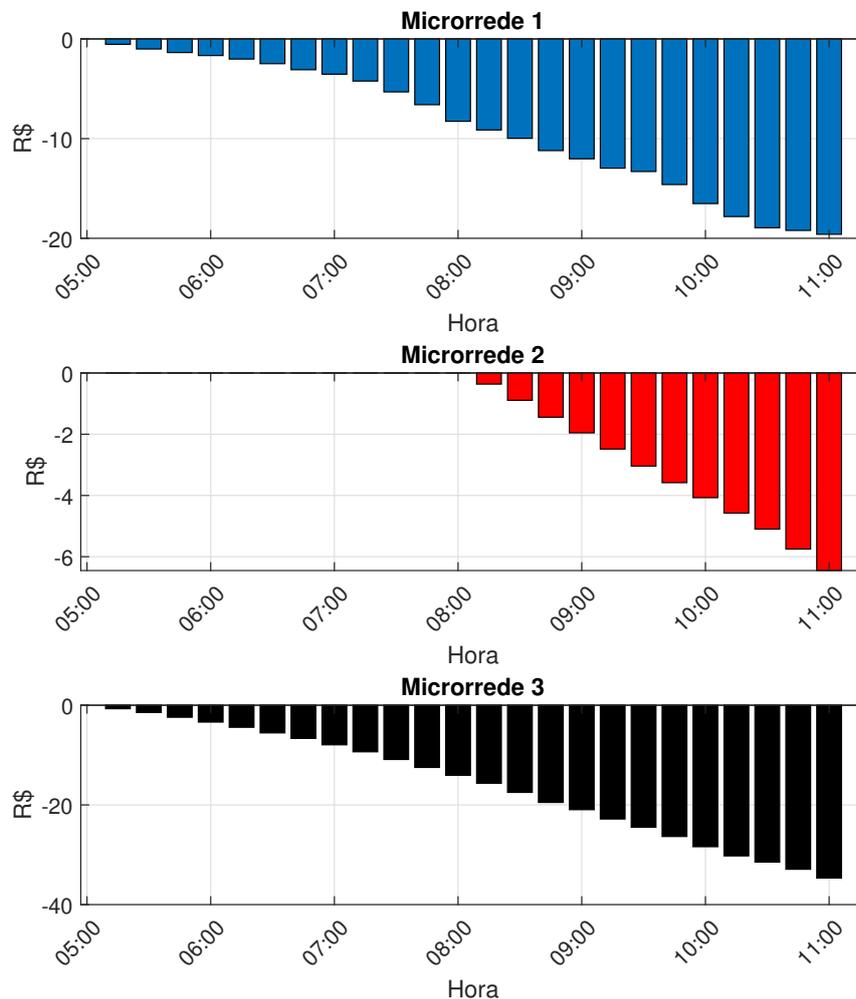
Figura 4.47 – Custo e receita instantâneos das microrredes na operação colaborativa no período das 5h às 11h.



Mesmo após a possibilidade de comercialização do excesso de energia entre as microrredes, as microrredes 1 e 3 ainda continuaram apresentando energia vertida. Assim, não será apresentada a análise de comercialização da energia armazenada no BESS, uma vez que não houve a necessidade de utilização desse modelo de operação no período das 5h às 11h.

Como apresentado nos resultados das seções anteriores, o período entre às 14h e 20h apresenta maiores níveis de criticidade da operação, uma vez que em boa parte do período já não há mais a presença da geração fotovoltaica. Assim, considerando a possibilidade apenas da comercialização da energia vertida, as Figuras 4.49 e 4.50 apresentam as análises financeiras correspondentes ao intervalo considerado, considerando os potenciais ganhos instantâneo e acumulado.

Figura 4.48 – Custo e receita acumulados das microrredes na operação colaborativa no período das 5h às 11h.



Para o período das 14h às 20h o comportamento financeiro muda em relação ao intervalo das 5h às 11h. Como a geração fotovoltaica fica indisponível, a energia vertida diminui e, conseqüentemente, a possibilidade de arrecadação pela venda de tal montante. Neste caso, mesmo com toda a energia vertida sendo vendida à microrrede 2, não foi suficiente para sanar todo o seu corte de carga.

Sendo possível a venda da energia presente nos sistemas de armazenamento, a Figura 4.51 apresenta a análise financeira instantânea para tal cenário, onde é possível perceber que mesmo com a presença da energia vertida nas primeiras horas de operação, a possibilidade da venda da energia armazenada no BESS impulsionou financeiramente as microrredes 1 e 3. A Figura 4.52 apresenta a análise financeira acumulada, em que é possível observar que com a possibilidade de venda da energia armazenada no BESS, o resultado financeiro final passa a ser positivo ao fim da operação.

Figura 4.49 – Custo e receita instantâneos das microrredes 1 e 3 na operação colaborativa no período das 14h às 20h.

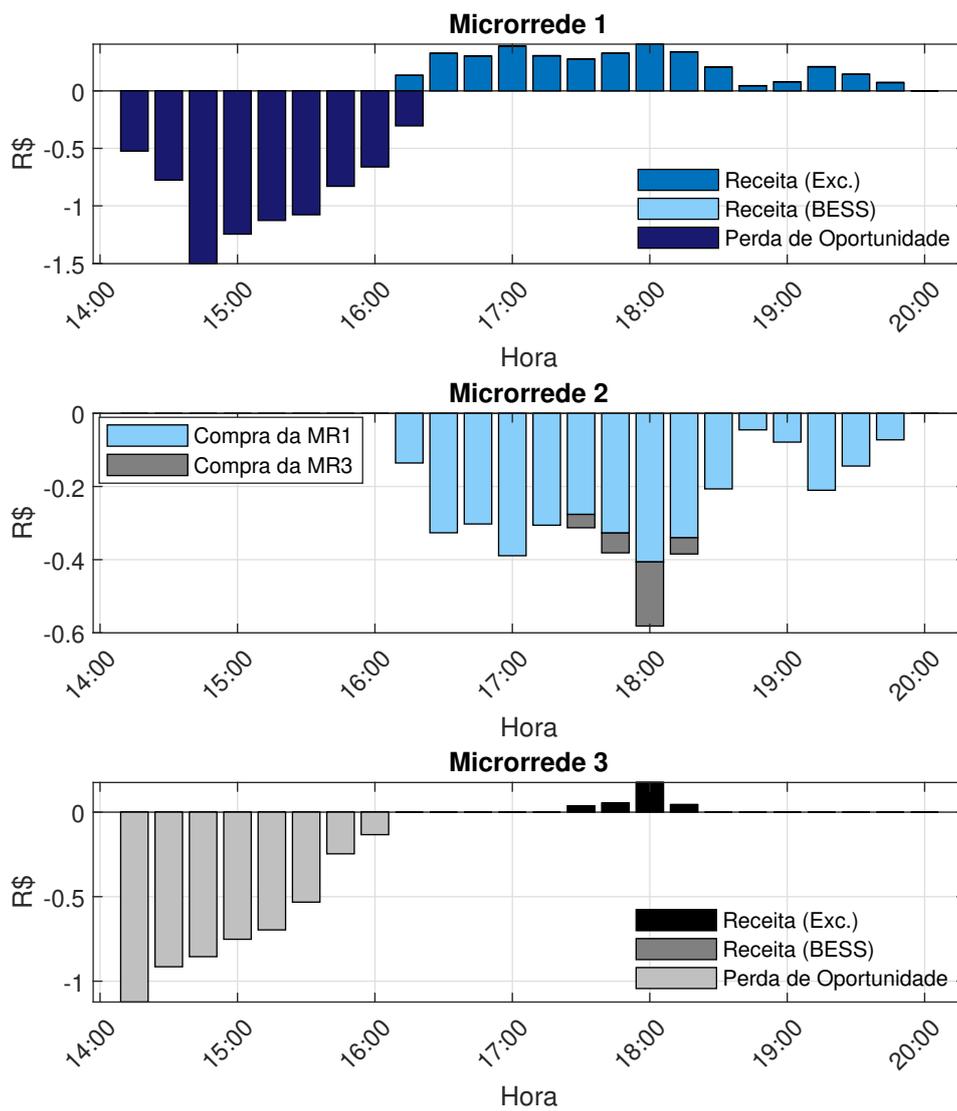


Figura 4.50 – Custo e receita acumulados das microrredes 1 e 3 na operação colaborativa no período das 14h às 20h.

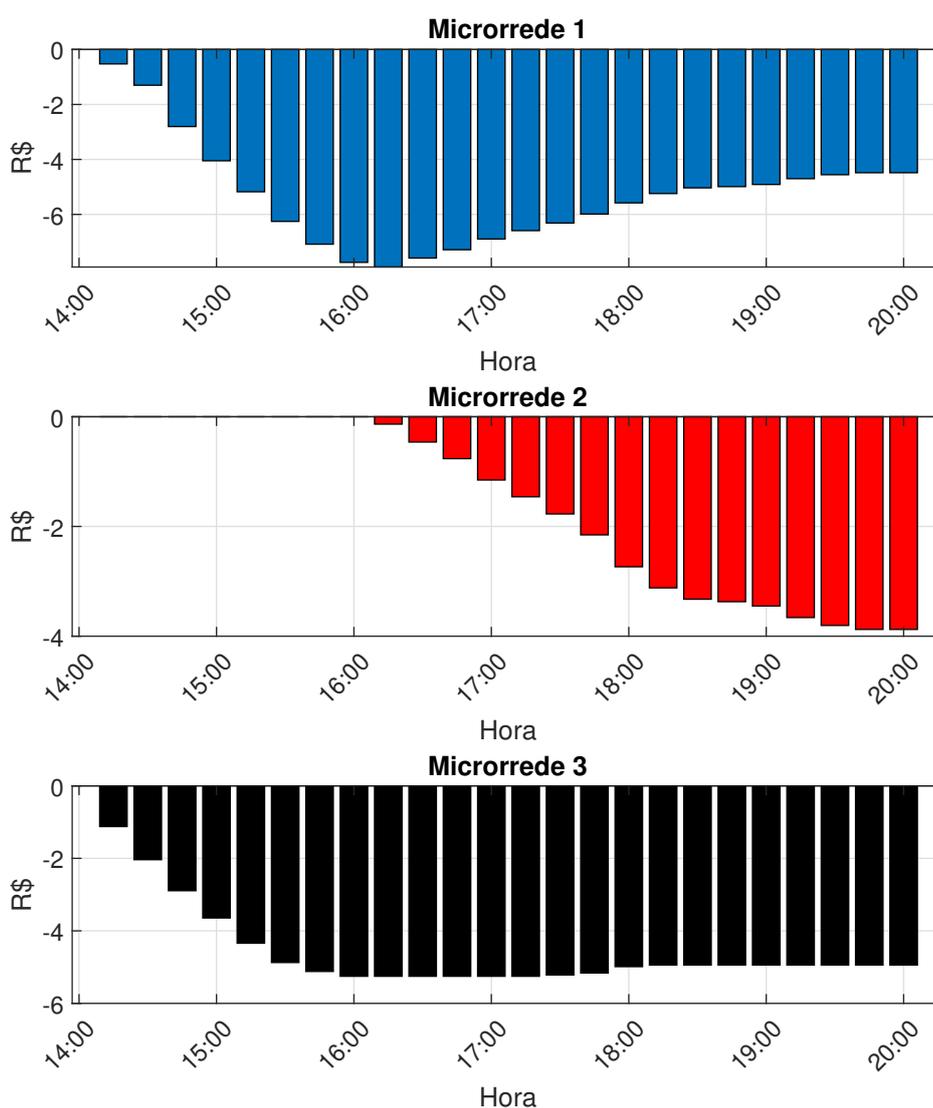


Figura 4.51 – Custo e receita instantâneos das microrredes 1, 2 e 3 na operação colaborativa no período das 14h às 20h, considerando a comercialização da energia nos sistemas de armazenamento.

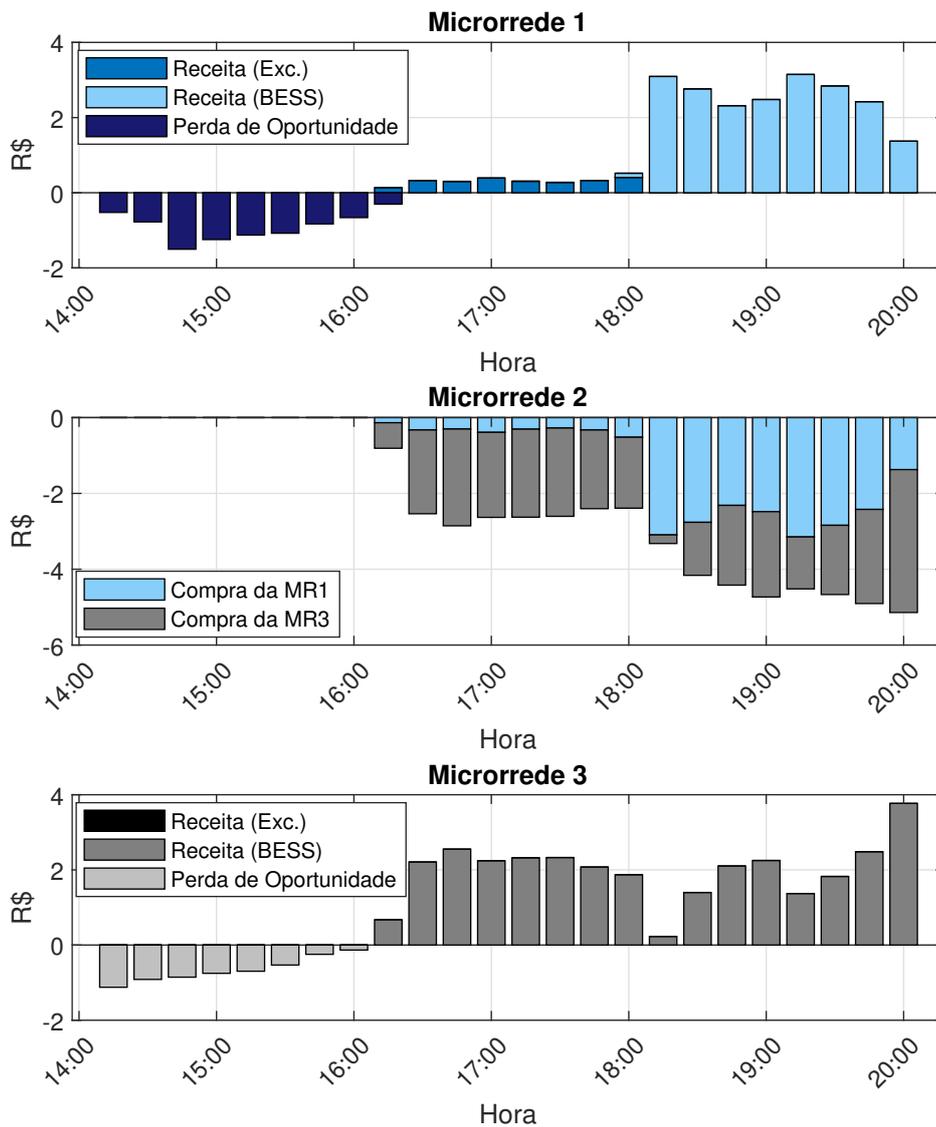
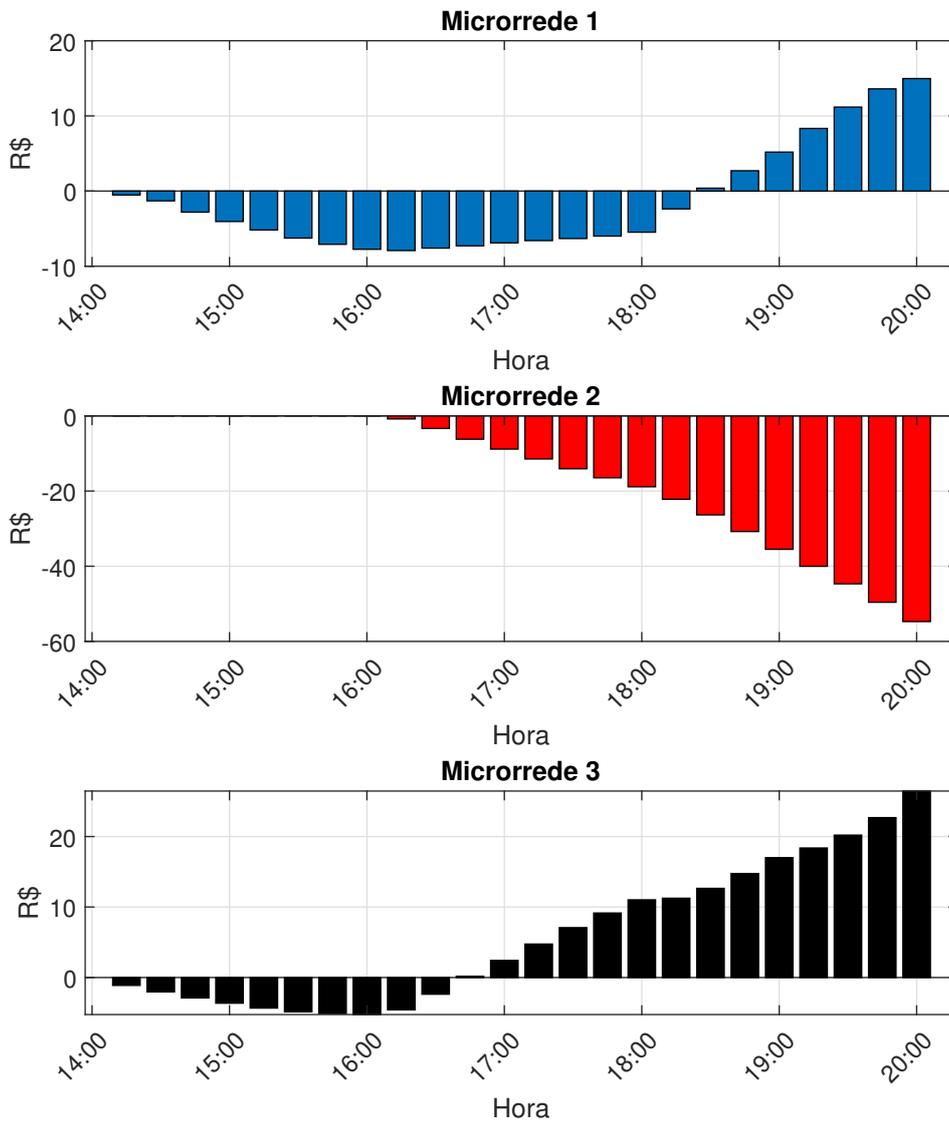


Figura 4.52 – Custo e receita acumulado das microrredes 1, 2 e 3 na operação colaborativa no período das 14h às 20h, considerando a comercialização da energia nos sistemas de armazenamento.



4.5 Operação Isolada *versus* Colaborativa

Os resultados apresentados nas subseções anteriores trazem à tona o potencial da operação colaborativa de microrredes, tanto no caráter operativo, com o aumento da resiliência da rede, quanto financeiro, através da possibilidade de arrecadação de receitas através da venda de energia excedente. Neste sentido, essa seção objetiva apresentar os resultados das operações isolada e colaborativa, de forma que se possa observar as principais diferenças entre estas. Assim, as Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam os dados comparativos entre as formas de operação para as microrredes no período entre às 5h e 11h.

Tabela 4.8 – Resumo energético comparativo da microrrede 1 no período das 5h às 11h.

Descrição	Isolada		Colaborativa	
	Energia Fornecida (kWh)	(%)	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	6,2996	29,18	4,7608	14,10
Geração Eólica	15,2871	70,82	28,9995	85,90
BESS Out	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	21,5867	100,00	33,7603	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	21,5867	-	21,5867	-
Carga Atendida	21,5867	100,00	21,5867	100,00
Corte de Carga	0,0	0,0	0,0	0,0
BESS In	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	21,5867	100,00	21,5867	100,00
Descrição	Energia Comercializada (kWh)	(%)	Energia Comercializada (kWh)	(%)
Compra de MR2	0,0	0,0	0,0	0,0
Compra de MR3	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR2	0,0	0,0	12,1736	100,00
Venda para MR3	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	0,0	0,0	12,1736	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	47,6097	77,64	42,9573	87,40
Geração Eólica	13,7124	22,36	6,1912	12,60
Total	61,3221	100,00	49,1485	100,00

Por meio da Tabela 4.8, é possível observar o impacto da operação colaborativa através da redução de 19,85% no montante de energia vertida, devido à possibilidade de escoamento da geração excedente para microrredes vizinhas através da comercialização. Além disso, a venda do excesso de geração traz consigo benefícios financeiros e de segurança operativa ao operador do sistema, uma vez que parte da energia que seria desperdiçada, pôde contribuir para o atendimento às cargas de outra MR, bem como gerou receita para a microrrede exportadora.

Tabela 4.9 – Resumo energético comparativo da microrrede 2 no período das 5h às 11h.

Descrição	Isolada		Colaborativa	
	Energia Fornecida (kWh)	(%)	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	14,7192	47,98	14,7192	47,98
Geração Eólica	0,0	0,0	0,0	0,0
BESS Out	15,9554	52,02	15,9554	52,02
Total	30,6746	100,00	30,6746	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	42,8483	-	42,8483	-
Carga Atendida	30,6746	71,59*	42,8483	100,00
Corte de Carga	12,1736	28,41*	0,0	0,0
BESS In	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	30,6746	100,0**	42,8483	100,00
Descrição	Energia Comercializada (kWh)	(%)	Energia Comercializada (kWh)	(%)
Compra de MR1	0,0	0,0	12,1736	100,00
Compra de MR3	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR1	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR3	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	0,0	0,0	12,1736	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	0,0	0,0	0,0	0,0

*Em relação à demanda total;

**Total consumido pela microrrede.

Na Tabela 4.9 é possível observar que na operação isolada, o corte de carga era de 28,41% em relação à demanda total no período. Com a possibilidade de intercâmbio de energia, toda a carga pôde ser atendida e o corte foi zerado. Similarmente, para a microrrede 1, houve uma diminuição de 14,68% na energia vertida, uma vez que parte do excedente de geração foi comprado pela microrrede 2 e, conseqüentemente, diminuindo o desperdício de energia por parte da MR1.

Tabela 4.10 – Resumo energético comparativo da microrrede 3 no período das 5h às 11h.

Descrição	Isolada		Colaborativa	
	Energia Fornecida (kWh)	(%)	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	14,6722	45,31	14,6722	45,31
Geração Eólica	17,7078	54,69	17,7078	54,69
BESS Out	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	32,3800	100,00	32,3800	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	32,3800	-	30,3800	-
Carga Atendida	32,3800	100,00	32,3800	100,00
Corte de Carga	0,0	0,0	0,0	0,0
BESS In	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	32,3800	100,00	32,3800	100,00
Descrição	Energia Comercializada (kWh)	(%)	Energia Comercializada (kWh)	(%)
Compra de MR1	0,0	0,0	0,0	0,0
Compra de MR2	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR1	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR2	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	0,0	0,0	0,0	0,0
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	16,1493	31,68	16,1493	31,68
Geração Eólica	34,8304	68,32	34,8304	68,32
Total	50,9797	100,00	50,9797	100,00

Comparando os dados da operação isolada e colaborativa, é possível observar algumas vantagens ao observar os dados dispostos nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10. A primeira trata-se do aumento da segurança operativa do cluster de microrredes, uma vez que a microrrede 2, que teve déficit de geração no período, pôde comprar energia da microrrede 1, que tinha excedente suficiente para evitar o corte de carga na sua microrrede vizinha. A segunda vantagem trata-se da geração de receita para a microrrede

vendedora, fazendo com que uma energia que, a priori, seria desperdiçada, pudesse ser vendida e transformada em lucro para a microrrede.

Como disposto na Subseção 4.4.3, as tarifas de energia praticadas na microrrede 1 são menores quando comparadas àquelas em vigor na microrrede 3. Neste sentido, a fim de manter a operação econômica, as compras de energia realizadas pela microrrede 2 no período compreendido entre às 5h e 11h foram inteiramente provenientes do excedente de geração presente na microrrede 1. Assim, como pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 4.10, não há diferença entre a operação isolada e colaborativa para a MR3, uma vez que esta não participou da comercialização de energia com as microrredes vizinhas, conseguindo ser autossuficiente no período de operação ilhada.

Devido ao período em que ocorreu o ilhamento das microrredes, a geração fotovoltaica ainda estava disponível e, por conta disso, diminuiu a demanda por energia a ser comprada por parte da microrrede 2. Além disso, a geração excedente nas microrredes 1 e 3 estava alta devido à presença dos altos montantes de energia produzida pela fonte FV. Neste sentido, toda a energia intercambiada entre as microrredes foi advinda do excedente de geração, sem a necessidade de comercialização da energia armazenada nos sistemas de armazenamento.

Similarmente aos resultados apresentados nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, as Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam os resumos energéticos das microrredes para o período compreendido entre às 14h e 20h.

Devido à indisponibilidade da geração fotovoltaica, o período entre às 14h e 20h tende a apresentar valores maiores de corte de carga na operação ilhada, como também de intercâmbio de energia entre as microrredes constituintes do sistema na operação colaborativa. Além disso, também é percebida uma diminuição nos montantes de energia excedente, aumentando a participação do BESS nos intercâmbios de energia. Como apresentado graficamente na Figura 4.19, a capacidade do BESS da microrrede 2 permite o atendimento de suas cargas locais até certo horário, fazendo com que o excesso de geração das demais microrredes durante este intervalo seja transformado em energia vertida. A partir do momento em que a MR2 necessita comprar energia, o montante geração excedente das outras microrredes já diminuiu devido à indisponibilidade total da fonte FV. Este comportamento justifica a baixa redução da energia vertida das microrredes 1 e 3 quando comparam-se a operação isolada e colaborativa, sendo de 30,7% para a MR1 e 5,58% para a MR3.

Tabela 4.11 – Resumo energético comparativo da microrrede 1 no período das 14h às 20h.

Descrição	Isolada		Colaborativa	
	Energia Fornecida (kWh)	(%)	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	5,2479	18,02	5,2479	10,26
Geração Eólica	23,6201	81,10	30,3494	59,31
BESS Out	0,2561	0,88	15,5696	30,48
Total	29,1242	100,00	51,1670	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	29,1242	-	29,1242	-
Carga Atendida	29,1242	100,00	29,1242	94,14
Corte de Carga	0,0	0,0	0,0	0,0
BESS In	0,0	0,0	1,8142	5,86
Total	29,1242	100,00	30,9384	100,00
Descrição	Energia Comercializada (kWh)	(%)	Energia Comercializada (kWh)	(%)
Compra de MR2	0,0	0,0	0,0	0,0
Compra de MR3	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR2	0,0	0,0	20,2286	100,00
Venda para MR3	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	0,0	0,0	20,2286	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	2,6689	12,18	2,6689	17,57
Geração Eólica	19,2503	87,82	12,5210	82,43
Total	21,9191	100,00	15,1899	100,00

*Em relação à demanda total.

Por ser a única microrrede com geração exclusivamente fotovoltaica, a microrrede 2 torna-se mais vulnerável ao operar isolada em um período de indisponibilidade da fonte FV. Assim, o corte de carga na operação isolada entre às 5h e 11h corresponde a 28,41% de toda a demanda, enquanto no período das 14h às 20h aumenta para 68,77%. Neste sentido, a operação interligada entre as microrredes propicia a possibilidade de aumento na segurança operativa para este caso, conforme apresentam os dados da Tabela 4.12. Após a possibilidade de comercialização de energia entre as microrredes, a MR2 foi capaz de atender todas as suas cargas, zerando o seu corte de carga, que anteriormente era de 40,1692 kWh, através da compra de 20,2286 kWh advindos da microrrede 1 e 19,9406 kWh da microrrede 3.

Tabela 4.12 – Resumo energético comparativo da microrrede 2 no período das 14h às 20h.

Descrição	Isolada		Colaborativa	
	Energia Fornecida (kWh)	(%)	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	2,3321	12,78	2,3321	12,78
Geração Eólica	0,0	0,0	0,0	0,0
BESS Out	15,9114	87,22	15,9114	87,22
Total	18,2435	100,00	18,2435	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	58,4127	-	58,4127	-
Carga Atendida	18,2435	31,23*	58,4127	100,00
Corte de Carga	40,1692	68,77*	0,0	0,0
BESS In	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	18,2435	100,00**	58,4127	100,00
Descrição	Energia Comercializada (kWh)	(%)	Energia Comercializada (kWh)	(%)
Compra da MR1	0,0	0,0	20,2286	50,36
Compra da MR3	0,0	0,0	19,9406	49,64
Venda para MR1	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR3	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	0,0	0,0	40,1692	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	0,0	0,0	0,0	0,0

*Em relação à demanda total;

**Total consumido pela microrrede.

Tabela 4.13 – Resumo energético comparativo da microrrede 3 no período das 14h às 20h.

Descrição	Isolada		Colaborativa	
	Energia Fornecida (kWh)	(%)	Energia Fornecida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	6,5233	14,80	6,5233	10,24
Geração Eólica	30,7624	69,80	31,2186	49,01
BESS Out	6,7813	15,40	25,9540	40,75
Total	44,0670	100,00	63,6959	100,00
Descrição	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)	Energia Consumida/ Absorvida (kWh)	(%)
Carga Total	43,6863	-	43,6863	-
Carga Atendida	43,6863	100,00*	43,6863	100,00*
Corte de Carga	0,0	0,0*	0,0	0,0
BESS In	0,3807	0,73**	0,069	0,097**
Total	44,0670	100,00	43,7553	100,00
Descrição	Energia Comercializada (kWh)	(%)	Energia Comercializada (kWh)	(%)
Compra da MR1	0,0	0,0	0,0	0,0
Compra da MR2	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR1	0,0	0,0	0,0	0,0
Venda para MR2	0,0	0,0	19,9406	100,00
Total	0,0	0,0	19,9406	100,00
Descrição	Energia Vertida (kWh)	(%)	Energia Vertida (kWh)	(%)
Geração Fotovoltaica	0,0	0,0	0,0	0,0
Geração Eólica	8,1819	100,00	7,7257	100,00
Total	8,1819	100,00	7,7257	100,00

*Em relação à demanda total;

**Em relação à energia consumida/armazenada total.

Do ponto de vista financeiro, a interconexão entre diversas microrredes em um *cluster* possibilita a geração de receitas através da comercialização do excesso de geração que, sem ter onde ser utilizada, seria transformada em energia vertida, como apresentado na Subseção 4.4.3. Para o caso da microrrede com déficit de geração, o operador do sistema da MR deverá avaliar qual o objetivo principal de sua operação, podendo optar pelo atendimento integral de suas cargas visando sua segurança operativa, ou decidir pela economia e realizar o gerenciamento pelo lado da demanda, escolhendo quais cargas seriam cortadas. De forma a comparar o desempenho individual de cada microrrede operando ilhada e de forma colaborativa, as Tabelas 4.14 4.15 e apresentam os dados de desempenho das microrredes para os diferentes intervalos de operação simulados.

Tabela 4.14 – Comparação de desempenho das microrredes no período entre às 5h e 11h.

Microrrede	Ilhada			Colaborativa		
	κ_i	\mathcal{R}_i	Energia Vertida (kWh)	κ_i	\mathcal{R}_i	Energia Vertida (kWh)
1	1,0	∞	61,3221	1,0	∞	49,1485
2	0,7159	0,08214	0,0	1,0	∞	0,0
3	1,0	∞	50,9797	1,0	∞	50,9797

Tabela 4.15 – Comparação de desempenho das microrredes no período entre às 14h e 20h.

Microrrede	Ilhada			Colaborativa		
	κ_i	\mathcal{R}_i	Energia Vertida (kWh)	κ_i	\mathcal{R}_i	Energia Vertida (kWh)
1	1,0	∞	21,9191	1,0	∞	15,1899
2	0,3123	0,02489	0,0	1,0	∞	0,0
3	1,0	∞	8,1819	1,0	∞	7,7257

Os termos apresentados nas Tabelas 4.14 e 4.15 que indicam resiliência infinita são apenas teóricos e dizem respeito às microrredes que conseguiram alimentar todas as suas cargas. Com a operação colaborativa para o intervalo entre às 5h e 11h, a microrrede 2 apresentou aumento no índice de atendimento às cargas, passando de 0,7159 para 1 e, conseqüentemente, melhorando sua resiliência. Para o período das 14h às 20h, o impacto no índice de atendimento às se mostrou ainda maior, passando de 0,3123 para 1. A operação colaborativa contribuiu também para a diminuição dos montantes de energia vertida, com a geração de benefícios financeiros para os agentes com capacidade de exportação de energia. Neste sentido, pode ser observado que uma multimicrorrede possui benefícios tanto na operação, como no caso do aumento da segurança operativa, quanto no âmbito financeiro, por meio da geração de receitas para as microrredes que exportarem energia.

4.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados da operação isolada e colaborativa de três microrredes baseadas em fontes renováveis. Para tal, foram consideradas diferentes capacidades de geração instaladas em cada microrrede, a fim de verificar a forma que cada uma iria se comportar em cada cenário. Ademais, foram escolhidos dois intervalos horários distintos em um dia de operação, de forma a observar a influência do horário de ocorrência do evento destrutivo.

Foram definidos dois cenários de mercado: **1)** comercialização apenas do excesso de geração e **2)** comercialização também da energia contida nos sistemas de armazenamento. No primeiro cenário, o intervalo horário de ocorrência do evento impacta diretamente na capacidade de exportação de energia, devido à dependência da radiação solar pela fonte fotovoltaica, fazendo com que em determinados momentos do dia não haja excesso de geração. Além disso, uma MR que seja exclusivamente composta pela fonte FV ficará mais vulnerável. A possibilidade de comercialização da energia do BESS traz consigo flexibilidade e confiabilidade à multimicrorrede. Entretanto, deve-se haver um bom gerenciamento energético para que a venda da energia armazenada não acarrete na possibilidade de déficit energético da MR exportadora.

A operação colaborativa entre as microrredes constituintes do *cluster* trouxe benefícios em diferentes esferas, como operacional e econômica. No contexto operacional, contribui com o aumento da confiabilidade e resiliência, como demonstrado através dos índices apresentados (Equações 4.12 e 4.16), uma vez que a interconexão entre diversas microrredes permite que o excesso de geração de uma MR possa ser escoado para uma vizinha que esteja com déficit em suas fontes no mesmo período, evitando a necessidade do corte de carga. No âmbito econômico, torna possível a geração de receitas através da comercialização do excesso de energia, que na operação interligada seria transformada em energia vertida.

CONCLUSÕES

Nesta dissertação, foram exploradas as microrredes colaborativas – ou multi-microrredes – evidenciando seu potencial para contribuir mutuamente para uma operação segura e econômica. Demonstrou-se de maneira inequívoca que a operação colaborativa proporciona às microrredes e a seus usuários uma flexibilidade de escolha em termos de tarifas de energia e na avaliação do serviço elétrico de cada microrrede para melhor atender a seus clientes internos.

Durante a operação ilhada, é fundamental avaliar os indicadores de custos e de confiabilidade na operação de cada microrrede, considerando os interesses específicos de cada uma. Adicionalmente, as incertezas associadas à geração de energia, especialmente com fontes renováveis, podem levar a situações onde a demanda excede a oferta, resultando potencialmente em cortes de carga. Para mitigar esses riscos operacionais, a operação colaborativa entre microrredes se apresenta como uma solução promissora para aumentar a resiliência e a confiabilidade do sistema elétrico. Essa estratégia permite que o excedente de geração de uma microrrede possa ser compartilhado ou vendido a outra que esteja enfrentando um déficit de geração.

Nesse contexto, vislumbra-se uma tendência para que o sistema elétrico evolua para um amplo “cluster” de microrredes que, de forma estratégica, podem operar tanto de maneira autônoma quanto interconectadas, formando subconjuntos de acordo com os objetivos operacionais. Essa abordagem não só promove uma maior eficiência na distribuição e utilização da energia, mas também facilita a integração de fontes de energia renováveis, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável. Ao operar de maneira coordenada, as microrredes podem otimizar o atendimento às demandas de energia, enquanto minimizam os custos operacionais e maximizam a confiabilidade do sistema, favorecendo um cenário energético mais estável e resiliente.

Os estudos de caso desenvolvidos no presente trabalho ajudaram a evidenciar o potencial que a operação de microrredes interligadas possui para a melhoria da segurança operativa de todos os constituintes de um *cluster* de microrredes, bem como sua viabilidade econômica. Ao realizar a comparação entre os resultados da operação ilhada e colaborativa, é possível mensurar os ganhos econômicos, como a redução de custos e maximização da receita, e operacionais, como aumento da resiliência e melhorias na utilização efetiva das fontes renováveis e da infraestrutura. Os tipos de fontes presentes na microrrede, o período do dia e o tempo de duração do ilhamento são fatores determinantes para a avaliação do desempenho da operação. A diversificação e complementariedade entre as fontes presentes contribui para a diminuição dos riscos de insuficiência de geração, pois em um momento de baixa geração de um tipo de fonte, a outra pode atuar de forma a manter o fornecimento de energia. Em microrredes com apenas um tipo de fonte, a operação colaborativa apresenta maiores impactos nos índices de atendimento às cargas, enquanto nas microrredes com maior diversidade na geração, contribui com a geração de receitas devido à possibilidade do escoamento do excesso de geração.

Na operação de uma multimicrorrede são constatados benefícios para todas as microrredes constituintes do *cluster*. Cada microrrede pode valorar seus objetivos de maneira distinta, podendo determinar se o seu principal objetivo é econômico, através da minimização de custos e geração de receitas, ou operacional, através da garantia na continuidade do serviço. Para aquelas que objetivam a geração de receitas e possuem excesso de energia, há a possibilidade de escoamento do excedente para microrredes vizinhas. Além disso, para aquelas que valoram a continuidade de serviço, a possibilidade de intercâmbio pode prover segurança operativa através da compra de energia de outra microrrede do *cluster*. Desta forma, a interligação entre microrredes apresenta vantagens para todos os envolvidos neste modelo de negócio.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Simular eventos internos destrutivos de diferentes escalas nas microrredes e mensurar sua resiliência interna em operação isolada e colaborativa;
- Considerar o tempo de recuperação no índice de resiliência do sistema;
- Modelar a operação colaborativa considerando as equações que regem o funcionamento das baterias, incluindo seu tempo de vida útil;
- Considerar diferentes tarifas de acordo com as janelas de comercialização de energia;

- Considerar o congestionamento dos alimentadores de conexão entre as microrredes;
- Resolver o problema da função multiobjetivo através de diferentes técnicas, tanto matemáticas quanto metaheurísticas, e avaliar o desempenho de diferentes métodos;
- Considerar a presença de cargas críticas e não críticas.

5.2 Artigos Associados à Dissertação

CUNHA, P. H.; SAAVEDRA, O. R.; OLIVEIRA, D. Q. Critical Review of Multi-Microgrids. In: **2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, pp. 443-450, São Bernardo do Campo, Brasil, 2023, <doi:10.1109/INDUSCON58041.2023.10374924>.

REFERÊNCIAS

- 1 YOUNESI, A.; SHAYEGHI, H.; WANG, Z.; SIANO, P.; MEHRIZI-SANI, A.; SAFARI, A. Trends in modern power systems resilience: State-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, p. 112397, Julho 2022.
- 2 International Energy Agency (IEA). **World Energy Outlook**. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>>. Acesso em 12 de dezembro de 2022.
- 3 RIBEIRO, L. A. de S.; SAAVEDRA, O. R.; LIMA, S. L.; MATOS, J. G. de; BONAN, G. Making isolated renewable energy systems more reliable. **Renewable Energy**, v. 45, p. 221–231, Setembro 2012.
- 4 LIMA, M. A.; MENDES, L. F. R.; MOTHÉ, G. A.; LINHARES, F. G.; CASTRO, M. P. P. de; SILVA, M. G. da; STHEL, M. S. Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: Reaching the goals of the paris agreement in brazil. **Environmental Development**, v. 33, p. 100504, Março 2020.
- 5 MASRUR, H.; SENJYU, T.; ISLAM, R.; KOUZANI, A. K.; MAHMUD, M. A. P. Optimal Operation of Resilient Microgrids During Grid Outages. In: **2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity Eletromagnetic Devices**. [S.l.: s.n.], 2020.
- 6 LIU, G.; OLLIS, T. B.; XIAO, B.; ZHANG, X.; TOMSOVIC, K. Networked Microgrids for Improving Economics and Resiliency. In: **2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)**. [S.l.: s.n.], 2018.
- 7 RIBEIRO, L. A. de S.; SAAVEDRA, O. R.; LIMA, S. L.; MATOS, J. de. Isolated Micro-Grids With Renewable Hybrid Generation: The Case of Lençóis Island. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 2, n. 1, p. 1–11, Janeiro 2011.
- 8 BRANCO, C. A. S. C.; MORAES, F. P.; OLIVEIRA, H. A.; NETO, P. B. L.; SAAVEDRA, O. R.; MATOS, J. G. de; OLIVEIRA, C. B. M.; RIBEIRO, L. A. de S.; OLIVEIRA, A. C.; JÚNIOR, M. F. A.; PINHEIRO, L. de P. A.; CAZO, R. M. Mission Critical Microgrids: The Case of the Alcântara Space Center. **Energies**, v. 15, n. 9, Abril 2022.
- 9 MOHAMMADI, S. Reliability and Economic Indices Assessment in Interconnected Microgrids. In: **7th Iran Wind Energy Conference**. [S.l.: s.n.], 2021.
- 10 GALVAN, E.; MANDAL, P.; SANG, Y. Networked microgrids with roof-top solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 123, p. 106239, Junho 2020.
- 11 LIU, X.; SHAHIDEHPOUR, M.; LI, Z.; LIU, X.; CAO, Y.; BIE, Z. Microgrids for Enhancing the Power Grid Resilience in Extreme Conditions. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, p. 589–597, Março 2017.

- 12 INAMDAR, S.; MOHANTY, R.; CHEN, P.; MAJUMDER, R.; BONGIORNO, M. On Benefits and Challenges of Nested Microgrid. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- 13 WANG, Y.; ROUSIS, A. O.; STRBAC, G. On microgrids and resilience: A comprehensive review on modeling and operational strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110313, Setembro 2020.
- 14 HAMIDIEH, M.; GHASSEMI, M. Microgrids and Resilience: A Review. **IEEE Access**, v. 10, p. 106059–106080, Outubro 2022.
- 15 LIN, Z.; HU, Z.; SONG, Y. Distribution network expansion planning considering n-1 criterion. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 34, n. 3, p. 2476–2478, 2019.
- 16 SUPPASRI, A.; LEELAWAT, N.; LATCHAROTE, P.; ROEBER, V.; YAMASHITA, K.; HAYASHI, A.; OHIRA, H.; FUKUI, K.; HISAMATSU, A.; NGUYEN, D.; IMAMURA, F. The 2016 fukushima earthquake and tsunami: Local tsunami behavior and recommendations for tsunami disaster risk reduction. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 21, p. 323–330, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221242091630807X>>.
- 17 SIEBENECK, L.; III, R. S.; KUENANZ, B.-J.; LEE, S.; BENEDICT, B. C.; JARVIS, C. M.; UKKUSURI, S. V. Returning home after superstorm sandy: phases in the return-entry process. **Natural Hazards**, v. 101, p. 195–215, 2020.
- 18 KWASINSKI, A. Quantitative model and metrics of electrical grids' resilience evaluated at a power distribution level. **Energies**, v. 9, n. 2, 2016.
- 19 International Energy Agency (IEA). **Cybersecurity – is the power system lagging behind?** 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/commentaries/cybersecurity-is-the-power-system-lagging-behind>>. Acesso em 11 de outubro de 2023.
- 20 ALAM, M. N.; CHAKRABARTI, S.; GHOSH, A. Networked Microgrids: State-of-the-Art and Future Perspectives. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 3, p. 1238–1250, Março 2019.
- 21 CUNNINGHAM, J. J.; PASERBA, J. Distributed Generation in 1900?: How the Edison Co. of New York Met Short-Term Needs [History]. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 20, n. 6, p. 82–89, 2022.
- 22 NAG, S. K.; GANGOPADHYAY, T. K.; PASERBA, J. Solar Photovoltaics: A Brief History of Technologies [History]. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 20, n. 3, p. 77–85, 2022.
- 23 The Guardian. **Timeline: The history of wind power.** 2008. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>>. Acesso em 11 de outubro de 2023.
- 24 CAO, J.; SHI, Y.; ZHANG, H. Wind Energy: History, Current Design Principles, Market Penetration, Environmental Impacts. In: **2021 International Conference on Control Science and Electric Power Systems (CSEPS)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 398–405.
- 25 HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 402–411, Julho 2018.

- 26 TANG, Z.; YANG, Y.; BLAABJERG, F. Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration. In: **CSEE Journal of Power and Energy Systems**. [S.l.: s.n.], 2022. v. 8, n. 1, p. 39–52.
- 27 TON, D. T.; SMITH, M. A. The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. **The Electricity Journal**, v. 25, n. 8, p. 84–94, Outubro 2012.
- 28 LASSETER, B. Microgrids [distributed power generation]. In: **2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 146–149.
- 29 PULLINS, S. Why microgrids are becoming an important part of the energy infrastructure. **The Electricity Journal**, v. 32, p. 17–21, Junho 2019.
- 30 CHARTIER, S. L.; VENKITESWARAN, V. K.; RANGARAJAN, S. S.; COLLINS, E. R.; SENJYU, T. Microgrid Emergence, Integration, and Influence on the Future Energy Generation Equilibrium—A Review. **Electronics**, v. 11, n. 5, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/11/5/791>>.
- 31 MARTIN-MARTÍNEZ, F.; SÁNCHEZ-MIRALLES, A.; RIVIER, M. A literature review of microgrids: A functional layer based classification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1133–1153, Setembro 2016.
- 32 DESAI, A.; MUKHOPADHYAY, I.; RAY, A. Solar pv-hydropower enhanced picogrid as sustainable energy model for hilly remote areas: analytics and prospects thereof. **Energy Informatics**, v. 6, Setembro 2023.
- 33 DALY, C. J.; MOORE, D. L.; HADDAD, R. J.; SPECHT, A.; NEAL, S. PicoGrid Smart Home Energy Management System. In: **SoutheastCon 2018**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3.
- 34 DONG, D.; LUO, F.; ZHANG, X.; BOROYEVICH, D.; MATTAVELLI, P. Grid-interface bidirectional converter for residential dc distribution systems—part 2: Ac and dc interface design with passive components minimization. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, n. 4, p. 1667–1679, 2013.
- 35 JIE, L. R.; NAAYAGI, R. T. Nanogrid for energy aware buildings. In: **2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 92–96.
- 36 SETIAWAN, E. A.; ADITA, N. Hybrid nanogrids development to improve residential reliability and resiliency supply: Testing and implementation. **Energy Reports**, v. 8, p. 284–290, 2022. ISSN 2352-4847. The 8th International Conference on Energy and Environment Research –“Developing the World in 2021 with Clean and Safe Energy”. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722000609>>.
- 37 SANTORO, D.; DELMONTE, N.; SIMONAZZI, M.; TOSCANI, A.; ROCCHI, N.; SOZZI, G.; COVA, P.; MENOZZI, R. Local Power Distribution - A Review of Nanogrid Architectures, Control Strategies, and Converters. **Sustainability**, v. 15, n. 3, 2023. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2759>>.
- 38 HOSSAIN, E.; KABALCI, E.; BAYINDIR, R.; PEREZ, R. Microgrid testbeds around the world: State-of-art. **Energy Conversion and Management**, v. 86, p. 132–153, Outubro 2014.

- 39 MARIAM, L.; BASU, M.; CONLON, M. F. A Review of Existing Microgrid Architectures. **Journal of Engineering**, v. 2013, 2013.
- 40 PLANAS, E.; MURO, A. G. de; ANDREU, J.; KORTABARRIA, I.; Martínez de Alegría, I. General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 17, p. 147–159, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005333>>.
- 41 HONG, Y.-Y.; LAI, Y.-Z.; HSIAO, M.-C.; CHANG, Y.-R.; LEE, Y.-D.; HUANG, H.-C. Studies on operation modes for the first outdoor microgrid test bed in taiwan. In: **2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.
- 42 GELANI, H. E.; DASTGEER, F.; NASIR, M.; KHAN, S.; GUERRERO, J. M. AC vs. DC Distribution Efficiency: Are We on the Right Path? **Energies**, v. 14, n. 13, 2021. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/4039>>.
- 43 OLIVEIRA, H. A.; RIBEIRO, L. A. de S.; MATOS, J. G. de; MENDEZ, O. R. S.; ASSUNÇÃO, M. P. F. de. Hybrid dc and ac power distribution network as an alternative solution for isolated microgrids. In: **2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- 44 CALVILLO, C.; SÁNCHEZ-MIRALLES, A.; VILLAR, J. Assessing low voltage network constraints in distributed energy resources planning. **Energy**, v. 84, p. 783–793, 2015. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215003382>>.
- 45 DOAGOU-MOJARRAD, H.; GHAREHPETIAN, G.; RASTEGAR, H.; OLAMAEI, J. Optimal placement and sizing of dg (distributed generation) units in distribution networks by novel hybrid evolutionary algorithm. **Energy**, v. 54, p. 129–138, 2013. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213000716>>.
- 46 SOROUDI, A.; EHSAN, M. A distribution network expansion planning model considering distributed generation options and techno-economical issues. **Energy**, v. 35, n. 8, p. 3364–3374, 2010. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210002148>>.
- 47 MANANDHAR, U.; ZHANG, X.; BENG, G. H.; SUBRAMANIAN, L.; LU, H. H.; FERNANDO, T. Enhanced energy management system for isolated microgrid with diesel generators, renewable generation, and energy storages. **Applied Energy**, v. 350, p. 121624, 2023. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923009881>>.
- 48 AMEEN, A. M.; PASUPULETI, J.; KHATIB, T. Simplified performance models of photovoltaic/diesel generator/battery system considering typical control strategies. **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 313–325, 2015. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415003787>>.
- 49 NETO, P. B. L.; SAAVEDRA, O. R.; RIBEIRO, L. A. de S. A dual-battery storage bank configuration for isolated microgrids based on renewable sources. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 9, n. 4, p. 1618–1626, 2018.

- 50 ALMEIDA, I. A.; SAAVEDRA, O. R.; OLIVEIRA, D. Q. Fast decoupled power flow for stand-alone ac microgrids with droop control. In: **2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–5.
- 51 ZHAO, J.; ZHANG, J.; ZHANG, L.; LIU, Y.; GUO, L. Voltage resilience improvement strategy for off-grid microgrid based on power flow mapping model. **Electric Power Systems Research**, v. 225, p. 109863, 2023. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623007514>>.
- 52 DONG, W.; SUN, H.; MEI, C.; LI, Z.; ZHANG, J.; YANG, H.; DING, Y. Stochastic optimal scheduling strategy for a campus-isolated microgrid energy management system considering dependencies. **Energy Conversion and Management**, v. 292, p. 117341, Setembro 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423006878>>.
- 53 YANG, J.; SUN, Q.; YAO, L.; LIU, Y.; YANG, T.; CHU, C.; FANG, L.; ZHU, L. A novel dynamic load-priority-based scheduling strategy for home energy management system. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, p. 135978, Fevereiro 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623001361?via%3Dihub>>.
- 54 CAU, G.; COCCO, D.; PETROLLESE, M.; Kær, S. K.; MILAN, C. Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 820–831, Novembro 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414007171?via%3Dihub>>.
- 55 PARAG, Y.; AINSPAN, M. Sustainable microgrids: Economic, environmental and social costs and benefits of microgrid deployment. **Energy for Sustainable Development**, v. 52, p. 72–81, Outubro 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082619309597?via%3Dihub>>.
- 56 RUÓTOLO, M. A. **A Social Cost-Benefit Analysis of Community Microgrid Systems in New York State**. Tese (Doutorado) — University of Delaware, 2018.
- 57 UDDIN, M.; MO, H.; DONG, D.; ELSAWAH, S.; ZHU, J.; GUERRERO, J. M. Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. **Energy Strategy Reviews**, v. 49, p. 101127, 2023. ISSN 2211-467X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X23000779>>.
- 58 Microgrid Knowledge. **Microgrid Benefits: Eight Ways a Microgrid will Improve your Operation and the World**. 2022. Acesso em 6 de novembro de 2023. Disponível em: <<https://www.microgridknowledge.com/about-microgrids/article/11430613/microgrid-benefits-eight-ways-a-microgrid-will-improve-your-operation-and-the-world>>.
- 59 POLLEUX, L.; GUERASSIMOFF, G.; MARMORAT, J.-P.; SANDOVAL-MORENO, J.; SCHUHLER, T. An overview of the challenges of solar power integration in isolated industrial microgrids with reliability constraints. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 155, p. 111955, 2022. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212101220X>>.
- 60 BEBIC, J. **Power system planning: Emerging practices suitable for evaluating the impact of high-penetration photovoltaics**. [S.l.], 2011.

- 61 CUNHA, P. H.; SAAVEDRA, O. R.; OLIVEIRA, C. B. M.; OLIVEIRA, D. Q.; JR, G. S. da S. Análise de Rampas de Geração Fotovoltaica de Grande Escala. In: **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. [S.l.: s.n.], 2022. v. 2, n. 1.
- 62 JURASZ, J.; CANALES, F.; KIES, A.; GUEZGOUZ, M.; BELUCO, A. A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. **Solar Energy**, v. 195, p. 703–724, 2020. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19311831>>.
- 63 de Oliveira Costa Souza Rosa, C.; da Silva Christo, E.; COSTA, K. A.; SANTOS, L. dos. Assessing complementarity and optimising the combination of intermittent renewable energy sources using ground measurements. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120946, 2020. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620309938>>.
- 64 NETO, P. B. L.; SAAVEDRA, O. R.; OLIVEIRA, D. Q. The effect of complementarity between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids. **Renewable Energy**, v. 147, p. 339–355, 2020. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119313217>>.
- 65 Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012**. 2012. Acesso em 03 de janeiro de 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>.
- 66 Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa N° 571, de 23 de julho de 2013**. 2013. Acesso em 03 de janeiro de 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013571.pdf>>.
- 67 Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015**. 2015. Acesso em 03 de janeiro de 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>.
- 68 SACHS, T.; GRÜNDLER, A.; RUSIC, M.; FRIDGEN, G. Framing microgrid design from a business and information systems engineering perspective. **Business Information Systems Engineering**, v. 61, n. 6, p. 729–744, 2019.
- 69 Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa n° 1.059 de 7 de fevereiro de 2023**. Acesso em 20 de novembro de 2023. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>>.
- 70 LUNA, M. A. R.; CUNHA, F. B. F.; MOUSINHO, M. C. A. de M.; TORRES, E. A. Solar photovoltaic distributed generation in brazil: The case of resolution 482/2012. **Energy Procedia**, v. 159, p. 484–490, 2019. ISSN 1876-6102. Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218313316>>.
- 71 NETO, J. C. de S. A.; TORRES, P. F.; MANITO, A. R. A.; PINHO, J. T.; ZILLES, R. A comparison study of grid impact of photovoltaic installations in brazil according to normative resolution 482 and federal law 14.300. **Energy Policy**, v. 181, p. 113699, 2023. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523002847>>.

- 72 Presidência da República. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. 2022. Acesso em 03 de janeiro de 2024. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm>.
- 73 MARTINS, M. A. I.; FERNANDES, R.; HELDWEIN, M. L. Proposals for regulatory framework modifications for microgrid insertion—the brazil use case. **IEEE Access**, v. 8, p. 94852–94870, 2020.
- 74 New York State Energy Research and Development Authority. **Microgrids: An Assessment of the Value, Opportunities and Barriers to Deployment in New York State**. 2010.
- 75 WOUTERS, C. Towards a regulatory framework for microgrids - the Singapore experience. **Sustainable Cities and Society**, v. 15, p. 22–32, 2015.
- 76 ALI, A.; LI, W.; HUSSAIN, R.; HE, X.; WILLIAMS, B. W.; MEMON, A. H. Overview of current microgrid policies, incentives and barriers in the european union, united states and china. **Sustainability**, v. 9, n. 7, 2017. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/7/1146>>.
- 77 GUIBENTIF, T. M. M.; VUILLE, F. Prospects and barriers for microgrids in switzerland. **Energy Strategies Reviews**, v. 39, p. 100776, 2022.
- 78 KIM, H. A community energy transition model for urban areas: The energy self-reliant village program in seoul, south korea. **Sustainability**, v. 9, n. 7, 2017.
- 79 YUAN, C.; LAI, K.; ILLINDALA, M. S.; HAJ-AHMED, M. A.; KHALSA, A. S. Multi-layered protection strategy for developing community microgrids in village distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 1, p. 495–503, 2017.
- 80 KACZMARSKI, J. I. Public support for community microgrid service. **Energy Economics**, v. 115, p. 106344, 2022.
- 81 CHE, L.; ZHANG, X.; SHAHIDEHPOUR, M.; ALABDULWAHAB, A.; ABUSORRAH, A. Optimal interconnection planning of community microgrids with renewable energy sources. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 3, p. 1054–1063, 2017.
- 82 CHE, L.; SHAHIDEHPOUR, M.; ALABDULWAHAB, A.; AL-TURKI, Y. Hierarchical coordination of a community microgrid with ac and dc microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 6, p. 3024–3051, 2015.
- 83 GUAN, Y.; WEI, B.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; GUI, Y. An overview of the operation architectures and energy management system for multiple microgrid clusters. **iEnergy**, v. 1, n. 3, p. 306–314, 2022.
- 84 BACKHAUS, S. N.; DOBRIANSKY, L.; GLOVER, S.; LIU, C.-C.; LOONEY, P.; MASHAYEKH, S.; PRATT, A.; SCHNEIDER, K.; STADLER, M.; STARKE, M.; WANG, J.; YUE, M. **Networked microgrids scoping study**. 2016. Los Alamos National Laboratory. Acesso em 04 de janeiro de 2024. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1334654>>.
- 85 LIU, G.; STARKE, M. R.; OLLIS, B.; XUE, Y. **Networked microgrids scoping study**. 2016. Oak Ridge National Laboratory.

- 86 HAN, Y.; ZHANG, K.; LI, H.; COELHO, E. A. A.; GUERRERO, J. M. Mas-based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: A comprehensive overview. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 8, p. 6488–6508, 2018.
- 87 HUSSAIN, A.; BUI, V.-H.; KIM, H.-M. Resilience-oriented optimal operation of networked hybrid microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 1, p. 204–215, 2019.
- 88 LI, Y.; ZHANG, P.; LUH, P. B. Formal analysis of networked microgrids dynamics. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 3, p. 3418–3427, 2018.
- 89 ALAM, M. N.; DAS, B.; PANT, V. An interior point method based protection coordination scheme for directional overcurrent relays in meshed networks. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 81, p. 153–164, 2016. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515300053>>.
- 90 HUSSAIN, A.; BUI, V.-H.; KIM, H.-M. A resilient and privacy-preserving energy management strategy for networked microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 3, p. 2127–2139, 2018.
- 91 ABHINAV, S.; MODARES, H.; LEWIS, F. L.; FERRESE, F.; DAVOUDI, A. Synchrony in networked microgrids under attacks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 6, p. 6731–6741, 2018.
- 92 ISLAM, M.; YANG, F.; AMIN, M. Control and optimisation of networked microgrids: A review. **IET Renewable Power Generation**, v. 15, n. 6, p. 1133–1148, 2021.
- 93 XU, Z.; YANG, P.; ZHANG, Y.; ZENG, Z.; ZHENG, C.; PENG, J. Control devices development of multi-microgrids based on hierarchical structure. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 16, p. 3971–4256, 2016.
- 94 PARISIO, A.; WIEZOREK, C.; KYNTÄJÄ, T.; ELO, J.; STRUNZ, K.; JOHANSSON, K. H. Cooperative mpc-based energy management for networked microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 6, p. 3066–3074, 2017.
- 95 WANG, C.; YANG, P.; YE, C.; WANG, Y.; XU, Z. Voltage control strategy for three/single phase hybrid multimicrogrid. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 31, n. 4, p. 1498–1509, 2016.
- 96 JOHN, T.; LAM, S. P. Voltage and frequency control during microgrid islanding in a multi-area multi-microgrid system. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 11, n. 6, p. 1502–1512, 2017.
- 97 LIU, T.; TAN, X.; SUN, B.; WU, Y.; TSANG, D. H. Energy management of cooperative microgrids: A distributed optimization approach. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 96, p. 335–346, 2018. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061517300133>>.
- 98 ARIF, A.; WANG, Z. Networked microgrids for service restoration in resilient distribution systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 11, n. 14, p. 3439–3653, 2017.

- 99 CHOUBINEH, M.; SILVA-ORTIZ, D.; MOHAGHEGHI, S. An automation scheme for emergency operation of a multi-microgrid industrial park. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 6, p. 6450–6459, 2018.
- 100 HUSSAIN, A.; BUI, V.-H.; KIM, H.-M. Robust optimization-based scheduling of multi-microgrids considering uncertainties. **Energies**, v. 9, n. 4, 2016. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/9/4/278>>.
- 101 YUAN, W.; ZHAO, L.; ZENG, B. Optimal power grid protection through a defender–attacker–defender model. **Reliability Engineering System Safety**, v. 121, p. 83–89, 2014. ISSN 0951-8320. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183201300238X>>.
- 102 YUAN, W.; WANG, J.; QIU, F.; CHEN, C.; KANG, C.; ZENG, B. Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 6, p. 2817–2826, 2016.
- 103 CHOWDHURY, A. H.; ASADUZ-ZAMAN, M. Load Frequency Control of Multi-Microgrid Using Energy Storage System. In: **8th International Conference on Electrical and Computer Engineering**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 548–551.
- 104 KAMPEZIDOU, S.; VASIOS, O.; MELIOPOULOS, S. Multi-Microgrid Architecture: Optimal Operation and Control. In: **2018 North American Power Symposium (NAPS)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.
- 105 SAHA, D.; BAZMOHAMMADI, N.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Multiple microgrids: A review of architectures and operation and control strategies. **Energies**, v. 16, n. 2, 2023. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/600>>.
- 106 ZOU, H.; MAO, S.; WANG, Y.; ZHANG, F.; CHEN, X.; CHENG, L. A survey of energy management in interconnected multi-microgrids. **IEEE Access**, v. 7, p. 72158–72169, 2019.
- 107 SEN, S.; KUMAR, V. Microgrid control: A comprehensive survey. **Annual Reviews in Control**, v. 45, p. 118–151, 2018. ISSN 1367-5788. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578818300373>>.
- 108 BIDRAM, A.; DAVOUDI, A. Hierarchical structure of microgrids control system. **IEEE Transaction on Smart Grids**, v. 3, n. 4, p. 1963–1976, 2012.
- 109 OUAMMI, A.; DAGDOUGUI, H.; DESSAINT, L.; SACILE, R. Coordinated model predictive-based power flows control in a cooperative network of smart microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 5, p. 2233–2244, 2015.
- 110 NI, J.; AI, Q. Economic power transaction using coalitional game strategy in micro-grids. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 1, p. 10–18, 2016. Disponível em: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-gtd.2014.1084>>.
- 111 DU, Y.; WANG, Z.; LIU, G.; CHEN, X.; YUAN, H.; WEI, Y.; LI, F. A cooperative game approach for coordinating multi-microgrid operation within distribution systems. **Applied Energy**, v. 222, p. 383–395, 2018. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918304240>>.

- 112 RAHBAR, K.; CHAI, C. C.; ZHANG, R. Real-time energy management for cooperative microgrids with renewable energy integration. In: **2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 25–30.
- 113 NGUYEN, H. K.; KHODAEI, A.; HAN, Z. A big data scale algorithm for optimal scheduling of integrated microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 1, p. 274–282, 2018.
- 114 LI, Y.; ZHAO, T.; WANG, P.; GOOI, H. B.; WU, L.; LIU, Y.; YE, J. Optimal operation of multimicrogrids via cooperative energy and reserve scheduling. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 14, n. 8, p. 3459–3468, 2018.
- 115 KOU, P.; LIANG, D.; GAO, L. Distributed empc of multiple microgrids for coordinated stochastic energy management. **Applied Energy**, v. 185, p. 939–952, 2017. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916313964>>.
- 116 ZAMORA, R.; SRIVASTAVA, A. K. Multi-layer architecture for voltage and frequency control in networked microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 3, p. 2076–2085, 2018.
- 117 AL-ATTIYAH, S.; MAJUMDER, R. Nested Microgrids: Operation and Control Requirements. In: **CIRED 2018 Ljubljana Workshop on Microgrids and Local Energy Communities**. [s.n.], 2018. Acesso em 02 de janeiro de 2024. Disponível em: <<https://www.cired-repository.org/handle/20.500.12455/1054>>.
- 118 GOLSORKHI, M. S.; HILL, D. J.; KARSHENAS, H. R. Distributed voltage control and power management of networked microgrids. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 6, n. 4, p. 1892–1902, 2018.
- 119 WEI, C.; FADLULLAH, Z. M.; KATO, N.; STOJMENOVIC, I. A novel distributed algorithm for power loss minimizing in smart grid. In: **2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 290–295.
- 120 NETO, P. B. L. **Contribuições para a Operação Energética e Econômica de Microrredes Isoladas com Fontes Renováveis Diversificadas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Maranhão, 2017.
- 121 JIANG, W.; YANG, K.; YANG, J.; XUE, N.; ZHUO, Z. Energy management strategy for maximization of renewable energy consumption in multi-microgrids. In: **2019 6th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 325–329.
- 122 DIN, E. D.; JOGLEKAR, C.; LIPARI, G.; PONCI, F.; MONTI, A. An emergency energy management system for microgrid restoration after blackout. In: **2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.
- 123 SALINAS, S.; LI, M.; LI, P.; FU, Y. Dynamic energy management for the smart grid with distributed energy resources. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 4, n. 4, p. 2139–2151, 2013.

- 124 TUSHAR, W.; CHAI, B.; YUEN, C.; SMITH, D. B.; WOOD, K. L.; YANG, Z.; POOR, H. V. Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 4, p. 2487–2498, 2015.
- 125 WU, Y.; LAU, V. K. N.; TSANG, D. H. K.; QIAN, L. P.; MENG, L. Optimal energy scheduling for residential smart grid with centralized renewable energy source. **IEEE Systems Journal**, v. 8, n. 2, p. 562–576, 2014.
- 126 SONG, I.-K.; JUNG, W.-W.; KIM, J.-Y.; YUN, S.-Y.; CHOI, J.-H.; AHN, S.-J. Operation schemes of smart distribution networks with distributed energy resources for loss reduction and service restoration. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 4, n. 1, p. 367–374, 2013.
- 127 DING, Y. M.; HONG, S. H.; LI, X. H. A demand response energy management scheme for industrial facilities in smart grid. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 4, p. 2257–2269, 2014.
- 128 RAHIMIYAN, M.; BARINGO, L.; CONEJO, A. J. Energy management of a cluster of interconnected price-responsive demands. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 2, p. 645–655, 2014.
- 129 LIU, Y.; YUEN, C.; HUANG, S.; HASSAN, N. U.; WANG, X.; XIE, S. Peak-to-average ratio constrained demand-side management with consumer's preference in residential smart grid. **IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing**, v. 8, n. 6, p. 1084–1097, 2014.
- 130 ZHAO, Z.; LEE, W. C.; SHIN, Y.; SONG, K.-B. An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 4, n. 3, p. 1391–1400, 2013.
- 131 KHAVARI, F.; BADRI, A.; ZANGENEH, A.; SHAFIEKHANI, M. A comparison of centralized and decentralized energy-management models of multi-microgrid systems. In: **2017 Smart Grid Conference (SGC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- 132 AREFIFAR, S. A.; ORDONEZ, M.; MOHAMED, Y. A.-R. I. Energy management in multi-microgrid systems—development and assessment. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 2, p. 910–922, 2017.
- 133 SHEIKHAHMADI, P.; BAHRAMARA, S.; SHAHROKHI, S.; CHICCO, G.; MAZZA, A.; CATALÃO, J. P. S. Modeling local energy market for energy management of multi-microgrids. In: **2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- 134 KARIMI, H.; GHAREHPETIAN, G.; AHMADIAHANGAR, R.; ROSIN, A. Optimal energy management of grid-connected multi-microgrid systems considering demand-side flexibility: A two-stage multi-objective approach. **Electric Power Systems Research**, v. 214, p. 108902, 2023. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622009531>>.
- 135 MARZAL, S.; GONZÁLEZ-MEDINA, R.; SALAS-PUENTE, R.; FIGUERES, E.; GARCERÁ, G. A novel locality algorithm and peer-to-peer communication infrastructure for optimizing network performance in smart microgrids. **Energies**, v. 10, n. 9, 2017. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/9/1275>>.

- 136 GONG, C.; ZENG, S.; LI, X.; CHEN, P.; DING, Y.; LIU, C.; JIANG, L. A brief view on energy management of multi-microgrid systems: Framework, communication technologies, and dispatching strategies. In: **2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 677–683.
- 137 ZHOU, B.; ZOU, J.; CHUNG, C. Y.; WANG, H.; LIU, N.; VOROPAI, N.; XU, D. Multi-microgrid energy management systems: Architecture, communication, and scheduling strategies. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 9, n. 3, p. 463–476, 2021.
- 138 MARZAL, S.; SALAS, R.; GONZÁLEZ-MEDINA, R.; GARCERÁ, G.; FIGUERES, E. Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3610–3622, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117314703>>.
- 139 WERTH, A.; ANDRÉ, A.; KAWAMOTO, D.; MORITA, T.; TAJIMA, S.; TOKORO, M.; YANAGIDAIRA, D.; TANAKA, K. Peer-to-peer control system for dc microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 4, p. 3667–3675, 2018.
- 140 SALEH, M.; ESA, Y.; MOHAMED, A. A. Communication-based control for dc microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 2, p. 2180–2195, 2019.
- 141 KOUNEV, V.; TIPPER, D.; YAVUZ, A. A.; GRAINGER, B. M.; REED, G. F. A secure communication architecture for distributed microgrid control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 5, p. 2484–2492, 2015.
- 142 YU, J.; NI, M.; JIAO, Y.; WANG, X. Plug-in and plug-out dispatch optimization in microgrid clusters based on flexible communication. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 5, n. 4, p. 663–670, 2017.
- 143 BOROOJENI, K.; AMINI, M. H.; NEJADPAK, A.; DRAGIČEVIĆ, T.; IYENGAR, S. S.; BLAABJERG, F. A novel cloud-based platform for implementation of oblivious power routing for clusters of microgrids. **IEEE Access**, v. 5, p. 607–619, 2017.
- 144 QIU, H.; GU, W.; XU, Y.; WU, Z.; ZHOU, S.; PAN, G. Robustly multi-microgrid scheduling: Stakeholder-parallelizing distributed optimization. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 11, n. 2, p. 988–1001, 2020.
- 145 MAHMOOD, A.; JAVAID, N.; RAZZAQ, S. A review of wireless communications for smart grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 248–260, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007126>>.
- 146 LIN, Z.; HU, Z.; SONG, Y. Distribution network expansion planning considering $n - 1$ criterion. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 34, n. 3, p. 2476–2478, 2019.
- 147 HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, n. 1, p. 1–23, 1973. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>>.
- 148 GHOLAMI, A.; AMINIFAR, F.; SHAHIDEHPOUR, M. Front lines against the darkness: Enhancing the resilience of the electricity grid through microgrid facilities. **IEEE Electrification Magazine**, v. 4, n. 1, p. 18–24, 2016.

- 149 BIE, Z.; LIN, Y.; QIU, A. Concept and research prospects of power system resilience. **Automation of Electric Power Systems**, v. 39, n. 22, p. 1–9, 2015. Disponível em: <<http://www.aeps-info.com/aepsen/article/abstract/20150715007>>.
- 150 CHANDA, S.; SRIVASTAVA, A. K. Defining and enabling resiliency of electric distribution systems with multiple microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 6, p. 2859–2868, 2016.
- 151 DING, T.; LI, C.; YAN, C.; LI, F.; BIE, Z. A bilevel optimization model for risk assessment and contingency ranking in transmission system reliability evaluation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 5, p. 3803–3813, 2017.
- 152 WANG, Z.; CHEN, B.; WANG, J.; KIM, J. Decentralized energy management system for networked microgrids in grid-connected and islanded modes. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 2, p. 1097–1105, 2016.
- 153 WANG, Z.; CHEN, B.; WANG, J.; CHEN, C. Networked microgrids for self-healing power systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 1, p. 310–319, 2016.
- 154 ARIF, A.; WANG, Z. Networked microgrids for service restoration in resilient distribution systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 11, n. 14, p. 3612–3619, 2017.
- 155 WANG, Z.; WANG, J. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 6, p. 3139–3149, 2015.
- 156 SHAHNIA, F.; BOURBOUR, S.; GHOSH, A. Coupling neighboring microgrids for overload management based on dynamic multicriteria decision-making. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 2, p. 969–983, 2017.
- 157 BALASUBRAMANIAM, K.; SARAF, P.; HADIDI, R.; MAKRAM, E. B. Energy management system for enhanced resiliency of microgrids during islanded operation. **Electric Power Systems Research**, v. 137, p. 133–141, 2016. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616301122>>.
- 158 KHODAEI, A. Resiliency-oriented microgrid optimal scheduling. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 4, p. 1584–1591, 2014.
- 159 HUSSAIN, A.; BUI, V.-H.; KIM, H.-M. A proactive and survivability-constrained operation strategy for enhancing resilience of microgrids using energy storage system. **IEEE Access**, v. 6, p. 75495–75507, 2018.
- 160 MISHRA, S.; ANDERSON, K.; MILLER, B.; BOYER, K.; WARREN, A. Microgrid resilience: A holistic approach for assessing threats, identifying vulnerabilities, and designing corresponding mitigation strategies. **Applied Energy**, v. 264, p. 114726, 2020. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920302385>>.
- 161 SALEH, M. S.; ALTHAIBANI, A.; ESA, Y.; MHANDI, Y.; MOHAMED, A. A. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts. In: **2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 195–200.

- 162 WU, L.; LI, J.; EROL-KANTARCI, M.; KANTARCI, B. An integrated reconfigurable control and self-organizing communication framework for community resilience microgrids. **The Electricity Journal**, v. 30, n. 4, p. 27–34, 2017. ISSN 1040-6190. Special Issue: Contemporary Strategies for Microgrid Operation Control. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104061901730060X>>.
- 163 ZHOU, Q.; SHAHIDEHPOUR, M.; ALABDULWAHAB, A.; ABUSORRAH, A. Flexible division and unification control strategies for resilience enhancement in networked microgrids. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 35, n. 1, p. 474–486, 2020.
- 164 TEIMOURZADEH, S.; TOR, O. B.; CEBECI, M. E.; BARA, A.; OPREA, S. V. A three-stage approach for resilience-constrained scheduling of networked microgrids. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 7, n. 4, p. 705–715, 2019.
- 165 YAMAGATA, Y.; MURAKAMI, D.; MINAMI, K.; ARIZUMI, N.; KURODA, S.; TANJO, T.; MARUYAMA, H. Electricity self-sufficient community clustering for energy resilience. **Energies**, v. 9, n. 7, 2016. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/9/7/543>>.
- 166 Mehri Arsoon, M.; MOGHADDAS-TAFRESHI, S. M. Peer-to-peer energy bartering for the resilience response enhancement of networked microgrids. **Applied Energy**, v. 261, p. 114413, 2020. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919321002>>.
- 167 YOUNESI, A.; SHAYEGHI, H.; SAFARI, A.; SIANO, P. A quantitative resilience measure framework for power systems against wide-area extreme events. **IEEE Systems Journal**, v. 15, n. 1, p. 915–922, 2021.
- 168 SHAYEGHI, H.; YOUNESI, A. Resilience metrics development for power systems. In: _____. **Power Systems Resilience: Modeling, Analysis and Practice**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 101–116. ISBN 978-3-319-94442-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94442-5_4>.
- 169 FARZIN, H.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; MOEINI-AGHTAIE, M. Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 6, p. 2869–2879, 2016.
- 170 LI, Z.; SHAHIDEHPOUR, M.; AMINIFAR, F.; ALABDULWAHAB, A.; AL-TURKI, Y. Networked microgrids for enhancing the power system resilience. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 7, p. 1289–1310, 2017.
- 171 ZAMUDA, C. D.; LARSEN, P. H.; COLLINS, M. T.; BIELER, S.; SCHELLENBERG, J.; HEES, S. Monetization methods for evaluating investments in electricity system resilience to extreme weather and climate change. **The Electricity Journal**, v. 32, n. 9, p. 106641, 2019. ISSN 1040-6190. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104061901930185X>>.
- 172 LACOMMARE, K. H.; LARSEN, P. H.; ETO, J. H. **Evaluating Proposed Investments in Power System Reliability and Resilience: Preliminary Results from Interviews with Public Utility Commission Staff**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://emp.lbl.gov/publications/evaluating-proposed-investments-power>>.

- 173 ALLEN, M. R.; WILBANKS, T. J.; PRESTON, B. L.; KAO, S.-C.; BRADBURY, J. Assessing the costs and benefits of resilience investments: Tennessee valley authority case study. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1343538>>.
- 174 BAIK, S.; DAVIS, A. L.; ; MORGAN, M. G. Assessing the cost of large-scale power outages to residential customers. **Risk Analysis**, v. 38, n. 2, 2018.
- 175 SINGH, A. R.; Koteswara Raju, D.; Phani Raghav, L.; Seshu Kumar, R. State-of-the-art review on energy management and control of networked microgrids. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 57, p. 103248, 2023. ISSN 2213-1388. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138823002412>>.
- 176 RAGHAV, L. P.; KUMAR, R. S.; RAJU, D. K.; SINGH, A. R. Optimal energy management of microgrids using quantum teaching learning based algorithm. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 12, n. 6, p. 4834–4842, 2021.
- 177 RAGHAV, L. P.; RANGU, S. K.; DHENUVAKONDA, K. R.; SINGH, A. R. Optimal energy management of microgrids-integrated nonconvex distributed generating units with load dynamics. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 13, 2021.
- 178 RAGHAV, L. P.; KUMAR, R. S.; RAJU, D. K.; SINGH, A. R. Optimal day ahead energy consumption management in grid-connected microgrids. **International Journal of Energy Research**, v. 46, n. 2, 2021.
- 179 GREGORATTI, D.; MATAMOROS, J. Distributed energy trading: The multiple-microgrid case. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 4, p. 2551–2559, 2015.