



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

José Octávio Cesário Pereira Pinto

**SISTEMA DE PROTEÇÃO PARA MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO BASEADO
EM ARQUITETURA MULTIAGENTE CONSIDERANDO A OCORRÊNCIA DE
ILHAMENTOS**

Florianópolis - SC
2021

José Octávio Cesário Pereira Pinto

**SISTEMA DE PROTEÇÃO PARA MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO BASEADO
EM ARQUITETURA MULTIAGENTE CONSIDERANDO A OCORRÊNCIA DE
ILHAMENTOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de doutor
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Miguel Moreto, Dr.

Florianópolis - SC
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pinto, José Octávio Cesário Pereira
SISTEMA DE PROTEÇÃO PARA MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO
BASEADO EM ARQUITETURA MULTIAGENTE CONSIDERANDO A
OCORRÊNCIA DE ILHAMENTOS / José Octávio Cesário Pereira
Pinto ; orientador, Miguel Moreto, 2021.
179 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Proteção de Sistemas
Elétricos de Potência. 3. Microrredes. 4. Geradores de
energia com conexão via conversores estáticos. 5.
Geradores de energia com conexão via conversores
estáticos. I. Moreto, Miguel. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

José Octávio Cesário Pereira Pinto

**SISTEMA DE PROTEÇÃO PARA MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO BASEADO
EM ARQUITETURA MULTIAGENTE CONSIDERANDO A OCORRÊNCIA DE
ILHAMENTOS**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Denis Vinicius Coury, Dr.
Universidade de São Paulo

Prof. Fernando Buzzulini Prioste, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Jomi Fred Hübner, Dr.
Univeridade Federal de Santa Catarina

Prof. Diego Issicaba, Dr.
Univeridade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia Elétrica.

Coordenação do Programa de
Pós-Graduação

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Orientador

Florianópolis - SC, 2021.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, José Roberto e
Leila, aos meus irmãos, José Guilherme e Luisa, e ao
meu filho, Leonardo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Roberto e Leila, por me mostrarem o valor e a importância dos estudos para o meu desenvolvimento pessoal e intelectual. Admiro a dedicação com a qual conquistaram os meios de viabilização das minhas boas condições de estudos. Acredito que a obtenção de êxito no processo de doutoramento está relacionada, não só aos ensinamentos disciplinares e estudantis que me proporcionaram, mas também aos valores e princípios de integridade, ética e altruísmo, que sempre mantiveram presentes ao longo da minha formação, seja em forma verbalizada ou em forma de exemplo. São, sem dúvidas, os principais responsáveis por esta conquista.

Aos meus irmãos, Luisa e José Guilherme, com os quais estou sempre aprendendo, buscando apoio e vivendo ótimos momentos. Ambos tiveram participações fundamentais no meu processo de doutoramento, fazendo parte da base familiar que me proporciona todo suporte que necessito para a busca de meus objetivos de vida.

Aos meus avós, José Maria Pinto, Dilza Maria Pinto, Octávio Cesário Pereira Junior e Elaine Aparecida Bonalumi Cesário Pereira, por todos os ensinamentos, por todo carinho e por terem participado de maneira imprescindível da minha educação e formação acadêmica.

À Roseli A. Fernandes, pelo suporte imensurável que proporciona à mim e a toda minha família, desde a minha formação infantil até hoje, assegurando, de maneira imprescindível, ótimas condições de vida e, conseqüentemente, de estudos.

À Maria Gorete dos Santos Melo, pelo amparo indispensável que proporciona no meu dia a dia para tornar minha rotina mais produtiva.

Ao meu orientador, Miguel Moreto, por todos os ensinamentos passados ao longo do período de doutorado, que vão muito além dos conhecimentos técnicos e científicos de engenharia. Foi um enorme prazer poder ter sido orientado por um orientador dotado de uma visão científica coesa e ponderada, e de notável conhecimento geral e específico. Agradeço imensamente a solicitude e a diligência com as quais sempre me orientou, e também a habilidade que teve em suas condutas durante estes anos para me direcionar e extrair o melhor do meu desempenho acadêmico. Sou extremamente grato por ter tido esta oportunidade de crescimento pessoal e profissional no convívio com o Prof. Moreto, que se tornou, não só um orientador que tenho uma enorme admiração, mas um grande amigo que fiz para a vida toda.

Aos professores Frédéric Wurtz e Benoit Delinchant, pelos ensinamentos, por viabilizarem minhas experiências de pesquisa desenvolvidas na França e por proporcionarem desmedido suporte para que tudo ocorresse em conformidade com os meus objetivos.

Ao Prof. Diego Issicaba, com o qual tive o privilégio de poder trabalhar em uma publicação científica que não fez parte do escopo desta tese, mas que representou um

período de enorme aprendizagem que certamente refletiu no meu desempenho para desenvolvimento desta pesquisa de doutorado. Agradeço enormemente a paciência e prontidão em todos os momentos em que estivemos trabalhando juntos ao longo deste período.

Aos professores avaliadores Denis Vinicius Coury, Fernando Buzzulini Prioste, Jomi Fred Hübner e Diego Issicaba pelo excelente trabalho de avaliação e contribuição científica para o aperfeiçoamento desta tese de doutorado.

Aos professores Silvia Cervantes e Antônio Simões, pelo suporte, orientação, motivação e incentivo no início e ao longo da minha jornada como pós-graduando *strictu sensu*.

Aos meus amigos e colegas que fizeram parte desta trajetória e foram fundamentais para que eu pudesse concluir o processo de doutoramento: André Andretta, Beatriz Helene Xavier, Bruno Begnini, Daniel Tenfen, Diogo Hart, Everton Maccagnan, Gilseu Von Muhlen, Glauber Lima, Guilherme Fredo, Gustavo Nascimento, João Begnini, João Yokoyama, Jonas Pesente, Kauana Palma, Leidiane Acordi, Lucas Abdala, Lucas Souza, Marcelo Lopes, Pedro Seger, Samir Fernandes, Ricardo Schaefer, Ronie Moleta, Victor Fassoni, Victor Freitas, Valter Cirino, Vinícios Oliva e Vitor Couto.

À Universidade Federal de Santa Catarina e CAPES, por proporcionarem recursos e incentivo financeiro durante o desenvolvimento desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

"Knowledge is power."
(*BACON, 1597*)

RESUMO

Este trabalho propõe um esquema de proteção de microrredes de baixa tensão com presença de geração distribuída predominantemente composta por fontes de geração com interface de conexão via conversores estáticos. A estratégia de proteção proposta baseia-se na utilização de Sistemas Multiagentes, visando portar características versáteis a fim de exercer proteção de microrredes tanto em modo ilhado quanto em modo conectado à rede principal, além de possibilitar mudanças de topologia e a aplicação do conceito *plug-and-play*. Os agentes do sistema multiagente proposto analisam parâmetros de tensão, impedância e potência ativa para identificar a existência de falta na microrrede. Duas microrredes teste foram propostas para validação do sistema de proteção desenvolvido. A primeira foi criada e modelada com base em parâmetros referência do CIGRÉ, com modelagem da geração distribuída baseada em estudos sobre o comportamento de fontes de geração com interface via conversores estáticos na presença de curto-circuito. A segunda microrrede teste foi modelada com base em um sistema de distribuição real europeu. Ambas modelagens foram desenvolvidas no software MATLAB/SIMULINK. A arquitetura multiagente proposta é composta de três dimensões (organização, agentes e ambiente), possuindo uma estrutura descentralizada, e foi desenvolvida com o uso do *framework* JaCaMo, que consiste no desenvolvimento dos agentes na linguagem de programação JASON, utilizando a arquitetura BDI como estrutura interna de funcionamento. Simulações de diversas situações de falta foram realizadas para validação da estratégia de proteção proposta. Os resultados obtidos demonstram que sistemas multiagentes podem ser uma interessante ferramenta no desenvolvimento de sistemas de proteção complexos, como os exigidos pelas circunstâncias de operação de microrredes de baixa tensão com alta inserção de fontes de energia com interface via conversores estáticos.

Palavras-chave: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Microrredes. Geradores de energia com conexão via conversores estáticos. Sistemas Multiagente.

ABSTRACT

This work proposes a protection scheme for low voltage microgrids with distributed generation predominantly composed of inverter interfaced generation sources. The proposed protection strategy is based on the use of Multi-Agent Systems, aiming to provide versatile features in order to protect microgrids in islanded and grid-connected mode of operation. The protection scheme is also able to adapt to topology changes and is compatible with the plug-and-play concept. The agents of the proposed multi-agent system analyze voltage, impedance and active power parameters to identify the existence of a fault in the microgrid. Two test microgrids were proposed for simulation of the developed protection system. The first was created and modeled based on benchmark parameters of CIGRÉ. The distributed generation modeling was carried out based on current studies that propose discussions about the behavior of inverter-based distributed generation in the presence of faults. The second test microgrid was modeled based on a real european distribution system. Both test systems were modelled in MATLAB/SIMULINK software. The proposed multi-agent architecture is composed of three dimensions (organization, agents and environment), with a decentralized structure, and was developed using the JaCaMo framework. Therefore, the agents of the multi-agent system were developed in JASON programming language, using the BDI architecture as its internal structure. Simulations of several fault situations were performed to demonstrate the effectiveness of the proposed protection strategy. The results obtained demonstrate that multiagent systems can be an interesting tool in the development of complex protection systems, such as those required by inverter-dominated low voltage microgrids.

Keywords: Electrical Power Systems Protection. Microgrids. Inverter-Based Distributed Generation. Multiagent Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema elétrico radial.	23
Figura 2 – Sistema elétrico com geração distribuída.	25
Figura 3 – Exemplo de microrrede.	28
Figura 4 – Unidade de IBDG típica.	44
Figura 5 – Diagrama unifilar de IBDG típica simplificada.	45
Figura 6 – Estratégias de controle de IBDGs.	46
Figura 7 – Esquema de controle tipicamente utilizado em modo <i>grid-following</i>	48
Figura 8 – Diagrama elétrico da IBDG Modelo 1.	49
Figura 9 – Diagrama elétrico simplificado da IBDG Modelo 2.	50
Figura 10 – Interação de um agente com o ambiente.	55
Figura 11 – <i>Procedural Reasoning System</i>	58
Figura 12 – Protocolo de comunicação <i>FIPA-Request-Protocol</i>	63
Figura 13 – Taxonomia dos modos de obtenção da coordenação.	64
Figura 14 – Estrutura hierárquica.	65
Figura 15 – Estrutura por federações.	66
Figura 16 – Estrutura por sociedade.	67
Figura 17 – Estrutura por congregações.	67
Figura 18 – Estrutura por time.	68
Figura 19 – Dimensões de um SMA.	69
Figura 20 – Dimensões do modelo organizacional Moise+.	70
Figura 21 – <i>JASON Reasoning Cycle</i>	72
Figura 22 – Possíveis interações entre agente e artefato.	74
Figura 23 – Microrrede 1.	79
Figura 24 – Microrrede 2.	81
Figura 25 – Gráfico de variação de tensão com relação à impedância de falta.	83
Figura 26 – Gráfico de variação de impedância medida com relação à impedância de falta.	84
Figura 27 – Estratégia de análise de eventos - Circunstância 1.	85
Figura 28 – Estratégia de análise de eventos - Circunstância 2.	86
Figura 29 – Estratégia de análise de eventos - Falta monofásica.	87
Figura 30 – Estratégia de análise de eventos - Falta bifásica.	88
Figura 31 – Estratégia de análise de eventos - Falta bifásica-terra.	89
Figura 32 – Visão global do SMA proposto.	89
Figura 33 – Microrrede 1, configuração 1.	91
Figura 34 – Microrrede 1, configuração 2.	92
Figura 35 – Microrrede 2, configuração 1.	93
Figura 36 – Microrrede 2, configuração 2.	94

Figura 37 – Diagrama simplificado das especificações estruturais do sistema organizacional do SMA.	95
Figura 38 – Exemplo de formação de zonas e adoção de múltiplos papéis. . . .	97
Figura 39 – Formação de grupos do SMA proposto.	97
Figura 40 – Diagrama representativo das especificações funcionais da organização do SMA.	99
Figura 41 – Artefato medidor em momento de operação normal da microrrede. .	100
Figura 42 – Exemplificação das amostragens de medidas utilizadas pelos artefatos.	101
Figura 43 – Artefato medidor no momento de detecção de um evento.	102
Figura 44 – Artefato medidor no momento de atualização final de propriedades observáveis.	102
Figura 45 – Exemplo de formação da nomenclatura dos medidores da microrrede.	103
Figura 46 – Exemplo de projeção de situação de contingência.	105
Figura 47 – Funcionamento geral do procedimento de formação da conclusão parcial.	107
Figura 48 – Quantidade de crenças “detecção” para um medidor associado à duas zonas.	107
Figura 49 – Exemplo de circunstância inicial para definição de conclusão final. .	112
Figura 50 – Perspectiva do agente e formação de opiniões.	112
Figura 51 – Formação de conclusão parcial para as zonas 2 e 3.	114
Figura 52 – Formação de conclusão parcial para a Zona 1.	114
Figura 53 – Exemplo de fluxo de mensagens entre agentes do mesmo grupo após determinação da conclusão parcial.	115
Figura 54 – Exemplo de informações da base de crença do agente para formação da conclusão final.	116
Figura 55 – Locais de falta simulados na Microrrede 1.	119
Figura 56 – Locais de falta simulados na Microrrede 2.	120
Figura 57 – Microrrede 1, configuração 2.	123
Figura 58 – Artefato medidor B2DL2 após atualização de propriedades observáveis.	124
Figura 59 – Artefato medidor B3DL4 após atualização de propriedades observáveis.	124
Figura 60 – Artefato medidor B4L1 após atualização de propriedades observáveis.	124
Figura 61 – Artefato medidor B4IBDG1 após atualização de propriedades observáveis.	125
Figura 62 – Resultados gerais de todas as simulações realizadas.	139
Figura 63 – Resultados gerais de todas as simulações realizadas por impedância.	140
Figura 64 – Resultados gerais de todas as simulações realizadas por tipo de falta.	141

Figura 65 – Diagrama representativo do tipo de aterramento utilizado na Microrrede 1.	167
Figura 66 – Disposição de cabos em redes subterrâneas de baixa tensão. . . .	167
Figura 67 – Diagrama representativo do tipo de aterramento utilizado na Microrrede 2.	173

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Abordagem do planejamento da distribuição.	30
Quadro 2 – Sintetização de trabalhos da revisão bibliográfica.	42
Quadro 3 – Atos comunicativos FIPA.	60
Quadro 4 – Parâmetros da mensagem ACL.	62
Quadro 5 – Especificações normativas da organização do SMA.	98
Quadro 6 – Fatores utilizados para formação das crenças “detecção”.	108
Quadro 7 – Regras utilizados para determinação do tipo de falta.	110
Quadro 8 – Regras para determinação das crenças do tipo “localização”.	113
Quadro 9 – Regras para conclusão final da análise de eventos.	115
Quadro 10 – Agentes e seus respectivos medidores da Zona 2.	121
Quadro 11 – Crenças das primeiras opiniões do agente B2 sobre o evento.	122
Quadro 12 – Crenças das primeiras opiniões do agente B3 sobre o evento.	122
Quadro 13 – Crenças das primeiras opiniões do agente B4 sobre o evento.	125
Quadro 14 – Estimativa de tipo de falta de cada agente da Zona 2.	126
Quadro 15 – Atualização de opiniões das crenças do agente B2.	126
Quadro 16 – Atualização de opiniões das crenças do agente B3.	127
Quadro 17 – Crenças “localização” concentradas na base de crenças do agente B4.	127
Quadro 18 – Dados do equivalente da rede principal da modelagem da Microrrede 1.	166
Quadro 19 – Dados do transformador TR1 da Microrrede 1.	166
Quadro 20 – Dados de cabos subterrâneos da Microrrede 1.	168
Quadro 21 – Dados gerador MJB 315 SB 4.	171
Quadro 22 – Dados do transformador TR1 da Microrrede 2.	172
Quadro 23 – Parâmetros de linhas da Microrrede 2.	173
Quadro 24 – Dados gerador MJB 225 LA 4.	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado de simulações na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 1 de geração.	128
Tabela 2 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 1 de geração.	129
Tabela 3 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 1 de geração.	130
Tabela 4 – Resultado de simulações na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 1 de geração.	131
Tabela 5 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 1 de geração.	132
Tabela 6 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 1 de geração.	132
Tabela 7 – Resultado de simulações na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 2 de geração.	133
Tabela 8 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 2 de geração.	133
Tabela 9 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 2 de geração.	134
Tabela 10 – Resultado de simulações na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 2 de geração.	135
Tabela 11 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 2 de geração.	135
Tabela 12 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 2 de geração.	136
Tabela 13 – Resultado de simulações na Microrrede 2 - Config. 1.	137
Tabela 14 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 2 - Config. 1.	138
Tabela 15 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 2 - Config. 1.	138
Tabela 16 – Comprimentos das linhas de distribuição da Microrrede 1.	168
Tabela 17 – Cargas da Microrrede 1.	169
Tabela 18 – Potência trifásica por barra, provenientes das IBDGs da Microrrede 1.	170
Tabela 19 – Cargas ($\text{tg}(\phi)=0,4$).	174
Tabela 20 – Geração distribuída (somente IBDGs).	176

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDI	<i>Belief-Desire-Intention</i>
BRF	<i>Belief Revision Function</i>
BUF	<i>Belief Update Function</i>
CARTAgO	<i>Common Artifact Infrastructure for Agents Open Environments</i>
CEA	<i>Commissariat à l'Énergie Atomique</i>
CNRS	<i>Centre National de la Recherche Scientifique</i>
DER	<i>Distributed Energy Resources</i>
FIPA	<i>Foundation for Intelligent Physical Agents</i>
FIPA-ACL	<i>Foundation for Intelligent Physical Agents - Agent Communication Language</i>
G2Elab	<i>Grenoble Electrical Engineering Laboratoire</i>
GD	<i>Geração Distribuída</i>
GreEn-ER	<i>Grenoble Energie - Enseignement Recherche</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IAD	<i>Inteligência Artificial Distribuída</i>
IBDG	<i>Inverter-Based Distributed Generation</i>
IEEE	<i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos</i>
JADE	<i>Java Agent Development Framework</i>
KIF	<i>Knowledge Interchange Format</i>
KQML	<i>Knowledge Query and Manipulation Language</i>
NARF	<i>Natural Reference Frame</i>
NVP	<i>N-version programming</i>
PCC	<i>Ponto de Conexão Comum</i>
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PRS	<i>Procedural Reasoning System</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SMA	<i>Sistemas Multiagentes</i>
STRF	<i>Stationary Reference Frame</i>
SYRF	<i>Synchronous Reference Frame</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
1.1.3	Estrutura da tese	22
2	MICRORREDES: UMA EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	23
2.1	GERAÇÃO CENTRALIZADA DE ENERGIA	23
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	24
2.3	MICRORREDES	25
2.3.1	Desenvolvimento de microrredes no mundo	29
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PROTEÇÃO DE MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO	31
3.1	ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO DE MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
3.1.1	Reajuste de proteção tradicional	32
3.1.2	Deteccção do sentido da corrente	33
3.1.3	Análise de transitórios	34
3.1.4	Função diferencial	36
3.1.5	Sistemas Multiagentes	37
3.2	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	41
4	COMPORTAMENTO DE IBDGS EM SITUAÇÃO DE FALTA	44
4.1	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM IBDGS	45
4.2	MODELAGEM DE IBDGS PARA ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO	47
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5	SISTEMAS MULTIAGENTES	52
5.1	AGENTES INTELIGENTES	53
5.1.1	A natureza dos ambientes	55
5.2	ARQUITETURA INTERNA DE AGENTES INTELIGENTES	56
5.2.1	Arquitetura BDI	57
5.3	COMUNICAÇÃO ENTRE AGENTES	58
5.3.1	Linguagens de comunicação	59
5.4	COORDENAÇÃO DE SISTEMAS MULTIAGENTES	62
5.4.1	Cooperação entre agentes	63
5.4.2	Competição entre agentes	64
5.5	ESTRUTURAS ORGANIZACIONAIS	64

5.5.1	Hierarquia	65
5.5.2	Federações	65
5.5.3	Sociedade	66
5.5.4	Congregações	66
5.5.5	Times	67
5.6	DESENVOLVIMENTO DE SMA	68
5.6.1	O modelo organizacional MOISE+	69
5.6.2	O interpretador JASON	70
5.6.3	O framework CArtAgO	73
5.7	APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE SMA	74
5.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6	MODELAGEM DAS MICRORREDES	77
6.1	MICRORREDE 1	77
6.1.1	Topologias e restrições de operação	78
6.2	MICRORREDE 2	80
6.2.1	Topologias e restrições de operação	80
7	METODOLOGIA DE DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ZONA SOB FALTA	82
7.1	PRINCÍPIOS DE DETECÇÃO E DE ANÁLISE DE EVENTOS	82
7.1.1	Etapas de detecção de eventos	82
7.1.2	Etapas de análise de eventos	84
7.1.2.1	Princípio básico	85
7.1.2.2	Identificação de faltas monofásicas e trifásicas	86
7.1.2.3	Identificação de faltas bifásicas e bifásicas-terra	87
7.1.2.4	Considerações finais	88
7.2	SISTEMA MULTIAGENTE PROPOSTO	89
7.2.1	Zonas de proteção e posicionamento de agentes	90
7.3	ORGANIZAÇÃO DO SMA	95
7.4	ARTEFATOS DO SMA	99
7.4.1	Nomenclatura de medidores	102
7.5	AGENTES DO SMA	103
7.5.1	Etapas de inicialização do SMA	103
7.5.2	Etapas de análise de topologia	104
7.5.3	Etapas de operação do sistema de proteção proposto	106
7.5.3.1	Avaliação individual	106
7.5.3.1.1	<i>Inicialização e formação das primeiras opiniões</i>	106
7.5.3.1.2	<i>Estimativa do tipo de falta</i>	109
7.5.3.1.3	<i>Correção de crenças divergentes</i>	111

7.5.3.1.4	<i>Definição de conclusão parcial</i>	111
7.5.3.2	Avaliação coletiva	114
7.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
8	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	118
8.1	DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO DA ATUAÇÃO DO SMA	121
8.2	SIMULAÇÕES MICRORREDE 1 - CENÁRIO 1 DE GERAÇÃO	128
8.2.1	Configuração 1 de posicionamento de medidores	128
8.2.2	Configuração 2 de posicionamento de medidores	130
8.3	SIMULAÇÕES MICRORREDE 1 - CENÁRIO 2 DE GERAÇÃO	132
8.3.1	Configuração 1 de posicionamento de medidores	132
8.3.2	Configuração 2 de posicionamento de medidores	135
8.3.3	Experimento complementar	136
8.4	SIMULAÇÕES MICRORREDE 2	136
8.4.1	Configuração 1 de posicionamento de medidores	137
8.4.2	Configuração 2 de posicionamento de medidores	137
8.5	RESULTADOS GERAIS	139
8.6	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	141
8.6.1	Metodologia utilizada	141
8.6.2	Comunicação e desempenho computacional de agentes	143
8.6.3	O uso de programação lógica orientada à agentes	145
8.6.3.1	Aspectos positivos	145
8.6.3.2	Aspectos negativos	146
9	CONCLUSÕES	148
9.1	TRABALHOS FUTUROS	148
	REFERÊNCIAS	150
	APÊNDICE A – DADOS DA MICRORREDE 1	166
A.1	EQUIVALENTE CONCESSIONÁRIA	166
A.2	TRANSFORMADOR	166
A.3	SISTEMA DE ATERRAMENTO	166
A.4	LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO	167
A.5	CARGAS	169
A.6	GERAÇÃO DISTRIBUIDA COM CONEXÃO VIA CONVERSORES ESTÁTICOS	170
A.7	GERADOR À DIESEL	171
	APÊNDICE B – DADOS DA MICRORREDE 2	172
B.1	EQUIVALENTE CONCESSIONÁRIA	172
B.2	TRANSFORMADOR	172
B.3	SISTEMA DE ATERRAMENTO	172
B.4	LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO	172

B.5	CARGAS	174
B.6	GERAÇÃO DISTRIBUIDA COM CONEXÃO VIA CONVERSORES ESTÁTICOS	176
B.7	GERADOR À DIESEL	177

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, fatores como o aumento global do consumo de energia, diminuição das reservas de combustíveis fósseis, alterações climáticas, poluição do meio ambiente e a dependência da sociedade moderna da energia elétrica vêm impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias para geração e gestão de energia elétrica. É fato notório que a tendência de inserção de geração distribuída nos sistemas elétricos de todo o mundo vem causando mudanças substanciais no modelo convencional de geração de energia dos sistemas elétricos de potência que, tradicionalmente, apresentam estrutura centralizada e fluxo de energia radial. A substituição gradativa deste modelo convencional por um modelo de geração com alta inserção de Geração Distribuída (GD) e, conseqüentemente, com estrutura de geração descentralizada, mostra-se atualmente como parte de uma tendência global de transformação para os sistemas elétricos de potência. Este modelo descentralizado pode proporcionar melhor qualidade de energia, menor impacto ambiental, redução do custo de operação e manutenção, redução de perdas de energia, maior confiabilidade ao sistema, entre outras vantagens (CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, 2009). Essas mudanças e vantagens motivaram o surgimento do conceito de microrredes.

Microrredes são pequenas redes de distribuição, de baixa a média tensão, que podem possuir cargas, geração distribuída, armazenadores de energia e gerenciamento central de seus recursos. Essas redes podem atuar de maneira ilhada, desconectadas do sistema principal (CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, 2009). Além de possuírem as vantagens proporcionadas pela presença da geração distribuída, as microrredes oferecem também melhor aproveitamento da energia gerada devido à capacidade de gestão de energia e redução de perdas. Porém, em contrapartida às vantagens mencionadas anteriormente, estudos recentes constataram uma série de desafios para a utilização deste modelo. Alguns dos principais obstáculos a serem superados são as dificuldades encontradas para implementação do sistema de proteção da microrrede. Os diferentes modos de operação que uma microrrede pode adotar requerem o uso de uma estratégia de proteção com características adaptativas.

Faz-se importante ressaltar que o termo "geração distribuída" não está necessariamente associado a fontes de energias renováveis ou intermitentes. Porém, grande parte das tecnologias utilizadas como fontes de energia renováveis requerem uma interface de conexão via conversores estáticos para serem integrados à rede de energia elétrica. Módulos fotovoltaicos, células à combustível, microturbinas de velocidade de rotação variável e turbinas eólicas, são alguns exemplos de tecnologias de geração distribuída que fazem uso de conexão via conversores estáticos. O aumento de discussões acerca da preservação do meio ambiente e dos métodos utilizados para geração de energia elétrica tornam este tipo de geração distribuída uma tecnologia amplamente

utilizada em microrredes de baixa tensão. A integração em grandes proporções deste tipo de geração traz à tona a importância do desenvolvimento de pesquisas científicas a respeito de seu sistema de controle e seu comportamento perante ocorrência de curto-circuito na microrrede.

Por ser uma área de estudo ainda pouco explorada cientificamente, o comportamento de resposta ao curto-circuito de fontes de geração com interface de conexão via conversores estáticos, comumente referenciados na literatura como *Inverter-Based Distributed Generation* (IBDG), em conjunto com as características versáteis de uma microrrede, geram diversos desafios para a realização da proteção de microrredes de baixa tensão. Dentre as diversas estratégias e métodos de proteção de microrredes propostos na literatura, a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA), mais especificamente o uso de Sistemas Multiagentes (SMA), tem se mostrado uma interessante solução para tais desafios. O funcionamento descentralizado dos sistemas multiagentes apresenta propriedades que podem oferecer vantagens interessantes do ponto de vista das microrredes. As principais vantagens que podem ser proporcionadas pelos sistemas multiagentes são: adaptabilidade, eficiência, velocidade, confiabilidade, especialização de funções, facilidade de desenvolvimento e de gerenciamento, simplicidade na manutenção e autonomia. Logo, as características apresentadas pelos sistemas multiagentes demonstram alta compatibilidade com o objetivo de desenvolver uma estratégia de proteção de microrredes de baixa tensão, em particular com alta inserção de fontes de geração com interface via conversores estáticos, sendo este o assunto desta tese.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo elaborar uma estratégia de proteção de microrredes de baixa tensão com alta inserção de geração distribuída conectada via conversores estáticos, mediante uso de Sistemas Multiagente. A finalidade do estudo é explorar o uso de programação lógica orientada à agentes neste tipo de aplicação e investigar as vantagens e desvantagens de seu uso no objetivo de solucionar alguns desafios de sistemas de proteção presentes neste tipo de microrrede.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo principal fosse alcançado, os seguintes objetivos específicos foram estipulados:

- a) Modelar microrrede teste de baixa tensão com geração distribuída predominantemente composta por IBDGs para simulação de faltas;
- b) Elaborar estratégia de proteção compatível com as características e dinâmica de funcionamento de IBDGs em situação de contingência no contexto de microrredes;
- c) Desenvolver sistema multiagente capaz de realizar a proteção de microrredes de baixa tensão com alta inserção de geração distribuída com conexão via conversores estáticos;
- d) Identificar as principais vantagens e desvantagens do uso de sistemas multiagentes para proteção de microrredes;
- e) Investigar a aplicabilidade do uso de programação lógica orientada à agentes na interpretação de cenários e propriedades de microrredes;
- f) Realizar análise do desempenho da estratégia de proteção proposta para validação das contribuições científicas esperadas.

1.1.3 Estrutura da tese

Esta tese de doutorado está organizada conforme segue: o Capítulo 2 apresenta uma contextualização da evolução dos sistemas elétricos de potência; o Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica e as contribuições científicas que são buscadas nesta tese. O Capítulo 4 apresenta as particularidades das fontes com interface de conexão via conversores estáticos em situação de contingência, e os modelos utilizados no estudo desta tese. O Capítulo 5 apresenta o estado da arte de Sistemas Multiagentes. No Capítulo 6 são apresentados os sistemas teste utilizados. No Capítulo 7 são apresentados os princípios teóricos de sistemas elétricos de potência utilizados no sistema de proteção, bem como o sistema multiagente proposto e seu funcionamento. No Capítulo 8 são apresentados detalhes sobre as simulações e os resultados obtidos. Finalmente, o Capítulo 9 apresenta conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

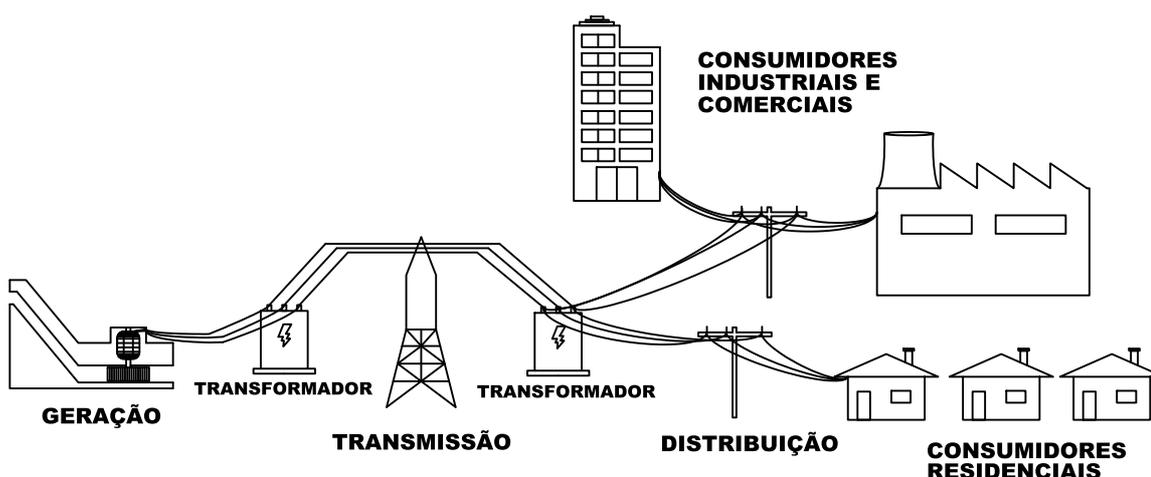
2 MICRORREDES: UMA EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo é apresentada a contextualização e motivação dos estudos propostos nesta tese, no tocante aos benefícios e consequências da evolução dos sistemas elétricos de potência.

2.1 GERAÇÃO CENTRALIZADA DE ENERGIA

Tradicionalmente, o modelo de geração de energia elétrica centralizado, ou seja, grandes centrais geradoras afastadas dos centros consumidores e conectadas à uma extensa rede de transmissão e distribuição de energia, era o adotado na maior parte dos sistemas elétricos pelo mundo. Esse modelo de geração, ilustrado na Figura 1, tem mostrado baixa capacidade de adaptação a mudanças evolutivas, uma vez que, quando há necessidade de expansão, exige alto investimento financeiro para construção de novas usinas e reforços na rede de transmissão. Além disto, é um modelo que possui perdas de energia na transmissão em longas distâncias e causa impactos ambientais severos (MARTIN, 2009; AKOREDE *et al.*, 2010). Com os avanços tecnológicos na área de sistemas elétricos de potência, o surgimento de preocupações e novas leis acerca de questões ambientais e a necessidade de realização de uma reestruturação do setor elétrico de acordo com o crescimento da demanda, o número de estudos e pesquisas nesta área aumentou significativamente no decorrer dos últimos anos e deu origem a um novo conceito de geração de energia: a geração distribuída.

Figura 1 – Sistema elétrico radial.



Fonte – próprio autor.

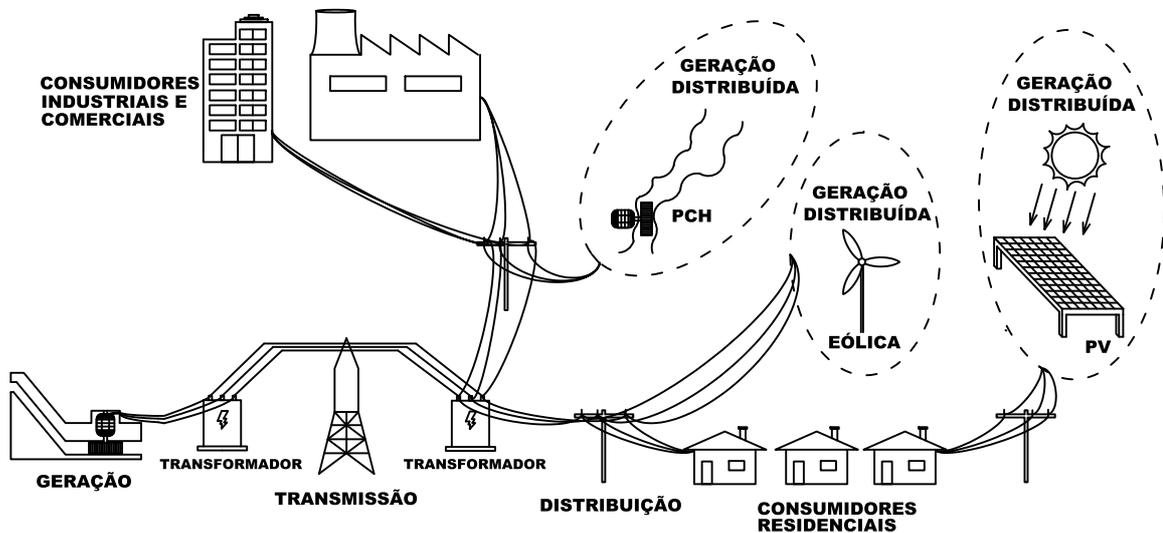
2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Diversos são os fatores responsáveis pelo desenvolvimento e avanços de pesquisas da GD. Problemas como redução gradual nas reservas de combustíveis fósseis do planeta, baixo aproveitamento da energia elétrica gerada pelos sistemas de geração convencionais e impactos ambientais têm se mostrado, cada vez mais, ser de interesse global. Como alternativa para solução de tais problemas, a utilização de fontes de energia não convencionais e renováveis, como geradores eólicos, microgeração hidrelétrica, biogás, energia solar, entre outras, vêm demonstrando serem boas soluções.

Uma breve revisão de literatura mostra que não existe um consenso mundial para a definição de geração distribuída (ACKERMANN *et al.*, 2001; PEPERMANS *et al.*, 2005; DRIESEN; BELMANS, 2006). Diferentes países possuem definições distintas de geração distribuída de acordo com o propósito, localização, potência dos geradores, área de suprimento de energia, impacto ambiental, modo de operação, entre outros (ACKERMANN *et al.*, 2001; DONDI *et al.*, 2002; PEPERMANS *et al.*, 2005). Desta forma, a definição de geração distribuída adotada neste trabalho leva em consideração unidades geradoras de pequeno e médio porte, conectadas diretamente à rede de distribuição e atuando em paralelo com a rede convencional, conforme apresentado pela Figura 2. Com base nesta definição, pode-se afirmar que este tipo de geração proporciona diversas vantagens, como por exemplo, baixo custo de construção de unidades geradoras, curto espaço de tempo para instalação, facilidade de alocação, rápido atendimento ao crescimento da demanda, baixo custo de operação e manutenção, redução de impactos ambientais causados por linhas de transmissão e grandes unidades geradoras, redução de perdas de transmissão, melhor suporte para aproveitamento da energia térmica gerada no processo de geração de energia elétrica, entre outras (IEA, 2002; DOE, 2007; CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, 2009).

Se por um lado a geração distribuída proporciona as diversas vantagens mencionadas anteriormente, por outro, ela apresenta diversos obstáculos a serem superados. Ao contrário da geração centralizada, que possui fluxo de corrente unidirecional nos sistemas de distribuição, a inserção da geração distribuída na rede faz com que suas correntes sofram alterações em magnitude e direção, fazendo com que o sistema passe a apresentar fluxo de energia bidirecional. Esta alteração gera uma série de dificuldades para os esquemas de proteção do sistema elétrico (IEEE, 2011; ANTONOVA *et al.*, 2012; DULĂU *et al.*, 2014). Além disto, as correntes de curto-circuito também podem sofrer alterações significativas. Sendo assim, a inserção da geração distribuída aumenta significativamente a complexidade da operação, planejamento e procedimentos de manutenção do sistema elétrico. Ademais, são necessárias criações de novas leis, regulamentações, e normas de segurança para utilização deste modelo (DONDI *et al.*, 2002; DOE, 2007; MARTIN, 2009).

Figura 2 – Sistema elétrico com geração distribuída.



Fonte – próprio autor.

No contexto atual, a geração distribuída é, em sua grande maioria, utilizada em paralelo com a concessionária de energia. Esta configuração pode causar situações indesejadas na rede, como por exemplo, a permanência de cargas ligadas às gerações de pequeno porte quando há ocorrência de contingência na rede da concessionária, caracterizando uma situação de ilhamento. Atualmente, a permanência da configuração de sistema ilhado da rede de distribuição não é permitida pela maioria das concessionárias em diversos países, pois comprometem a qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores locais e oferecem riscos à pessoas e equipamentos (DONDI *et al.*, 2002; GOMEZ; MORCOS, 2008; PLET, 2012; CIGRE, 2014). Para evitar os problemas causados por tal configuração, utiliza-se uma proteção anti-ilhamento, cujo objetivo é desligar todas as unidades geradoras quando é detectada a ocorrência de uma situação de ilhamento da rede de distribuição.

Desta forma, pode-se afirmar que o cenário atual motiva a busca por melhorias que possibilitem reduzir os obstáculos apresentados pela utilização da GD a fim de permitir melhor aproveitamento de suas vantagens. Assim, a exploração desta linha de pesquisa e o surgimento de novas tecnologias deram origem a um novo conceito de redes de energia: as microrredes.

2.3 MICRORREDES

Como uma evolução das redes convencionais com presença de geração distribuída, microrredes podem ser definidas como redes ativas de distribuição de energia, de pequeno porte, de baixa ou média tensão, que possuem um conglomerado com-

posto por um sistema de geração distribuída e diferentes cargas flexíveis em sua estrutura, além de dispositivos de armazenamento de energia, como baterias, volantes de inércia (*flywheels*) e supercapacitores. Os geradores presentes nas microrredes utilizam quase sempre fontes de energia renováveis de pequeno porte, sendo na maioria das vezes geradores eólicos, microgeradores hidrelétricos, módulos fotovoltaicos e células a combustível (KATIRAEI *et al.*, 2008; CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, 2009) e suas cargas são totalmente, ou parcialmente, gerenciáveis (LASSETER, R. *et al.*, 2002). Essas redes podem atuar acopladas ao sistema principal ou de maneira ilhada, caso em que seus recursos energéticos distribuídos suprem o fornecimento de energia para suas cargas, independente da rede da concessionária. O ponto de conexão da microrrede com o sistema principal é chamado de Ponto de Conexão Comum (PCC). De acordo com Robert Lasseter *et al.* (2002), os dispositivos de uma microrrede devem lhe proporcionar flexibilidade, de forma que esta possa ser operacionalmente controlada como um sistema único independente agregado à rede principal, por meio de um gerenciamento central destes dispositivos. Esse gerenciamento é realizado por um controlador central, que é responsável por garantir a otimização da operação do sistema. A Figura 3 mostra algumas das características citadas anteriormente por meio da ilustração de um exemplo de microrrede. O controlador central possui as seguintes funções para gerenciar a microrrede de maneira adequada (LASSETER, R. *et al.*, 2002; LOPES *et al.*, 2006; TSIKALAKIS; HATZIARGYRIOU, N. D., 2011; OLIVARES *et al.*, 2014):

- a) Monitoramento do sistema de despacho;
- b) Otimização do uso da energia considerando seus custos;
- c) Controle de tensão e frequência da microrrede;
- d) Realização da compensação de reativos a fim de se manter a qualidade da energia e estabilidade do sistema;
- e) Administração de cargas, levando-se em consideração também as cargas da rede principal;
- f) Administração do suprimento de energia a cargas prioritárias;
- g) Administração da operação de dispositivos de armazenamento de energia;
- h) Análise de possibilidade de reconexão com a rede principal.

Uma das principais diferenças entre a microrrede e o sistema de geração de energia convencional é a capacidade de geração de suas fontes. Geradores presentes em microrredes possuem capacidade pequena quando comparados com geradores presentes no sistema convencional, e podem ser ligados diretamente à rede de distribuição de energia. Tais geradores são normalmente instalados próximos aos consumidores, fazendo com que a demanda de carga seja atendida com energia de melhor

qualidade e com perdas de transmissão desprezíveis (CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, 2009). Durante a ocorrência de perturbações na rede principal, a microrrede pode atuar ilhada, mantendo fornecimento de energia para suas cargas e proporcionando maior confiabilidade ao sistema. Desta forma, pode-se afirmar que a principal característica que difere uma microrrede de uma rede passiva de distribuição de energia com inserção de GD é a capacidade de ilhamento e de gestão de seus recursos (HATZIARGYRIOU, N., 2014).

O desenvolvimento das microrredes se mostra atraente devido às diversas vantagens técnicas, econômicas e ambientais que são proporcionadas pela sua utilização (HATZIARGYRIOU, N. *et al.*, 2007; CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, 2009; HATZIARGYRIOU, N., 2014):

- a) Menor impacto ambiental devido à redução da emissão de gases e partículas na atmosfera, resultantes de processos de combustão;
- b) Redução de perdas de transmissão de energia;
- c) Disponibilização de energia elétrica para áreas de difícil acesso com o sistema de geração de energia convencional;
- d) Diminuição dos gastos com ampliação de sistemas de transmissão e geração de energia, por meio de gerenciamento adequado da microrrede;
- e) Aproveitamento da energia térmica desperdiçada no processo de geração de energia elétrica;
- f) Melhoramento na qualidade e confiabilidade do fornecimento da energia devido à descentralização do sistema;
- g) Melhor adequação de balanço entre carga e geração;
- h) Redução ou eliminação de custos de transmissão e distribuição de energia;
- i) Diminuição do preço da energia no mercado devido à possibilidade da venda de energia excedente gerada pelos acessantes.

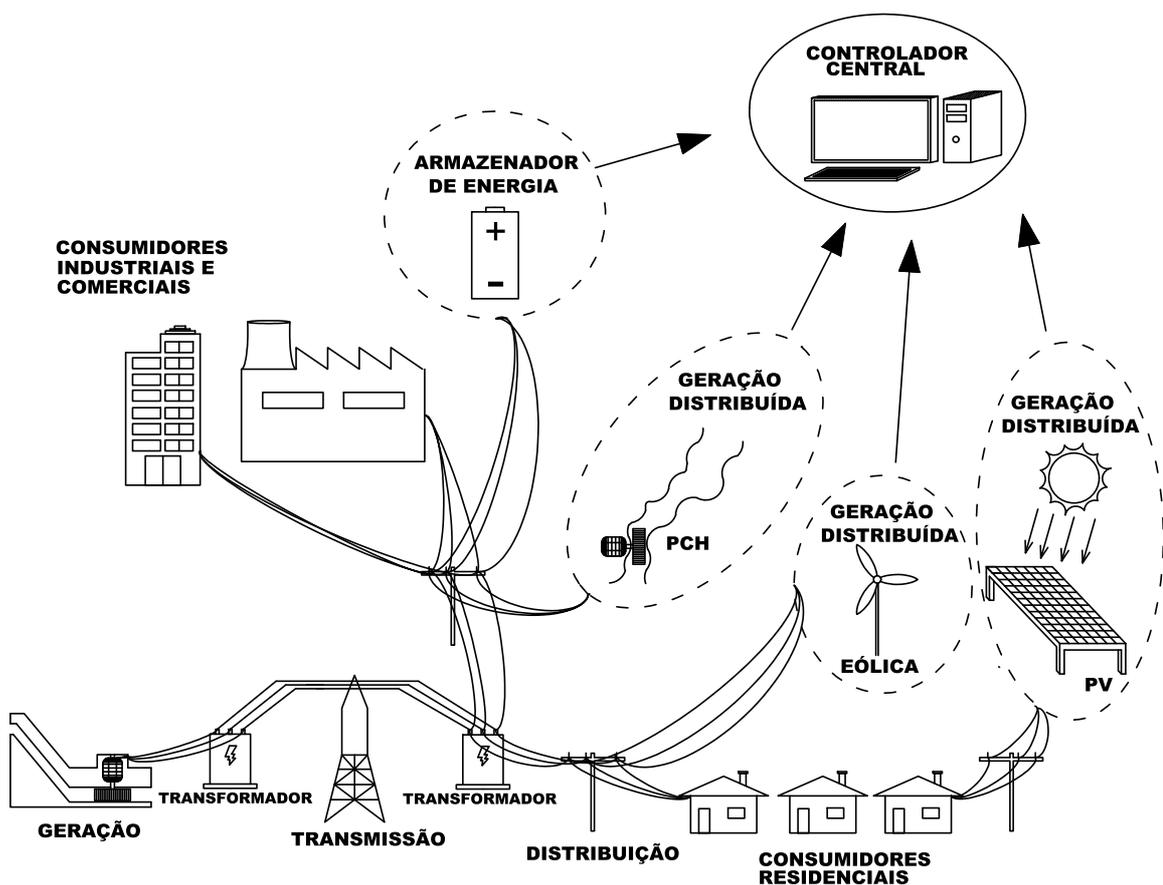
Por se tratar de um conceito novo, existem ainda diversos desafios a serem superados para que suas desvantagens sejam reduzidas e tornem os projetos de construções de microrredes cada vez mais viáveis. De acordo com S. Chowdhury e Crossley (2009), as principais desvantagens e desafios a serem superados em uma microrrede são:

- a) Alto custo de inserção e instalação das microfontes de energia devido ao grau de complexidade do sistema da microrrede;
- b) Dificuldades técnicas com relação aos aspectos de controle e proteções da microrrede;
- c) Falta de padrões regulatórios para sua operação, regulamentações técnicas, regulamentações de mercado, regulamentações legislativas, normas e proto-

colos de integração de microfones, guias de segurança e guias de proteção de rede.

Além das barreiras já citadas, novos problemas podem surgir conforme os estudos de microrredes são desenvolvidos. Apesar da capacidade de geração e consumo das microrredes ser suficientemente pequena para não afetar a estabilidade da rede principal quando conectada, estima-se que na presença de um grande número de microrredes com alta penetração de microfones conectadas à rede principal sua estabilidade e segurança serão influenciadas de maneira significativa. Desta forma, problemas referentes a interações dinâmicas entre o sistema principal e as microrredes poderão ser uma nova dificuldade a ser superada (CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, 2009).

Figura 3 – Exemplo de microrrede.



Fonte – próprio autor.

2.3.1 Desenvolvimento de microrredes no mundo

Diversos são os projetos de estudo e desenvolvimento de microrredes ao redor do mundo. Instituições em países como Estados Unidos, Japão, Espanha, Brasil, França, Alemanha, Itália, Canadá, Grécia e Holanda promovem pesquisas por meio da construção de microrredes em sistemas reais, construção de protótipos de microrredes de menor escala em laboratórios ou estudos dos princípios utilizados pelas microrredes, representando alguns dos principais centros de pesquisa e desenvolvimento de microrredes no mundo (BARNES *et al.*, 2007; HATZIARGYRIOU, N. *et al.*, 2007; KROPOSKI *et al.*, 2008; LIDULA; RAJAPAKSE, 2011; USTUN, Taha Selim *et al.*, 2011; HOSSAIN, E. *et al.*, 2014; MARTINS, 2014). O desenvolvimento de pesquisas na área de microrredes vem criando diretrizes de avanços tecnológicos que abordam precisamente os conceitos e principais desafios de microrredes apresentados neste capítulo. A orientação da trajetória tecnológica destas diretrizes se alicerça nos principais objetivos traçados, de maneira geral, pelas pesquisas em diferentes partes do mundo:

- a) Estudo da operação de microrredes para aumentar inclusão de *Distributed Energy Resources* (DER);
- b) Estudo dos modos de operações das microrredes: ilhado e conectado à rede principal;
- c) Desenvolvimento de estratégias de controle para garantir eficiência, confiabilidade e economia à operação de microrredes;
- d) Estudo e criação de normas e estratégias de proteção e aterramento de microrredes, visando garantir segurança a sua operação;
- e) Estudo e desenvolvimento de protocolos e estruturas de comunicação;
- f) Desenvolvimento de modelos e sistemas teste reais para estudo e demonstração de funcionamento de microrredes em âmbito laboratorial;
- g) Estudo da interação técnica e comercial de microrredes;
- h) Desenvolvimento de padronizações técnicas, comerciais e legislativas para assegurar a existência do conceito *plug-and-play* em microrredes;
- i) Estudo do impacto e dos benefícios técnicos e ambientais provenientes da inserção de microrredes nos sistemas elétricos.

A revisão bibliográfica apresentada por E. Hossain *et al.* (2014) comprova a grande variedade de realização de estudos, referentes aos diversos aspectos da microrrede que foram discutidos anteriormente. Em conjunto com esta comprovação, o alto número de microrredes em desenvolvimento ao redor do mundo, também apresentado em (HOSSAIN, E. *et al.*, 2014), confirma a tendência de evolução dos sistemas elétricos de potência em direção ao conceito de microrredes.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, os conceitos discutidos neste capítulo elucidam o sentido da evolução dos Sistemas Elétricos de Potência e ampliam as noções dos desafios do presente e dos obstáculos a serem enfrentados no futuro. O Quadro 1 sintetiza as principais características de cada um dos sistemas apresentados anteriormente, proporcionando uma visão cronológica das transformações dos Sistemas Elétricos de Potência. Conforme apresentado na Seção 2.3.1, o sentido da evolução tecnológica dos sistemas elétricos respalda a forte propensão da inserção do conceito de microrredes nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia, e revelam o amplo potencial para exploração de estudos nesta linha de pesquisa, destacando a importância do desenvolvimento de investigações científicas a respeito dos principais aspectos das microrredes discutidos neste capítulo.

Quadro 1 – Abordagem do planejamento da distribuição.

	Passado	Presente	Futuro
Planejamento	Distribuição convencional	GD	Microrredes
Tipo de geração	Centralizada, geração de retaguarda	Descentralizada, de baixa a média penetração de GD	Descentralizada, de média a alta penetração de GD
Carga	Sem diferenciação	Classificação baseada em requisitos de qualidade de energia e controle (crítica/não-crítica, controláveis/não-controláveis)	
Rede de distribuição	Atendida por subestação, rede passiva	Rede semi-ativa	Rede ativa, troca de energia bidirecionais
Gerenciamento de contingência	Corte de cargas baseado em frequência, desligamento forçado	Corte de carga, desconexão da GD	Ilhamento e operação autônoma, compartilhamento de energia

Fonte – Driesen e Katiraei (2008), editado pelo autor.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PROTEÇÃO DE MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO

Um dos maiores desafios a ser enfrentado na utilização de microrredes é o seu sistema de proteção. Haja vista que microrredes são projetadas para operar tanto no modo conectado à rede principal, quanto no modo ilhado, as proteções do sistema elétrico convencional, com ajustes fixos, poderão não funcionar corretamente para seus diferentes modos de operação. A maioria dos equipamentos convencionais de proteções de redes de distribuição de energia tem seu funcionamento baseado nas correntes de curto-circuito do sistema. Portanto, os principais problemas enfrentados pela proteção convencional em sistemas que possuem inserção de GD são (NIKKHAJOEI; LASSETER, R. H., 2007; JIANG *et al.*, 2010; HATZIARGYRIOU, N., 2014):

- a) Alterações na magnitude e direção das correntes de falta de acordo com a localização de unidades geradoras;
- b) Redução da sensibilidade e velocidade da detecção de falta;
- c) Atuações indesejadas de proteções para faltas em linhas adjacentes da rede principal, devido à contribuição de correntes de falta pelas fontes da geração distribuída;
- d) Reduzida contribuição de corrente de falta pelas unidades de geração que são conectadas à microrrede através de conversores estáticos;
- e) Intermitência de fornecimento de energia em alguns tipos de fonte de energia renovável, afetando a corrente de contribuição de falta em diferentes pontos da microrrede.

Os desafios relacionados ao desenvolvimento dos sistemas de proteção de microrredes não são possíveis de serem superados sem que haja plena compreensão de sua dinâmica de operação, antes, durante, e após o processo de ilhamento. Algumas referências discutem mais detalhadamente as dificuldades citadas anteriormente (IEEE, 2011; TAO *et al.*, 2011; ANTONOVA *et al.*, 2012; HARON *et al.*, 2012; MIVEH *et al.*, 2012; HATZIARGYRIOU, N., 2014). Tais referências apresentam análises sobre a atuação indesejada de proteções, não detecção da falta, baixa seletividade e sensibilidade, descoordenação entre os dispositivos de proteção, efeito de sobrealcance e subalcance nos relés, entre outras.

Diante de suas características de funcionamento e dos impedimentos citados anteriormente, torna-se evidente a necessidade da utilização de um sistema de proteção versátil para o funcionamento adequado das microrredes.

3.1 ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO DE MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos vêm sendo realizados em busca de soluções para superar as dificuldades de implementação de um sistema de proteção para microrredes (BHASKARA; CHOWDHURY, B. H., 2012; MOHAMED; SALAMA, 2016; HOOSHYAR; IRAVANI, 2017). Os métodos que visam realizar a proteção de microrredes de baixa tensão encontrados na literatura podem se basear em diferentes técnicas: medição de distorções harmônicas, uso de transformadas Wavelet, uso de transformadas de Clarke e Park, aplicação de métodos baseados em proteção diferencial, algoritmos que recalculam correntes de curto-circuito e ajustes de relés conforme alterações na topologia da microrrede, detecção de afundamento de tensão, cálculo de impedância da microrrede, aplicação de técnicas de inteligência artificial, entre outras. Os trabalhos atualmente presentes na literatura não apresentam uma solução abrangente para realização de proteção de microrredes considerando sua capacidade de operação em diferentes topologias e a possibilidade de operação em modo ilhado e conectado à rede da concessionária. Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica visando destacar as principais dificuldades enfrentadas por cada um dos métodos presentes na atual literatura a fim de estabelecer um referencial de comparação com as contribuições obtidas neste trabalho. Nas seções seguintes são apresentados os esquemas de proteção para algumas das técnicas encontradas na literatura.

3.1.1 Reajuste de proteção tradicional

Esquemas de proteção adaptativa, baseados em algoritmos que recalculam ajustes de relés, mostram limitações significativas do ponto de vista da versatilidade que um sistema de proteção de microrredes deve apresentar. As principais limitações que podem ser observadas neste tipo de proteção são: a centralização do funcionamento do sistema de proteção, reduzindo sua confiabilidade; baixa seletividade; alta dependência da topologia da microrrede; alta complexidade em realizar a proteção para operação em modo ilhado; aumento da complexidade do sistema de proteção, dificultando sua implementação e manutenção; processamento de grande quantidade de dados em tempo real; entre outros. Em (ISHCHENKO *et al.*, 2012) é proposto um esquema de proteção baseado em cálculo de ajustes e coordenação de relés utilizando um controlador central e um sistema de comunicação via protocolo IEC 61850. Em (SAHOO, 2014), é proposto um esquema de proteção de microrredes por meio da coordenação ótima de relés de sobrecorrentes direcionais temporizados do tipo IDMT (*Inverse Definite Minimum Time*), sem uso de comunicação. Em (LI *et al.*, 2014), é apresentado um sistema de proteção que recalcula ajustes dos relés do sistema com base na detecção de nova configuração da microrrede a partir de monitoramento de

seus parâmetros. Em (DUONG MINH *et al.*, 2016) é proposto um sistema de estimação de correntes de curto-circuito em uma microrrede conectada à concessionária, visando desempenhar a detecção de faltas. Lai *et al.* (2017) propõem um esquema de proteção baseado em reajuste de relés por meio de um controlador central, que é responsável por calcular os ajustes otimizados para os relés de sobrecorrente direcionais da microrrede. Neste trabalho também é utilizado um sistema de comunicação via protocolo IEC 61850.

Os trabalhos mencionados nesta seção corroboram as limitações do método mencionadas anteriormente: centralização do funcionamento do sistema de proteção, baixa seletividade, alta dependência da topologia da microrrede, baixa capacidade de realizar a proteção para operação ilhada, aumento da complexidade do sistema de proteção e processamento de grande quantidade de dados em tempo real.

3.1.2 Detecção do sentido da corrente

Uma vez que métodos de proteção baseados em variação de magnitude de corrente demonstram alto grau de dificuldade para suprir as necessidades de proteção das microrredes, métodos alternativos vêm sendo estudados em busca de uma solução mais robusta. Em alguns estudos são propostos métodos que têm seu princípio de funcionamento baseado no sentido do fluxo de correntes nas microrredes. Em (XU *et al.*, 2014), é proposto um esquema de proteção que faz uso de um controlador central responsável por processar as medidas de tensões e correntes obtidas, e calcular, por meio da teoria da superposição, a direção do fluxo de potências na microrrede. O processo de localização da falta é realizado após detecção de alteração nos valores de corrente e tensão no ponto de conexão comum (PCC) da microrrede e, a partir desta detecção, inicia-se o processo de localização da falta. Portanto, o esquema proposto não protege a microrrede em modo de operação ilhada. Em (LIEN *et al.*, 2014) é proposto um esquema de proteção que protege a microrrede conectada à concessionária por meio da proteção convencional de sobrecorrente, e realiza a proteção da microrrede ilhada por meio do cálculo de fasores a partir de medidas de tensão e corrente em diferentes pontos da microrrede. Utilizando comunicação entre relés digitais, parâmetros são compartilhados para determinação da presença de falta. Similarmente à (LIEN *et al.*, 2014), em (HASSAN *et al.*, 2017) é proposto um algoritmo para detecção e coordenação de relés de proteção utilizando medições de corrente e tensão em diferentes pontos da microrrede, que são usados para realizar o cálculo do ângulo de fase destes parâmetros e detectar mudança de sentido nos seus fluxos de corrente.

Os métodos que possuem seu princípio de funcionamento baseado no sentido do fluxo de corrente e cálculo de fasores, comumente apresentam problemas relacionados a sincronização das medidas obtidas da microrrede, sendo necessário o uso

de outras tecnologias para obter sincronização. Além disto, este tipo de abordagem demonstra alta dependência das características da topologia da microrrede para que tenha um funcionamento confiável.

3.1.3 Análise de transitórios

Além dos estudos apresentados anteriormente, outras técnicas que vêm sendo amplamente utilizadas nos métodos de detecção de faltas em microrredes de baixa tensão são as relacionadas à análise de transitórios da rede. Em (AL-NASSERI *et al.*, 2006) é proposto um esquema de proteção por zonas a partir de medições de tensão na microrrede e do uso das transformadas de Clarke e de Park. As medidas de tensão são obtidas através de transformadores de potencial convencionais. A aplicação da transformada de Park a estas medidas proporciona valores de tensões de eixo direto e quadratura, possibilitando que o sistema seja analisado mais facilmente por meio de dados DC. Em (ZHOU *et al.*, 2015), um esquema de proteção baseado em análise de transformada Wavelet é proposto. Estudos propostos em (HONG *et al.*, 2014) e (SALEH *et al.*, 2014) mostram que, o uso de transformada Wavelet como método de detecção de falta não só vem sendo amplamente utilizado em linhas de transmissão de energia, como também vem demonstrando potencial de aplicação promissor na área de proteção de microrredes. Zhou *et al.* (2015) argumentam que, para aplicação deste método em linhas curtas, é necessário o uso de medidores de corrente e tensão com capacidade de obtenção de alta taxa de amostragem de medições, necessidade que aumenta o custo financeiro da implementação do método, além de apresentar dificuldades associadas aos ruídos de alta frequência da rede. A partir destes argumentos, é proposta a aplicação da interpolação cúbica *Spline* às medições de tensão e corrente da microrrede, eliminando os inconvenientes citados anteriormente. O trabalho mostra que a aplicação de transformadas Wavelet na análise de transitórios da rede pode ser uma boa solução para a implementação de sistemas de proteção em microrredes. O trabalho desenvolvido por Sadeghkhan *et al.* (2016), por sua vez, propõe um esquema de detecção de faltas para microrredes de baixa tensão com alta inserção de fontes conectadas à microrrede via conversores estáticos, utilizando uma função de monitoramento de transitórios e dados obtidos a partir dos conversores.

É comum também, encontrar na literatura trabalhos que associam a transformada Wavelet com técnicas relacionadas à Inteligência Artificial, como em (BEHESH-TAEIN *et al.*, 2016), em que é proposto um esquema de proteção utilizando somente medições de tensões da microrrede, que detecta e localiza faltas por meio do uso de transformada Wavelet, auxiliada pela técnica de Máquina de Vetor de Suporte. Outros trabalhos que utilizam transformada Wavelet também propuseram associações com técnicas de IA, como em (MISHRA *et al.*, 2016), que utiliza o auxílio de Redes Neu-

rais Profundas (*Deep Neural Networks*), e como em (YU *et al.*, 2017), que utiliza o auxílio de *Data-Mining*. Apesar de demonstrar vantagens, a transformada Wavelet possui características que podem comprometer a abrangência de sua utilização. Um dos inconvenientes que pode ser citado a respeito do uso de transformada Wavelet está relacionado às etapas matemáticas que a constituem. A escolha da família de filtros, nível de decomposição e taxa de amostragem são fatores que limitam a abrangência de sua aplicabilidade (CHARYTONIUK *et al.*, 2000; FERNANDEZ; ROJAS, 2002).

O uso de esquemas de proteção que empregam técnicas baseadas nas componentes simétricas das microrredes também podem ser comumente encontradas na literatura. Em (ZAMANI *et al.*, 2011) é proposta a implementação de relés providos de microprocessadores, capazes de desempenhar, além de funções de proteção convencionais, lógicas de funcionamento programáveis. Neste trabalho, utiliza-se as componentes de corrente de sequência zero e negativa para detecção de faltas de impedâncias intermediárias, e afundamento de tensão e função de sobrecorrente para detecção de faltas de baixa impedância. Para a coordenação entre os elementos e as funções de proteção empregadas no esquema proposto, são utilizadas funções direcionais de corrente de sequência positiva e negativa, e temporização na atuação dos elementos do sistema de proteção.

Proteções baseadas em medição de distorções harmônicas também são encontradas na literatura, porém, com menos frequência. Em (CHEN *et al.*, 2017), é proposto um esquema de proteção composto por relés digitais e um sistema de controle de corrente de curto-circuito nas unidades geradoras de energia que possuem interface via conversores estáticos. Sempre que as correntes destas fontes de energia atingem o valor de 2 p.u., o sistema de controle convencional da microrrede é substituído pelo sistema de controle que é responsável por limitar as correntes de curto-circuito de cada uma das fontes no referido valor de magnitude. Sendo assim, este sistema de controle injeta correntes de quinta harmônica na microrrede quando há suposição de falta. Os relés digitais, por sua vez, são programados para analisar as distorções harmônicas por meio da utilização da transformada de Fourier. É importante destacar que os resultados do estudo mostram que o aumento da presença da componente de quinta harmônica em alguns casos chega a 8,2%, valor superior ao limite de 4% estipulado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) para preservar a qualidade da energia da rede (DOE, 2007). Desta forma, caso haja falha na eliminação do curto-circuito ou erro de coordenação entre relés, a injeção de corrente de quinta harmônica pelo sistema de controle poderá prejudicar a qualidade de energia da microrrede.

3.1.4 Função diferencial

A fim de reduzir a necessidade da dinâmica de adaptabilidade de esquemas de proteção de microrredes, alguns autores propõem o uso de função diferencial como técnica para proteger as seções e os elementos das microrredes. Em (NIKKHAJOEI; LASSETER, R. H., 2007) é proposto uma estratégia que utiliza o princípio de proteção diferencial por zonas, detecção de correntes de sequência zero e detecção de correntes de sequência negativa. Apesar de (NIKKHAJOEI; LASSETER, R. H., 2007) não apresentar um esquema de proteção sofisticado, o trabalho evidencia alguns dos diversos obstáculos a serem superados na área de proteção de microrredes. Em (NTHONTHO *et al.*, 2012) é proposto um esquema de proteção de microrredes de baixa tensão baseado em proteção diferencial. Neste trabalho cada elemento da microrrede é protegido por uma função diferencial, onde o termo elemento foi classificado como sendo uma determinada área ou unidade protegida. Estas unidades são definidas como linhas, fontes, barras e cargas. O esquema proposto faz uso de medidores inteligentes e comunicação entre relés, o que garante ao sistema de proteção grande versatilidade. Apesar da eficiência apresentada, o esquema apresenta vulnerabilidade quando consideradas as características dinâmicas de topologia e o conceito operacional *plug-and-play* das microrredes. Estas propriedades causam mudanças durante a operação e, conseqüentemente, podem gerar necessidade de reconfiguração do sistema de proteção.

O estudo apresentado em (ZAREI; PARNIANI, 2017), por sua vez, propõe um esquema de proteção de microrredes de baixa tensão baseado principalmente em proteção diferencial. Os autores propõem um esquema de proteção abrangente, que faz uso de diversas técnicas para realizar a proteção completa da microrrede: técnica de detecção de afundamento de tensão, detecção de sobrecorrente, detecção de distorção de harmônicas, detecção de desvios de frequência e tensão, e detecção de desbalanceamento de correntes. A estratégia proposta apresenta necessidade de realização de ajustes de coordenação entre todos os elementos do sistema de proteção proposto, característica que aumenta a complexidade do esquema, além de torná-lo dependente da topologia da microrrede a ser protegida. A abordagem do método de proteção diferencial em microrredes de baixa tensão é encontrado de maneira menos frequente na literatura, porém as aplicações em média tensão propostas em (USTUN, T. S. *et al.*, 2013; LOUW *et al.*, 2014; RANJBAR; JAMALI, 2014; WHEELER *et al.*, 2017) sugerem que este tipo de proteção pode vir a necessitar de tecnologias auxiliares para realizar a sincronização das medidas utilizadas, além de poderem apresentar custos financeiros elevados devido à necessidade de comunicação entre relés. Além disto, diferenças na precisão de medição de transformadores de corrente podem ser um inconveniente para este tipo de estratégia.

3.1.5 Sistemas Multiagentes

A necessidade de se desenvolver um esquema de proteção de microrredes capaz de protegê-la em suas diversas condições de operação, para os diferentes tipos de faltas existentes, direcionou as pesquisas dessa área de maneira a buscar recursos mais sofisticados para implementação das estratégias de proteções, como por exemplo, a exploração de técnicas de Inteligência Artificial. Um dos recursos oferecidos pela IA que vem sendo amplamente utilizado para aplicações em sistemas elétricos de potência são os Sistemas Multiagentes. Um sistema multiagente é um sistema descentralizado, composto por dois ou mais agentes inteligentes constituídos de programas computacionais, que são capazes de tomar decisões e agir em conjunto para atingir determinado objetivo. O conceito de Sistemas Multiagentes e Agentes Inteligentes é discutidos com detalhes no Capítulo 5. O uso de Sistemas Multiagentes para proteção de microrredes pode apresentar vantagens com relação aos métodos propostos na literatura: possibilidade de utilização de informações distribuídas, de maneira a obter uma visão geral dos parâmetros da microrrede e, conseqüentemente, facilitar a detecção, localização e eliminação de faltas; possibilidade de aplicação do conceito de operação *plug-and-play*; rapidez e alta seletividade para eliminação de faltas; aumento de confiabilidade na operação da microrrede; compatibilidade com padrões de automação e comunicação utilizados para controle e gerenciamento de microrredes; entre outros. Os estudos apresentados nesta seção evidenciam as vantagens mencionadas anteriormente e comprovam que a aplicação de Sistemas Multiagentes possui grande potencial para superar os inúmeros desafios presentes na linha de pesquisa relacionada à proteção de microrredes.

Um dos primeiros trabalhos a fazer a utilização de SMA para proteção de sistemas elétricos foi o de Tomita *et al.* (1998). Este trabalho propõe a criação de quatro tipos de agentes. O princípio de funcionamento do esquema proposto é baseado em proteção diferencial. Desta forma, uma determinada área da rede é monitorada por meio do recebimento de informações de dois agentes, cujos posicionamentos determinam a área protegida. Caso haja diferença na corrente monitorada nestes dois pontos, os agentes do SMA operam em conjunto para realizar a abertura dos disjuntores. Mudanças de topologia também são monitoradas pelos agentes a fim de determinar novas áreas de monitoramento e, conseqüentemente, manter a rede protegida. O uso da inteligência artificial na implementação desta estratégia permite redução de custos de utilização de redundância de hardware, comumente utilizada em esquemas de proteção convencionais a fim de prover maior confiabilidade ao sistema de proteção. Nota-se neste trabalho que, embora a proposta não tenha sido desenvolvida especificamente para aplicação em microrredes, as aptidões obtidas a partir do emprego de SMA e da função diferencial permitem o uso deste esquema de proteção em microrredes de diferentes topologias, considerando-se uma grande variedade de parâmetros técnicos.

Diferentemente de (TOMITA *et al.*, 1998), artigos mais recentes apresentam propostas específicas para proteção de microrredes. Em (WAN *et al.*, 2010) um esquema de coordenação de relés baseado em um sistema multiagente é proposto. Os agentes do SMA apresentado realizam os ajustes de coordenação com base no monitoramento de parâmetros locais de cada um dos elementos da microrrede. Além de possuir uma estratégia de coordenação baseada em níveis de corrente e tempos de atuação, o sistema de coordenação proposto possui também um esquema de bloqueio instantâneo para garantir a coordenação entre os relés do sistema. O esquema de proteção proposto possui características extremamente particulares à topologia da microrrede em estudo, que possui uma configuração simples e pouco desafiadora para a implementação de um sistema de proteção de microrredes. A realização de coordenação baseada em ajustes pré-definidos e a troca de informações entre agentes para bloqueio de abertura de disjuntor no momento da falta são fatores que podem comprometer significativamente o funcionamento do sistema de proteção proposto quando aplicado à microrredes de topologias maiores e mais complexas.

Em (HABIB, H. F. *et al.*, 2017) é proposta uma estratégia de proteção e um sistema de restauração para uma microrrede teste de baixa tensão localizada na Universidade Internacional da Florida. A microrrede é composta por quatro geradores síncronos e quatro cargas, e opera somente em modo ilhado. A arquitetura multiagente sugerida é composta por quatro tipos de agentes, e o método de detecção de falta do esquema proposto baseia-se na utilização de medidas de ângulos de fase de correntes, aferidos nas duas extremidades das seções da microrrede por meio do uso de PMUs (*Phasor Measurement Unit*). Apesar do sistema de proteção proposto se basear em um sistema teste desprovido da presença de geração com interface de conexão via conversores estáticos, o método de detecção de faltas opera independentemente do nível de correntes de curto-circuito do sistema. Esta característica garante flexibilidade e abrangência ao sistema de proteção proposto, mesmo se for considerado uma situação hipotética de operação em modo conectado à concessionária. O uso de PMUs para formação da proteção instantânea pode apresentar problemas com relação à velocidade de obtenção dos parâmetros analisados, uma vez que sistemas de proteção exigem alta taxa de amostragem para que se obtenha uma atuação rápida e eficaz. PMUs com capacidade de obtenção de parâmetros com alta taxa de amostragem possuem custos elevados, podendo não justificar a aplicação em microrredes de baixa tensão.

Em (CINTUGLU *et al.*, 2017) é proposto um sistema de proteção adaptativo baseado na detecção de sobrecorrente, que faz uso de Sistemas Multiagente e do protocolo de comunicação industrial IEC61850 para seu funcionamento adequado. O sistema de proteção faz uso de agentes inteligentes implementados em IEDs (*Intelligent Electronic Devices*), estrategicamente posicionadas em diferentes pontos da

microrrede, sendo esta a mesma microrrede teste utilizada em (HABIB, H. F. *et al.*, 2017), localizada na Universidade Internacional da Florida.

Mais recentemente outros trabalhos também propuseram a utilização de sistemas multiagente para proteção de microrredes de baixa tensão, baseada no princípio de ajuste de funções de proteção tradicionais. Em (HABIB, Hany Fawzy; MOHAMMED, 2018), a proposta de proteção consiste em distribuir agentes nos recursos energéticos distribuídos da microrrede e calcular ajustes de sobrecorrente a partir do cálculo de contribuição de corrente de curto-circuito de cada um deles. A estratégia para proteger a microrrede em modo ilhado consiste no uso de um supercapacitor para obter contribuição de corrente de curto-circuito suficientemente significativa para sensibilizar a proteção de sobrecorrente. Em (KHAZAEI; MAHMOUDI, 2019) o sistema de proteção proposto é constituído por agentes que alteram seus ajustes de proteção instantânea e coordenação de acordo com o modo de operação da microrrede. Resultados são obtidos para uma microrrede de um único ramo alimentador. Em (UZAIR *et al.*, 2019), uma arquitetura híbrida de sistema multiagente, faz uso de *machine learning* para desempenhar o sistema de proteção de microrredes de baixa tensão. Ajustes de relés de sobrecorrentes direcionais são realizados pelos procedimentos associados ao *machine learning*, enquanto os agentes são responsáveis pela dinâmica de transmissão de dados e operação do sistema de proteção.

Além dos estudos mencionados, foram encontrados na literatura também outros trabalhos que, apesar de menos relevantes ao estudo de proteção de microrredes de baixa tensão, possuem propostas de estudo com uso de Sistemas Multiagentes que também ilustram bem as diversas vantagens e alto potencial de aplicabilidade citados no início desta seção, além de apresentarem estruturas de funcionamento interessantes para a perspectiva de estudo deste trabalho. Os referidos estudos não são detalhadamente discutidos devido à sua menor relevância perante o foco principal desta tese de doutorado, porém julgou-se válido citá-los como complementação às ponderações feitas nesta seção. O estudo apresentado em (PARK; LIM, 2006) propõe um sistema de supervisão e controle para coordenar os agentes de um sistema de proteção baseado em Sistemas Multiagentes. Agentes responsáveis pelos relés acusam a possível presença de uma falta por meio da detecção de sobrecorrente no ponto da rede onde se situam. Estas informações são interpretadas por um agente responsável pelo diagnóstico e, em seguida, este agente determina quais agentes devem efetuar abertura de disjuntores visando isolar a menor parcela possível do sistema. A determinação do local da falta leva em consideração a distância dos relés da falta e o tempo em que cada relé leva para detectá-la. Em (ZHU *et al.*, 2009) é proposto um esquema de proteção para sistemas de alta tensão baseado no uso de SMA capaz de identificar a topologia da rede e calcular os ajustes adequados para cada um dos relés presentes nesta rede. Tanto a matriz de impedâncias quanto os cálculos dos ajustes são reali-

zados por agentes da arquitetura proposta. O estudo desenvolvido em (SHENG *et al.*, 2010) deixa claro as vantagens do uso de SMA mencionadas anteriormente. Embora a implementação do sistema de proteção tenha sido realizada visando a aplicação em microrredes de alta tensão, sua versatilidade, eficiência e simplicidade de implementação realçam os pontos positivos do uso de SMA e corroboram os argumentos expostos no início desta seção. Neste estudo é proposto um sistema de proteção adaptativo por meio do uso de SMA e sistema especialista, baseando-se no princípio de funcionamento da proteção diferencial. A configuração de zonas de proteção é ajustada de acordo com as regras do sistema especialista e as mudanças supervisionadas pelo sistema *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Cada uma das zonas de proteção da microrrede possui pelo menos dois agentes de proteção. Estes relés se comunicam entre si a fim de aplicar o princípio da proteção diferencial aos valores de correntes medidos na seção da microrrede delimitada pela sua respectiva zona de proteção. Apesar de não ser considerada a hipótese do modo de operação conectado à rede principal, o sistema de proteção demonstra alta adaptabilidade, sendo compatível com qualquer topologia da microrrede. Em (ABEDINI *et al.*, 2013), é apresentada uma arquitetura multiagente para proteção de microrrede com centralização de informações locais da rede. O SMA atua na reconfiguração dos ajustes de proteção dos relés digitais da microrrede. Esta arquitetura possui possibilidade de interação com outras duas arquiteturas multiagentes que, operando de maneira conjunta, são capazes de simular o sistema de proteção e o ambiente de comercialização de energia elétrica simultaneamente. Em (JIAPENG; YINGFEI, 2015) é proposto um sistema multiagente para aplicação em sistemas de alta tensão, capaz de corrigir erros de operação comuns no uso de proteção composta por relés de distância convencionais, referentes aos limites da área de proteção ajustadas nestes relés. Em (ANANDA *et al.*, 2016) é proposta uma estratégia de proteção baseada em uma arquitetura Multiagente desenvolvida por meio do *framework Java Agent Development Framework* (JADE), capaz de localizar e isolar faltas, bem como restaurar o sistema. Um esquema de detecção de topologia da microrrede utilizando-se teoria de grafos e matriz de impedância também é proposto. Em (HUSSAIN *et al.*, 2016) é proposto uma estratégia de proteção utilizando-se Sistemas Multiagentes e *N-version programming* (NVP). Cada agente do sistema é responsável por monitorar parâmetros de correntes e tensões trifásicas locais da microrrede e, a partir destas informações, fazem o uso do NVP em 3 módulos (transformada de Clarke, função diferencial de corrente de sequência positiva e função de sobrecorrente convencional) para localizar e isolar a falta. Em (AGHDAM *et al.*, 2018) uma estratégia de proteção diferencial temporizada é proposta. A temporização atribuída à função diferencial permite que este esquema proteja linhas de distribuição mesmo na presença de alimentadores e cargas entre os dois pontos de medição de corrente da proteção. Um sistema multiagente é apresentado para controlar e coordenar a temporização da

proteção diferencial de acordo com os tempos dos fusíveis responsáveis pela proteção dos alimentadores e cargas.

3.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A breve análise dos aspectos evolutivos dos sistemas elétricos de potência apresentados no Capítulo 2, juntamente com a discussão de caráter investigativo das estratégias de proteção de microrredes explicitadas na revisão de literatura deste trabalho, preconizam o eminente potencial de aplicação de SMA às estratégias de proteção de microrredes de baixa tensão. A partir da revisão de literatura realizada, constata-se que o uso de SMA como aplicação em proteção de microrredes ainda é muito pouco explorado quando comparado ao uso de tecnologias mais tradicionais. Acredita-se que esta constatação se deve ao fato de SMAs apresentarem caráter inovador e interdisciplinar, além ser uma aplicação ainda pouco difundida na área de sistemas elétricos de potência. Ademais, os principais argumentos desfavoráveis ao uso de SMA encontrados na literatura exaltam fatores como o alto custo de implementação, dificuldades devido ao uso de comunicação, vulnerabilidade à colapsos no SMA e a necessidade do uso de tecnologias sofisticadas. Com base na análise do conteúdo exposto no Capítulo 2, constata-se a possibilidade de uma forte tendência do uso de estruturas de controle e proteção tecnologicamente mais sofisticadas para viabilizar a implementação real do conceito de microrredes. O conceito de microrredes mais aceito pela comunidade acadêmica inclui a presença de um controlador central e suporte para comunicação em sua infraestrutura (KATIRAEI *et al.*, 2008; CHOWDHURY, S.; CROSSLLEY, 2009; HATZIARGYRIOU, N., 2014; MARTIN-MARTÍNEZ *et al.*, 2016), fator que aproxima o uso de estruturas de comunicação e medidores inteligentes da realidade e justifica os empecilhos de custo e uso de tecnologias avançadas. Haja vista que uma das principais capacidades dos SMAs é proporcionar soluções eficientes e de baixa complexidade, sua aplicação em sistemas elétricos de potência apresenta potencial factível para tornar impertinentes os argumentos desfavoráveis à sua utilização.

Dentre os estudos apresentados na revisão bibliográfica, notou-se que as estratégias de proteção propostas possuem características que tornam os sistemas de proteção de microrredes de baixa tensão inflexíveis. Estas características estão listadas a seguir:

- a) Uso de centralização de informações;
- b) Necessidade de sincronização temporal;
- c) Uso de ajustes fixos ou cenários pré-determinados;
- d) Realização de cálculos complexos em tempo real;
- e) Incompatibilidade com o conceito *plug-and-play*;

- f) Utilização de alta quantidade de parâmetros para detecção e localização de faltas;
- g) Incapacidade de contemplação dos modos de operação ilhado e conectado;
- h) Funcionamento dependente da topologia fixa da microrrede.

O Quadro 2 apresenta, de maneira geral, a presença das características mencionadas em cada uma das estratégias de proteção apresentadas na revisão bibliográfica deste capítulo.

Quadro 2 – Sintetização de trabalhos da revisão bibliográfica.

Seção	Referências bibliográficas	Características							
		a	b	c	d	e	f	g	h
3.1.1	(ISHCHENKO <i>et al.</i> , 2012)	X		X		X			X
	(SAHOO, 2014)			X		X		X	X
	(LI <i>et al.</i> , 2014)	X		X	X	X			X
	(DUONG MINH <i>et al.</i> , 2016)	X		X	X			X	X
	(LAI <i>et al.</i> , 2017)	X		X	X				X
3.1.2	(XU <i>et al.</i> , 2014)	X			X	X		X	
	(LIEN <i>et al.</i> , 2014)		X						X
	(HASSAN <i>et al.</i> , 2017)	X	X			X		X	X
3.1.3	(AL-NASSERI <i>et al.</i> , 2006)		X			X			X
	(SADEGHKHANI <i>et al.</i> , 2016)						X		X
	(ZAMANI <i>et al.</i> , 2011)			X	X				X
	(CHEN <i>et al.</i> , 2017)			X		X			X
3.1.4	(NIKKHAJOEI; LASSETER, R. H., 2007)			X		X		X	X
	(NTHONTHO <i>et al.</i> , 2012)		X			X			X
	(ZAREI; PARNIANI, 2017)		X	X		X	X		X
3.1.5	(WAN <i>et al.</i> , 2010)			X		X			X
	(HABIB, H. F. <i>et al.</i> , 2017)		X					X	
	(CINTUGLU <i>et al.</i> , 2017)			X		X			X
	(HABIB, Hany Fawzy; MOHAMMED, 2018)			X			X		X
	(KHAZAEI; MAHMOUDI, 2019)			X			X		
	(UZAIR <i>et al.</i> , 2019)			X			X		

Fonte – próprio autor.

Sendo assim, o presente trabalho visa desenvolver um sistema de proteção de microrredes, por meio do uso de Sistemas Multiagente, que possui um conjunto de características ainda não contemplado pelos trabalhos presentes na literatura: flexibilidade, confiabilidade e baixa complexidade. Desta forma, a principal contribuição deste trabalho para a literatura é o desenvolvimento de uma estratégia de proteção capaz de proporcionar vantagens perante as estratégias apresentadas nesta revisão bibliográfica, tais como:

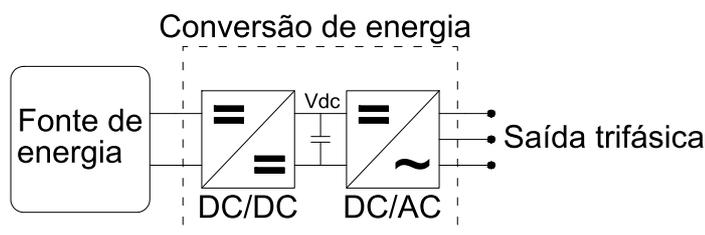
- a) Não apresentar a necessidade de centralização de informações para desempenhar sua função;

- b) Não apresentar necessidade de sincronização temporal entre seus dispositivos;
- c) Não fazer uso de dispositivos de proteção com ajustes fixos, ou ajustes para cenários pré-determinados;
- d) Não apresentar necessidade de cálculos complexos de parâmetros em tempo real;
- e) Desempenhar sua função de acordo com o conceito *plug-and-play*;
- f) Utilizar baixa quantidade de parâmetros para detecção e localização de falta;
- g) Detectar presença de falta em microrrede predominantemente composta por fontes de geração com baixa contribuição de corrente de curto-circuito;
- h) Contemplar os modos de operação ilhado e conectado;
- i) Apresentar capacidade de funcionamento em microrredes com alta inserção de IBDGs;
- j) Apresentar funcionamento independente da topologia da microrrede;
- k) Apresentar possibilidade para ser aplicado em redes de média tensão.

4 COMPORTAMENTO DE IBDGS EM SITUAÇÃO DE FALTA

Uma unidade de geração distribuída que possui sua conexão à microrrede via conversor estático é tipicamente composta por uma fonte de geração primária e um sistema de conversão de energia, conforme apresentado na Figura 4 (HOSSAIN, M. A. *et al.*, 2017). Microturbinas, células à combustível, módulos fotovoltaicos, baterias e geradores eólicos são alguns dos exemplos que podem ser utilizados como fonte primária neste tipo de geração distribuída. Unidades de geração distribuída que utilizam fontes de energia renováveis como fonte primária são, normalmente, não despacháveis, e conseqüentemente, possuem provisão de potência comumente controlada com base em suas condições ótimas de geração de energia e disponibilidade de recursos. Atentando-se a questões ambientais, o presente trabalho foi desenvolvido considerando que as fontes de geração de energia com interface via conversores estáticos possuem suas fontes primárias de energia renováveis e, portanto, são consideradas fontes não despacháveis.

Figura 4 – Unidade de IBDG típica.



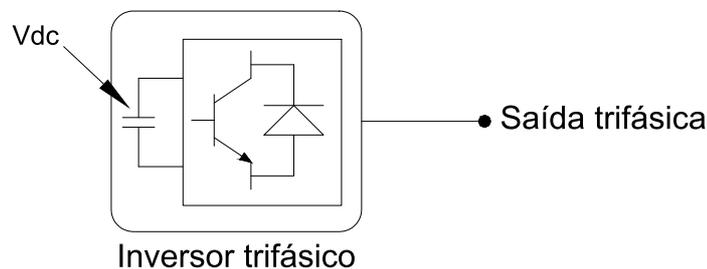
Fonte – próprio autor.

Uma vez que o inversor mais utilizado para o tipo de aplicação em questão é o inversor controlado por tensão - *Voltage Source Inverter* (VSI) (MOHAN *et al.*, 2002; GUERRERO-RODRÍGUEZ *et al.*, 2017), o bloco de conversão de energia apresentado no diagrama da Figura 4 representa também a configuração tipicamente mais utilizada de conversão de energia, composta por um conversor DC/DC, um capacitor de conexão e um inversor do tipo VSI (conversor DC/AC) (KATIRAEI *et al.*, 2008). Sendo assim, a energia gerada pela fonte primária do diagrama será condicionada para atender a tensão V_{dc} e, conseqüentemente, a tensão de entrada do inversor.

Para que a IBDG tenha uma operação estável e seja capaz de atender mudanças repentinas na demanda e acompanhar a dinâmica de funcionamento da tecnologia utilizada como fonte primária, é desejável que a capacidade de armazenamento de energia do capacitor de conexão seja adequadamente alta para que estes objetivos sejam atingidos. Nestas condições, independentemente da tecnologia que for usada para gerar e condicionar a energia para a entrada do conversor DC/DC, a tensão V_{dc}

do capacitor de conexão tende a ser constante durante toda a operação do sistema apresentado na Figura 4 (LASSETER, Robert H; PIAGI, 2006). Desta forma, para os objetivos de estudo deste trabalho, é possível realizar a simplificação do modelo da IBDG, conforme apresentado na Figura 5. Por conseguinte, torna-se evidente que a contribuição de corrente de curto-circuito fornecida por este tipo de geração distribuída é totalmente dependente do inversor de corrente e suas estratégias de controle, fato demonstrado pelos estudos apresentados em (BRUCOLI, 2008; PLET *et al.*, 2011; DAO VAN; CHAITUSANEY, 2012; PLET, 2012).

Figura 5 – Diagrama unifilar de IBDG típica simplificada.



Fonte – próprio autor.

4.1 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM IBDGS

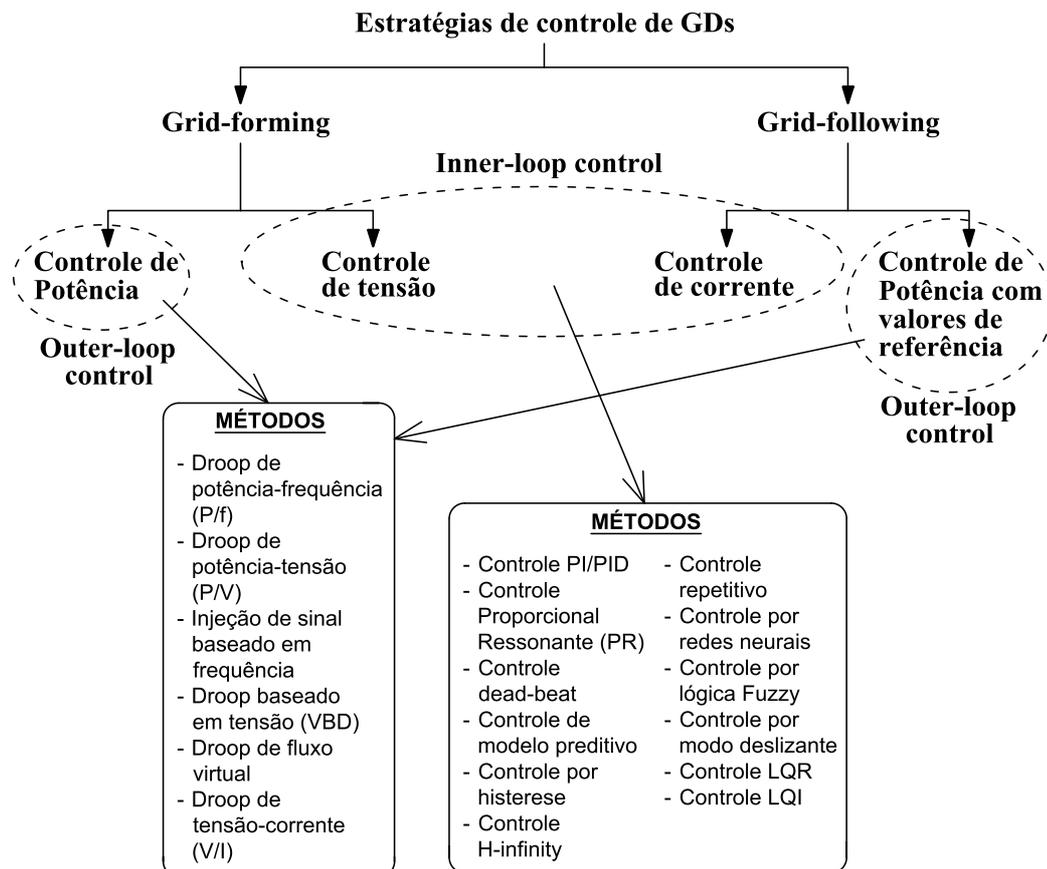
A estratégia de controle utilizada em uma IBDG é definida de acordo com a sua condição operacional e com a natureza de sua interação com a microrrede. Existem duas classificações para os modos de controle de IBDGs: o *grid-forming* e o *grid-following*.

No modo *grid-forming*, o sistema de controle é responsável por determinar a tensão e a frequência da rede, controlando estes parâmetros no ponto de conexão da IBDG. Esta estratégia de controle é utilizada em situações onde a microrrede opera ilhada, e não há uma fonte de energia que seja capaz de determinar a tensão da microrrede. No modo *grid-following*, por sua vez, o sistema de controle é tipicamente responsável por controlar a injeção de potência ativa e reativa com base na tensão e frequência estipuladas pela rede. Sendo assim, esta estratégia de controle é utilizada nas IBDGs de uma microrrede conectada à rede principal, ou nas IBDGs de uma microrrede ilhada onde exista uma fonte de geração capaz de manter a tensão e a frequência de operação da microrrede (KATIRAEI *et al.*, 2008).

Independentemente da classificação entre *grid-forming* ou *grid-following*, as estratégias de controle comumente utilizadas nas IBDGs possuem tipicamente uma estrutura de controle *multi-loop*, composta por dois *loops* para desempenhar suas

funções de controle (*Inner-loop control* e *Outer-loop control*) (BARSALI *et al.*, 2002; PRODANOVIC; GREEN, 2003; PLET, 2012; GUERRERO-RODRÍGUEZ *et al.*, 2017). A Figura 6 ilustra um diagrama de estratégias de controle de IBDGs.

Figura 6 – Estratégias de controle de IBDGs.



Fonte – próprio autor.

Neste diagrama é possível observar a distinção entre as estratégias *grid-forming* e *grid-following*, além da classificação dos *loops* de controle mencionados anteriormente. No caso do modo *grid-forming*, o *Outer-loop control* é o *loop* responsável por determinar um valor de tensão de referência por meio do uso dos métodos apresentados na Figura 6. Este valor de referência permite que o *Inner-loop control* realize o controle de tensão mediante o uso dos métodos também indicados na Figura 6 (KHONGKHACHAT; KHOMFOI, 2015). Ademais, este *loop* também tem a função de assegurar qualidade à corrente fornecida pela IBDG (SADEGHKHANI *et al.*, 2016). Similarmente, para o caso do modo *grid-following*, o *Outer-loop control* é o *loop* responsável por determinar um valor de referência de corrente para que seja possível controlar a injeção de potências ativa e reativa na microrrede de acordo com a tensão medida no ponto de conexão da IBDG. Com base neste valor de referência, o *Inner-*

loop control utiliza dos métodos indicados na Figura 6 para regular a corrente que é injetada na rede, além de assegurar boa qualidade de energia por meio do controle de harmônicas (PLET, 2012).

Com base no exposto, conclui-se que as estratégias de controle apresentadas nesta seção influenciam na contribuição de corrente de curto-circuito das IBDGs, portanto algumas de suas particularidades são discutidas na seção seguinte, a fim de facilitar a compreensão das modelagens desenvolvidas neste trabalho.

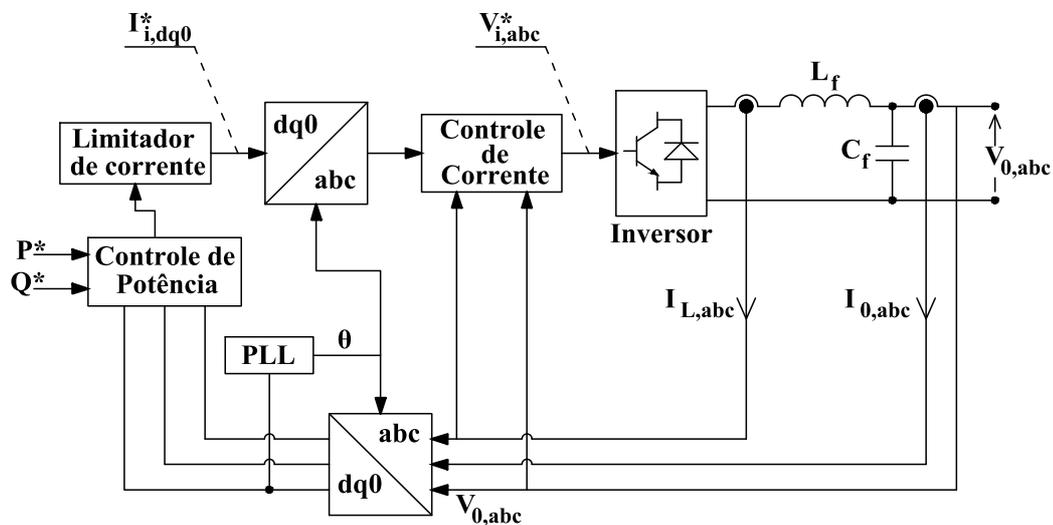
4.2 MODELAGEM DE IBDGS PARA ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

Tendo em vista que a abordagem de estudo deste trabalho visa abranger a microrrede operando tanto em modo ilhado quanto em modo conectado à rede principal, a modelagem das IBDGs foi realizada com base no modo de controle *grid-following*. Desta forma, o modelo de IBDG elaborado torna-se compatível com os dois modos de operação da microrrede, desde que haja uma fonte de geração capaz de determinar a tensão e a frequência da microrrede em modo ilhado. A Figura 7 ilustra um esquema de controle de inversor tipicamente utilizado para IBDGs controladas em modo *grid-following*.

Nota-se que o esquema de controle apresentado é composto por diversos blocos com diferentes funções para que o controle desejado seja alcançado. Estão presentes no diagrama: o bloco responsável por limitar a magnitude de corrente de saída do inversor (Limitador de corrente), o bloco responsável por controlar a qualidade da corrente (Controle de corrente), o bloco responsável por controlar as potências ativa e reativa na rede (Controle de potência), o bloco responsável por obter a fase da corrente medida no ponto de conexão da IBDG (*Phase-Locked Loop* (PLL)) e o bloco responsável por converter o quadro de referência das medidas de corrente ($dq0/abc$). Cada um destes blocos possui uma variedade de métodos internos que podem ser empregados para desempenhar suas funções.

Observando-se a ampla variedade de estratégias de controle apresentadas na Seção 4.1, e levando-se em consideração as características do esquema de controle apresentado na Figura 7, fica evidente que existe uma vasta quantidade de combinações de técnicas e métodos que podem ser utilizados para implementar um esquema de controle de uma IBDG. Segundo Md. Alamgir Hossain *et al.* (2017), até a presente data não existem normas e padrões estabelecidos para a concepção de esquemas de controle de geração distribuída com interface via conversores estáticos, fator que torna a detecção de faltas em microrredes predominantemente compostas por este tipo de fontes de geração uma tarefa extremamente complexa, já que não existe um padrão de comportamento de seus parâmetros durante o momento de contingência.

A escolha do quadro de referência a ser utilizado para a elaboração do sistema de controle *multi-loop* influencia diretamente na escolha do método a ser utilizado

Figura 7 – Esquema de controle tipicamente utilizado em modo *grid-following*.

Fonte – (PLET, 2012), editado pelo autor.

no bloco limitador de corrente e, portanto, possui grande influência na resposta do inversor a situações de curto-circuito. Existem três opções de quadros de referência: *Synchronous Reference Frame* (SYRF), *Stationary Reference Frame* (STRF) e *Natural Reference Frame* (NARF) (TIMBUS *et al.*, 2009). O quadro de referência SYRF é comumente utilizado para compor o esquema de controle *multi-loop*, uma vez que lida com parâmetros de eixo direto e eixo de quadratura, tornando possível a utilização de técnicas de controle de simples aplicação, como por exemplo o controlador Proporcional-Integral. O estudo apresentado em (PLET, 2012), elenca três métodos para utilização no bloco limitador de corrente no modo de controle *grid-following*:

- Limitador rígido instantâneo usando NARF: limita a magnitude de corrente de saída por fase do inversor utilizando um limite rígido de corrente;
- Limitador rígido instantâneo usando SYRF: limita a magnitude de corrente de saída do inversor pela aplicação de limitador nas correntes de eixo direto e quadratura;
- Corrente de falta pré-definida usando SYRF: uma vez que um limite pré-estipulado é atingido, o inversor passa a fornecer a magnitude de corrente pré-definida, sem apresentar distorções da onda como ocorre com o limitador rígido.

Estudos presentes na literatura demonstram que os métodos limitadores de corrente mencionados acima apresentam inconvenientes para utilização em uma microrrede real. Plet (2012) mostra que a utilização do limitador rígido instantâneo usando NARF acarreta em corrente de saída com ondas distorcidas, além da senoide apresen-

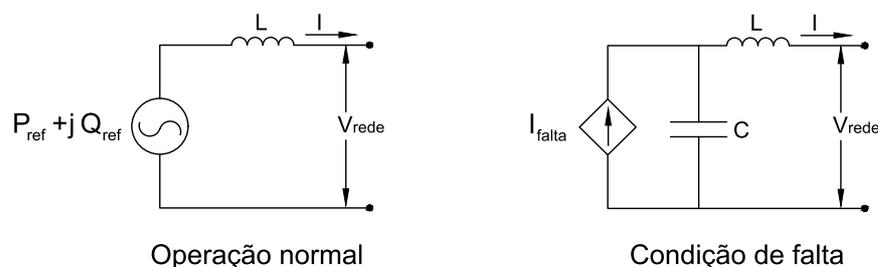
tar cristas e vales ceifados. Os resultados do estudo proposto em (BRUCOLI, 2008) mostram que o uso de limitador de corrente usando SYRF pode ser indesejável, já que neste caso não é possível controlar cada uma das fases separadamente, acarretando em injeção de corrente de curto-circuito nas fases da microrrede não afetadas pela falta, além de causar situações de sobretensão na rede.

A fim de evitar as objeções citadas anteriormente, é possível utilizar o método limitador de corrente *Root Mean Square* (RMS) por fase usando NARF (PLET, 2012). Brucoli (2008) e Plet (2012) demonstram que a utilização do quadro de referência NARF para controle e para limitação de corrente RMS evitam distorções de ondas, injeções de corrente de falta em fases não afetadas e ocorrências de sobretensão na microrrede. Para que isto seja possível, é necessário utilizar o controlador Proporcional Ressonante, que é amplamente utilizado em diversos estudos e aplicações com foco em controle de conversores estáticos (TEODORESCU *et al.*, 2006).

Do ponto de vista de qualidade de energia e proteção da microrrede, o esquema de controle que utiliza NARF para controlar e limitar a corrente em RMS demonstra-se a melhor opção, uma vez que esta configuração é capaz de controlar cada fase separadamente, independentemente da existência de falta na microrrede. Sendo assim, somente a fase que se encontra em situação de falta poderá apresentar aumento na magnitude de corrente, evitando reduzir a qualidade de energia da microrrede e, ao mesmo tempo, formando um padrão de comportamento para facilitar a detecção de ocorrência de curto-circuito.

Com base nos argumentos apresentados neste capítulo, dois tipos de modelagem de IBDG foram utilizadas no estudo de curto-circuito proposto neste trabalho. O primeiro deles, chamado de IBDG Modelo 1, foi modelado de maneira semelhante aos modelos simplificados apresentados em (BRUCOLI, 2008; PLET *et al.*, 2010, 2011; DAO VAN; CHAITUSANEY, 2012; VAN TU *et al.*, 2013). Na Figura 8 é ilustrado o diagrama que representa o modelo referido.

Figura 8 – Diagrama elétrico da IBDG Modelo 1.



Fonte – próprio autor.

Neste diagrama, observa-se que, durante a operação normal da microrrede, o

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conteúdo apresentado neste capítulo demonstra o amplo potencial de exploração que o campo de pesquisa relacionado ao estudo da resposta à curto-circuito de IBDGs oferece para a área de pesquisa em microrredes e energias renováveis. A falta de normatização e particularidades técnicas de estratégias e métodos de controle que padronizem respostas à curtos-circuitos tornam a detecção de faltas em microrredes uma tarefa consideravelmente complexa. Por ser um assunto ainda pouco explorado pela comunidade acadêmica, poucos modelos matemáticos para simulação são encontrados na literatura, fato que reforça a importância do desenvolvimento do estudo nesta área.

5 SISTEMAS MULTIAGENTES

Sistemas Multiagentes é o nome dado à uma subárea da Inteligência Artificial Distribuída (IAD) que, por sua vez, é um enfoque da área de Inteligência Artificial. Um sistema composto por agentes inteligentes situados em um determinado ambiente, que além de executarem suas ações de maneira autônoma, também interagem entre si para alcançarem objetivos globais ou individuais, é chamado de sistema multiagente. Sua utilização depende da natureza do objetivo a ser alcançado, e este tipo de sistema visa solucionar problemas complexos decompondo-os em problemas mais simples. Desta forma, a natureza dos problemas compatíveis com a aplicação de sistemas multiagentes necessariamente envolve informações distribuídas.

Os principais estímulos para a evolução do conceito de IAD, cujas propriedades também podem estar presentes em Sistemas Multiagentes, estão associados a empecilhos que inviabilizam a centralização da informação, como por exemplo, aplicações que envolvem processamento em tempo real de dados recebidos de diferentes localizações geográficas, organizações independentes que possuem políticas de privacidade e segurança de suas informações, e sistemas de informação com grande número de dispositivos ou parâmetros de sensoriamento (WEISS, 1999).

Desta maneira, pode-se dizer que os agentes de um Sistema Multiagente agem de maneira autônoma, a fim de maximizar sua eficiência e concluir suas tarefas em busca de um objetivo global ou individual, podendo cooperar entre si para atingir suas metas, sejam elas as compartilhadas ou não. Apesar da incisiva característica de independência e autonomia dos agentes, é possível criar estruturas organizacionais entre os agentes, a fim de coordenar e aprimorar a busca pelos objetivos globais. Segundo Bond e Gasser (1988), os principais pontos positivos proporcionados pelo uso de Sistemas Multiagentes, caracterizados pelas propriedades da IAD, são:

- a) Adaptabilidade: a distribuição espacial, lógica, temporal e semântica, proporcionam perspectivas alternativas a situações inesperadas;
- b) Redução de custos: um sistema distribuído tende a envolver um grande número de sistemas simples de computadores, que possuem custos reduzidos quando comparados com a utilização de sistemas complexos com informações centralizadas;
- c) Facilidade de desenvolvimento e gerenciamento: o grande número de sistemas mais simples faz com que o desenvolvimento destes seja facilitado quando comparado com o desenvolvimento de sistemas centralizados, que possuem maior complexidade. Operações de expansão em sistemas distribuídos também são mais simples de serem executadas;
- d) Aumento de eficiência e velocidade: ações concorrentes podem aumentar a velocidade dos processamentos computacionais;

- e) Autonomia: um sistema descentralizado possibilita controle local à cada uma de suas partes, proporcionando-lhes maior autonomia;
- f) Confiabilidade: sistemas distribuídos possuem maior confiabilidade nas operações do que sistemas centralizados, pois podem apresentar redundância de informações, verificação de dados, entre outros;
- g) Redução de limitações computacionais: um agente computacional individual possui capacidade, racionalidade e recursos para resolução de problemas limitados, o que pode não ser suficiente para solucionar grandes problemas;
- h) Especialização: sistemas distribuídos podem ter agentes especializados, otimizando a realização de suas tarefas.

Apesar das inúmeras vantagens descritas anteriormente, a utilização de Sistemas Multiagentes também possui inconvenientes e dificuldades (BOND; GASSER, 1988):

- a) Organização do problema: sintetização dos resultados, decomposição, formulação e alocação do problema entre os agentes inteligentes são tarefas mais complexas do que em sistemas centralizados;
- b) Interação e comunicação entre agentes: definição de linguagens de comunicação, de protocolos a serem usados e de situações em que agentes devem utilizar comunicação;
- c) Ações dos agentes: garantir que os agentes sejam coerentes em suas tomadas de decisões, levando-se em consideração as consequências globais de seus atos;
- d) Organização dos agentes: implementação de uma estrutura organizacional para coordenação dos agentes;
- e) Conflitos entre agentes: agentes podem ter diferentes pontos de vista e objetivos próprios, fatores que podem vir a dificultar sua coordenação.

5.1 AGENTES INTELIGENTES

Um agente é um sistema computacional, que possui capacidade de percepção e interação com ambiente no qual está situado. Este agente deve possuir aptidão para realizar ações autônomas que afetem este ambiente a fim de alcançar seus objetivos. Nota-se que, nesta definição de agente proposta em (WOOLDRIDGE, M., 2009), não é feita alusão ao termo “inteligente”. Agentes que não possuem inteligência são tipicamente capazes de perceber o ambiente em que estão situados e realizar suas ações a partir de um repertório de atos pré-estabelecidos, capazes de gerar modificações no ambiente. O conceito de inteligência em agentes está relacionado à

capacidade de realizar ações autônomas flexíveis, onde “flexíveis” deve abranger as seguintes concepções (WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, 1995):

- a) Reatividade: agentes inteligentes são capazes de perceber o ambiente em que estão situados e responder em tempo hábil a mudanças que ocorrem neste ambiente, com o propósito de atingir seus objetivos de projeto;
- b) Pró-atividade: agentes inteligentes são capazes de apresentar comportamentos direcionados a determinadas finalidades por meio de tomada de iniciativas, com intenção de alcançar seus objetivos;
- c) Habilidade social: agentes inteligentes são capazes de interagir com outros agentes para alcançar seus objetivos.

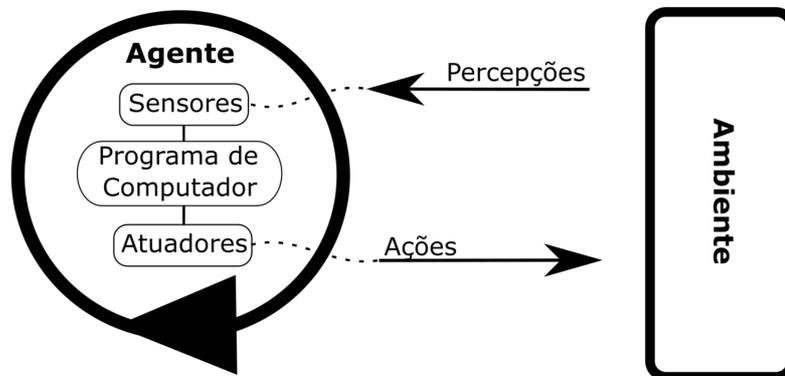
Além das características gerais essenciais a um agente inteligente elencadas anteriormente, outros atributos deliberativos podem-lhe ser atribuídos (GOODWIN, 1995):

- a) Predição: um agente é preditivo quando o modelo de funcionamento do ambiente possui precisão suficiente para que seja possível que este agente estime corretamente as consequências de suas ações, e avalie como estas devem ser realizadas para alcançar seus objetivos;
- b) Interpretação: um agente é interpretativo se ele é capaz de interpretar corretamente as condições e alterações do ambiente em que está situado;
- c) Racionalidade: um agente é racional se ele possui capacidade de optar pela realização de ações que predizem atingir seus objetivos.

Para exemplificar o funcionamento básico de um agente inteligente, na Figura 10 é mostrado um diagrama esquemático que representa a interação de um agente com o ambiente. O programa computacional presente na Figura 10 representa a inteligência do agente, ou seja, é onde as informações referentes ao ambiente, obtidas pelos sensores, são interpretadas e comparadas com seus conhecimentos. A partir deste procedimento, o programa define as ações a serem executadas pelos atuadores. As funções do programa computacional mencionadas anteriormente fazem referência a uma estrutura simples de um agente. Entretanto, agentes com estruturas mais complexas podem possuir mais recursos para, por exemplo, comparar o estado atual do ambiente com estados anteriores, estimar como suas possíveis ações refletirão no ambiente, e como as possíveis novas condições de ambiente resultantes de suas ações refletirão neles mesmos.

Levando-se em consideração os aspectos e propriedades dos agentes inteligentes discutidos nesta seção, é possível observar que a natureza do ambiente em que um agente está inserido afeta diretamente o seu projeto estrutural, uma vez que o programa computacional de um agente interage continuamente com as condições do ambiente. Desta forma, torna-se evidente que o estudo das propriedades de ambientes

Figura 10 – Interação de um agente com o ambiente.



Fonte – Russell e Norvig (2009), editado pelo autor.

é imprescindível para aplicações de agentes inteligentes, e suas características são discutidas na Seção 5.1.1.

5.1.1 A natureza dos ambientes

Conforme mencionado anteriormente, as propriedades de um ambiente são determinantes para realização adequada do projeto estrutural de um agente, assim como para sua implementação. De acordo com as suas propriedades, os ambientes, segundo a classificação apresentada em (RUSSEL; NORVIG, 2004), podem ser:

- a) Observáveis ou parcialmente observáveis: um ambiente é observável se o agente possui percepção de todos os aspectos relevantes para a escolha de uma ação, e, parcialmente observável, quando possui percepção de apenas alguns destes aspectos;
- b) Determinísticos ou estocásticos: se o próximo estado de um ambiente pode ser determinado pelo seu estado atual e pela ação executada pelo agente, o ambiente é chamado de determinístico. Caso não exista a possibilidade de estimação de seu próximo estado, o ambiente é chamado de estocástico;
- c) Episódicos ou sequenciais: um ambiente é chamado de episódico quando as realizações de um agente são separadas em episódios, onde cada episódio é formado pelos atos de percepção e execução de uma única ação. Esta propriedade faz com que as decisões de um agente levem em consideração somente os aspectos do episódio vigente, fazendo com que não haja interferência dos episódios anteriores em suas decisões. Em um ambiente sequencial, por sua vez, não existe esta divisão de episódios. Assim, uma decisão atual pode influenciar em todas as futuras decisões de um agente;

- d) Estáticos ou dinâmicos: se um ambiente pode mudar enquanto um agente ainda está formulando sua decisão, este ambiente é chamado de dinâmico. Por outro lado, um ambiente estático não sofre alterações, e, tendo em vista que o agente não necessita verificar alterações de ambiente constantemente durante seu processo de deliberação, pode-se afirmar que o mesmo exige interações menos complexas do que as de um ambiente dinâmico;
- e) Discretos ou contínuos: um ambiente é considerado discreto quando o mesmo possui um número finito de estados distintos. Um ambiente contínuo por sua vez, não sofre alterações de estado através de “amostras”, mas sim, por meio de uma função contínua;
- f) Único agente ou multiagente: no sistema de um único agente há apenas um agente interagindo com o ambiente. Em um ambiente multiagente, dois ou mais agentes interagem com o ambiente, além de interagirem entre si. A interação entre agentes depende do tipo de estrutura organizacional e do esquema de coordenação do ambiente, assuntos que são abordados nas próximas seções.

5.2 ARQUITETURA INTERNA DE AGENTES INTELIGENTES

A arquitetura interna de um agente determina como são implementados os conceitos abstratos que representam a capacidade de tomada de decisão, de avaliar as condições, de executar planos, de reagir à estímulos, de interpretar informações, de se comunicar, entre outras atribuições de um agente inteligente. Existem quatro tipos de arquiteturas internas de agentes (WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, 1995):

- a) Agentes baseados em lógica: arquitetura na qual o mecanismo de tomada de decisão de um agente é realizado por meio de deduções lógicas;
- b) Agentes reativos: arquitetura na qual o mecanismo de tomada de decisão é implementado na forma de mapeamento direto de situações para ações;
- c) Agentes *Belief-Desire-Intention* (BDI): arquitetura na qual o mecanismo de tomada de decisão de um agente depende do gerenciamento das estruturas de dados que representam as crenças, desejos e intenções do agente;
- d) Agentes com arquitetura em camadas: arquitetura na qual o mecanismo de tomada de decisão é implementado na forma de camadas formadas por softwares, que são designadas a lidar com interpretações das condições de ambiente em diferentes níveis de abstração.

Dentre estes quatro tipos de arquiteturas internas que representam o funcionamento do raciocínio prático de agentes, a mais conhecida e mais bem estudada é a arquitetura BDI (GEORGEFF, M. *et al.*, 1998), devido a alguns de seus aspectos

particulares. Pela sua notoriedade e reconhecimento acadêmico, a arquitetura BDI foi a escolhida para o desenvolvimento deste trabalho. Sendo assim, uma apresentação mais detalhada da arquitetura BDI é apresentada na Seção 5.2.1.

5.2.1 Arquitetura BDI

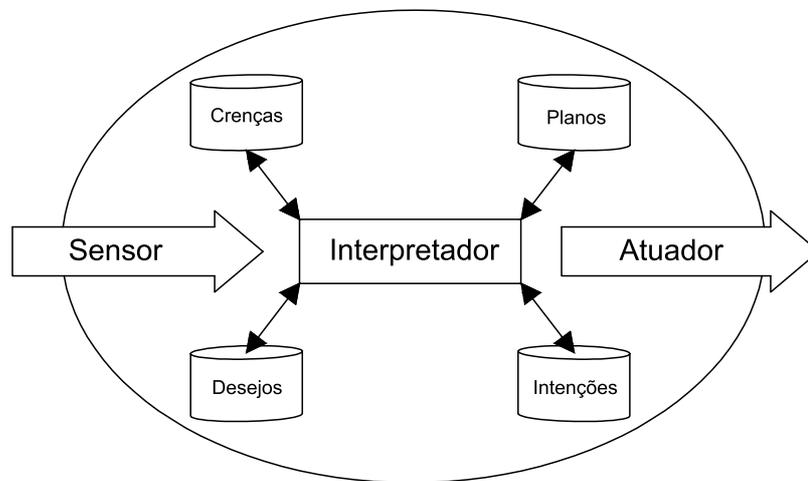
O funcionamento deste tipo de arquitetura de agentes possui grande semelhança com o funcionamento do raciocínio prático humano. Isto se deve ao fato de que a arquitetura BDI foi desenvolvida com base nos estudos de teoria filosófica do raciocínio humano propostas pelo filósofo Michael Bratman (BRATMAN, Michael, 1987). O modelo proposto por Bratman sugere que a base do comportamento do raciocínio prático humano é composta por três tipos de concepções mentais: crenças, desejos e intenções. A partir desta base de comportamento, a teoria de Bratman especifica duas etapas que constituem o processo de tomada de decisões. A primeira, chamada de etapa deliberativa, é responsável pela definição dos estados aos quais se pretende alcançar, ou seja, representa a formação de intenções. A segunda, chamada de etapa de raciocínio de meios, é responsável pela definição de planos para concretizar estas intenções. Sendo assim, Bratman define o mecanismo do raciocínio BDI como sendo uma avaliação do conflito entre considerações e opções competitivas, onde as considerações relevantes são feitas de acordo com o que o agente deseja (intenções) e de acordo com o que o agente acredita (crenças) (BRATMAN, M.E., 1990).

Para que seja viável a aplicação do modelo BDI aos sistemas computacionais, é necessário definir claramente os conceitos de crenças, desejos e intenções, no âmbito de Sistemas Multiagentes, facilitando o emprego de suas analogias computacionais como sendo “estados mentais” (WOOLDRIDGE, Michael; CIANCARINI, 2000):

- a) Crenças: são informações que o agente possui a respeito de quaisquer aspectos internos ou externos a ele mesmo;
- b) Desejos: são todos os possíveis estados de satisfação que um agente possa vir a desejar alcançar;
- c) Intenções: são os estados de satisfação que o agente decide tentar alcançar.

Uma das primeiras arquiteturas de agente a utilizar os conceitos de crenças, desejos e intenções foi proposto em (GEORGEFF, M. P.; LANSKY, 1987). O trabalho, desenvolvido no Instituto de Pesquisa de Stanford, propõe um mecanismo de funcionamento chamado de *Procedural Reasoning System* (PRS), que visa implementar computacionalmente a dinâmica cognitiva do modelo BDI proposto por Michael Bratman. Na Figura 11 é mostrado a estrutura do funcionamento do mecanismo PRS.

De maneira geral, o funcionamento de um agente baseado em uma arquitetura PRS pode ser explicado com base nos elementos apresentados pela Figura 11. Inicialmente, um agente baseado em uma estrutura PRS possui um conjunto de planos

Figura 11 – *Procedural Reasoning System*.

Fonte – R. H. Bordini *et al.* (2008), editado pelo autor.

e crenças manualmente programados pelo seu desenvolvedor. O processo cognitivo pode ser iniciado então por meio da adição direta de uma intenção à pilha de intenções, ou por meio da adição indireta, caso em que a intenção é criada a partir de um evento proveniente da percepção de interações com outros agentes ou ambiente. Esta pilha de intenções representa todas as intenções pendentes do agente. Uma vez que o agente possui uma intenção, seu interpretador busca um plano na base de planos que viabilize a tentativa de satisfazer esta intenção com base nas informações de sua base de crenças. O processo de deliberação entre execução de planos existentes pode ser implementado levando-se em consideração o encadeamento de planos visando cumprir um objetivo ou até mesmo pela atribuição de valores numéricos referentes à importância dos planos disponíveis. A execução de um plano, por sua vez, poderá gerar uma nova intenção, um novo plano ou uma ação. No caso de uma nova intenção, esta é adicionada à pilha de intenções como consequência direta da execução de um plano. No caso de uma ação, uma interação com elementos externos é realizada, representada pelo componente “atuador” da Figura 11. A execução de uma ação, por sua vez, pode gerar novos eventos, e conseqüentemente, o surgimento de novas intenções. A adição de novas intenções à pilha de intenções faz com que um ciclo composto por etapas cognitivas seja estabelecido, constituindo assim o mecanismo de funcionamento do PRS.

5.3 COMUNICAÇÃO ENTRE AGENTES

Os aspectos discutidos até aqui sobre sistemas multiagentes tornam evidente que a comunicação é uma componente chave para o funcionamento adequado deste

tipo de sistema. Agentes inteligentes se comunicam por meio de linguagens de comunicação específicas, baseadas na Teoria dos Atos de Fala (WOOLDRIDGE, M., 2009). Esta teoria classifica a comunicação humana como ações do tipo: sugestão, pedido, resposta, recusa, comando, entre outras, denominadas atos de fala.

Os atos de fala asseguram clareza no intuito da mensagem enviada pelo remetente, evitando gerar dúvidas na interpretação do conteúdo pelo destinatário, além de simplificarem o projeto de software dos agentes. É por meio destes atos que as linguagens utilizadas para estabelecer diálogo entre agentes separam as semânticas do protocolo de comunicação das semânticas do conteúdo da mensagem (WEISS, 1999).

5.3.1 Linguagens de comunicação

Dentre as linguagens existentes para comunicação entre agentes, pode-se citar três: *Knowledge Interchange Format* (KIF), *Knowledge Query and Manipulation Language* (KQML) e *Foundation for Intelligent Physical Agents - Agent Communication Language* (FIPA-ACL), das quais KQML e FIPA-ACL apresentam grande semelhanças em suas estruturas, sendo esta última o padrão atual dentre as linguagens citadas, e, portanto, será apresentada com maiores detalhes nesta seção.

A linguagem FIPA-ACL foi desenvolvida pela *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA), uma sociedade organizadora de padrões que promove a tecnologia baseada em agentes e a interoperabilidade das suas normas com outras tecnologias. Como mencionado anteriormente, é uma linguagem que se baseia no uso de atos de fala. Desta forma, não existe uma linguagem obrigatória para o conteúdo da mensagem, porém, esta deve possuir uma classificação dentre os atos comunicativos disponibilizados pela linguagem FIPA-ACL (WOOLDRIDGE, M., 2009), apresentados no Quadro 3. O exemplo exposto em (BELLIFEMINE, Fabio *et al.*, 2007), apresentado a seguir, mostra a estrutura básica de uma mensagem FIPA-ACL.

(request

:sender (agent-identifier :name alice@mydomain.com)

:receiver (agent-identifier :name bob@yourdomain.com)

:ontology travel-assistant

:language FIPA-SL

:protocol fipa-request

:content

“ “ ((action

(agent-identifier :name bob@yourdomain.com)

(book-hotel :arrival 15/10/2006

:departure 05/07/2002 ?)

)) " "

A palavra “*request*” presente na mensagem do exemplo anterior faz referência ao ato comunicativo da mensagem, que é um parâmetro obrigatório em sua composição. Todos os outros parâmetros de uma mensagem FIPA-ACL são optativos, embora se espere que as mensagens contenham também destinatário, remetente e conteúdo (BELLIFEMINE, Fabio *et al.*, 2007). Todos os possíveis parâmetros que uma mensagem pode conter estão presentes no Quadro 4.

Quadro 3 – Atos comunicativos FIPA.

Ato comunicativo FIPA	Descrição
<i>Accept Proposal</i>	Aceitar uma proposta para realizar uma ação.
<i>Agree</i>	Concordar em realizar uma ação, talvez no futuro.
<i>Cancel</i>	Um agente avisa ao outro que não deseja mais que este realize uma ação.
<i>Call for Proposal</i>	Realização de uma chamada para propostas de alguma ação.
<i>Confirm</i>	Remetente avisa ao destinatário que uma afirmação é verdadeira, quando o destinatário possui dúvidas disso.
<i>Desconfirm</i>	Remetente avisa ao destinatário que uma afirmação é falsa, quando o destinatário acredita o contrário.
<i>Failure</i>	Informar ao outro agente que uma ação foi realizada, mas que houve falha em sua execução.
<i>Inform</i>	Remetente avisa ao destinatário que uma proposição realizada é verdadeira.
<i>Inform If</i>	Uma ação utilizada pelo agente para informar o destinatário se uma proposta é verdadeira ou não.
<i>Inform Ref</i>	Uma ação que permite que o remetente informe o destinatário de uma crença que corresponda a uma descrição específica.
<i>Not Understood</i>	O remetente informa ao destinatário que não entendeu a mensagem enviada, ou ação a ser executada pelo destinatário.
<i>Propagate</i>	O remetente deseja que o agente interprete a mensagem, identifique os agentes pelas descrições dadas e propague a mensagem recebida para eles.
Continua...	

Quadro 3 – Atos comunicativos FIPA (continuação).

Ato comunicativo FIPA	Descrição
<i>Propose</i>	Submeter uma proposta de alguma ação a ser executada segundo algumas condições.
<i>Proxy</i>	Remetente quer que o destinatário selecione determinados agentes de acordo com a descrição dada e mande para eles uma determinada mensagem.
<i>Query If</i>	Perguntar para outro agente se uma afirmação é verdadeira ou falsa.
<i>Query Ref</i>	Pedir para outro agente um objeto especificado por uma expressão referencial.
<i>Refuse</i>	Recusar fazer uma determinada ação solicitada com explicação do porquê da recusa.
<i>Reject Proposal</i>	Rejeitar uma proposta de ação durante uma negociação.
<i>Request</i>	Remetente solicita ao destinatário uma determinada ação.
<i>Request When</i>	O remetente deseja que o destinatário execute uma ação quando uma afirmação for verdadeira.
<i>Request Whenever</i>	O remetente deseja que o destinatário execute uma ação assim que uma afirmação for verdadeira e a repita cada vez que ela retorne a ser verdadeira.
<i>Subscribe</i>	Ato de solicitar uma intenção persistente para notificar o remetente do valor de uma referência, e sempre avisar quando o objeto identificado pela referência mudar.

Fonte – Fabio Bellifemine *et al.* (2007), editado pelo autor.

Além dos atos comunicativos e mensagens com estruturas padronizadas, a FIPA definiu também protocolos de comunicação para viabilizar a troca de mensagens entre os agentes. Na Figura 12 é ilustrado um exemplo de um protocolo de comunicação, chamado *FIPA-Request-Protocol*. Este protocolo permite que um agente peça para outro realizar uma determinada ação. O agente que recebeu o pedido pode aceitá-lo ou recusá-lo. Existe também a possibilidade de cancelamento do pedido efetuado por este agente por meio do protocolo de cancelamento *FIPA-Cancel-Meta-Protocol*.

Na Figura 12, um agente é chamado de Iniciador, e o outro de Participante. O Iniciador, para pedir a execução de uma determinada ação, envia uma mensagem do tipo *request* para o Participante, que possui opções de resposta do tipo *agree* ou *refuse*, aceitando ou não o pedido do Iniciador. Caso seja aceito o pedido, o Participante deve

Quadro 4 – Parâmetros da mensagem ACL.

Parâmetro	Descrição
<i>Performative</i>	Aceitar uma proposta para realizar uma ação.
<i>Sender</i>	Identidade do remetente da mensagem.
<i>Receiver</i>	Identidade do destinatário da mensagem.
<i>Reply-to</i>	A quais agentes serão direcionadas as mensagens subsequentes dentro de uma conversaçãõ.
<i>Content</i>	Conteúdo da mensagem.
<i>Language</i>	Idioma do conteúdo da mensagem.
<i>Encoding</i>	Codificação do conteúdo da mensagem.
<i>Ontology</i>	Referência à uma ontologia, de forma que os símbolos usados na mensagem tenham sentido.
<i>Protocol</i>	Protocolo de interação usado para estruturar uma conversaçãõ.
<i>Conversation-id</i>	Identificador único de uma conversaçãõ.
<i>Reply-with</i>	Uma expressão a ser usada por um agente ao responder uma mensagem.
<i>In-reply-to</i>	Referencia-se à uma ação recente para a qual uma mensagem foi respondida.

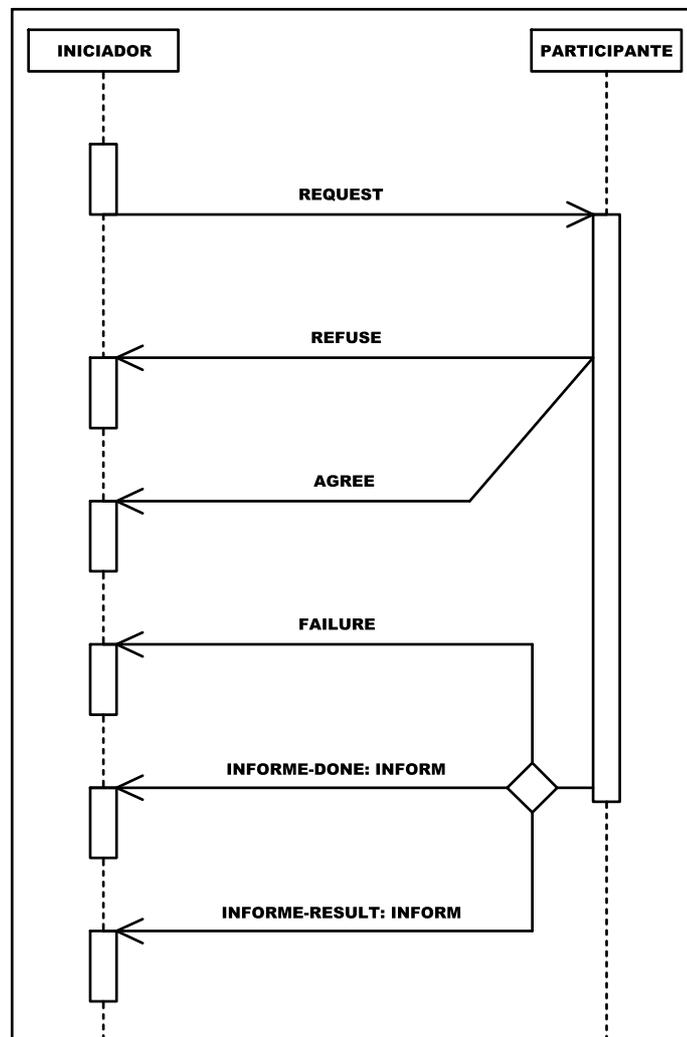
Fonte – Fabio Bellifemine *et al.* (2007), editado pelo autor.

informar também se a ação foi executada por meio do envio de mensagens dos tipos: *failure*, que indica que houve uma falha ao tentar executar a ação, *inform-done*, que indica que a ação foi executada, e *inform-result*, que, além de indicar que a ação foi executada, informa ao iniciador os resultados desta execução. Em qualquer ponto do protocolo de comunicação é possível que o destinatário de uma mensagem possa informar o remetente de uma possível não compreensão da mensagem recebida, retornando uma mensagem do tipo *not-understood* (BELLIFEMINE, Fabio *et al.*, 2007).

5.4 COORDENAÇÃO DE SISTEMAS MULTIAGENTES

Como em um sistema multiagente existem diversos agentes inteligentes interagindo com o mesmo ambiente, as tomadas de decisões destes agentes ganham complexidade com relação às que são realizadas em um ambiente de um único agente. Os agentes de um sistema multiagente têm que lidar com as condições de ambiente e também com as intenções de outros agentes, fazendo com que apareça a necessidade de coordenação entre eles. Esta coordenação pode ser estabelecida através da comunicação entre os agentes. O diálogo entre dois agentes pode ser do tipo cooperativo ou competitivo, dependendo dos objetivos de cada um, e é extremamente importante para a fundamentação de planos de coordenação de um sistema multiagente. A Figura 13 mostra a taxonomia dos modos de obtenção da coordenação de atividades entre agentes.

Figura 12 – Protocolo de comunicação *FIPA-Request-Protocol*.

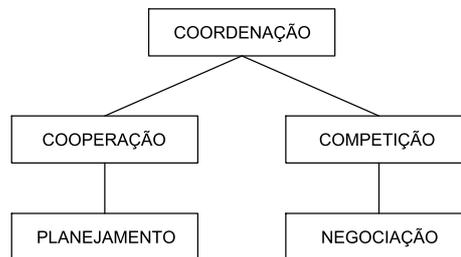


Fonte – Fabio Bellifemine *et al.* (2007), editado pelo autor.

5.4.1 Cooperação entre agentes

A cooperação entre agentes pode ser obtida por meio de criação de convenções ou por intermédio de comunicação entre eles. À guisa de exemplo, pode-se citar uma situação apresentada em (RUSSELL; NORVIG, 2009), em que dois agentes de um sistema representam dois jogadores de tênis de uma mesma equipe. No momento de saque da equipe, cada agente enxerga dois planos: jogador A na rede e jogador B sacando, ou jogador B na rede e jogador A sacando. Se cada um dos agentes escolher o plano individualmente, pode acontecer de ambos tentarem sacar ou ambos tentarem cobrir a rede, o que demonstra que existe falta de coordenação entre eles. Porém, se houver uma convenção estipulada de que quando um agente estiver sacando o outro deve estar na rede e vice-versa, este risco de colisão entre eles é eliminado, resolvendo-

Figura 13 – Taxonomia dos modos de obtenção da coordenação.



Fonte – Weiss (1999), editado pelo autor.

se então o problema de coordenação do exemplo em questão. Este problema também poderia ser solucionado por meio da comunicação entre os agentes para definir suas posições e estipular uma relação cooperativa entre si em busca do objetivo global.

5.4.2 Competição entre agentes

A competição entre agentes ocorre quando estes agem de maneira a buscar objetivos próprios, que resultem em ações conflitantes entre eles. Ao contrário do caso anterior, onde a interação era cooperativa, a competição entre agentes não envolve um planejamento por meio de complementação de tarefas, mas sim através de negociações para conclusão de seus próprios objetivos. Estas negociações ocorrem por meio da comunicação entre os agentes.

Agentes que fazem parte de ambientes competitivos podem, ou não, possuir objetivos globais, porém também estabelecem a coordenação como sendo uma propriedade do ambiente em que estão situados, pois de uma forma ou de outra, realizam seus planos com base no planejamento, ou, estimativa de planejamento de ações dos agentes que estão envolvidos na negociação.

5.5 ESTRUTURAS ORGANIZACIONAIS

A estrutura organizacional de um sistema multiagente é formada por um conjunto de funções, capacidade de relacionamento e hierarquia entre agentes. Esta organização é responsável por determinar os comportamentos do sistema multiagente, além de permitir que grupos de agentes simples exibam comportamentos complexos e ajudem agentes mais sofisticados a reduzir a dificuldade de suas tarefas (HORLING; LESSER, 2004).

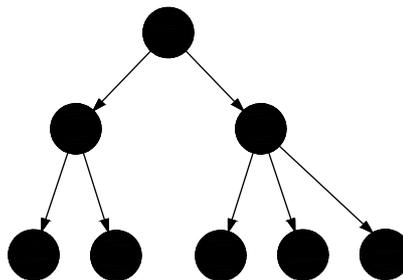
Nesta seção, são apresentados alguns dos inúmeros tipos de estruturas organizacionais possíveis, presentes em esquemas de coordenação entre agentes inteligentes (HORLING; LESSER, 2004).

5.5.1 Hierarquia

Esta estrutura possui uma disposição conceitualmente organizada como tipo “árvore”, como mostra a Figura 14. Agentes das camadas mais baixas possuem menos autoridade no sistema e informações restritas à sua localidade, enquanto que agentes de camadas mais elevadas têm uma visão mais abrangente do sistema e mais autoridade entre os demais agentes. Esta ampla visão dos agentes de camadas mais altas ocorre devido ao fluxo de envio de informações dos agentes das camadas mais baixas para os agentes das camadas superiores. Além do mais, agentes hierarquicamente superiores podem enviar ordens e tarefas para agentes hierarquicamente inferiores, com o propósito de alcançar os objetivos globais do SMA.

A estrutura em questão permite a decomposição de um problema complexo em vários problemas simples, tornando-o mais fácil de ser resolvido. Porém, este sistema está sujeito a falhas graves caso algum dos agentes de camadas mais altas pare de operar por conta de algum defeito.

Figura 14 – Estrutura hierárquica.



Fonte – Horling e Lesser (2004), editado pelo autor.

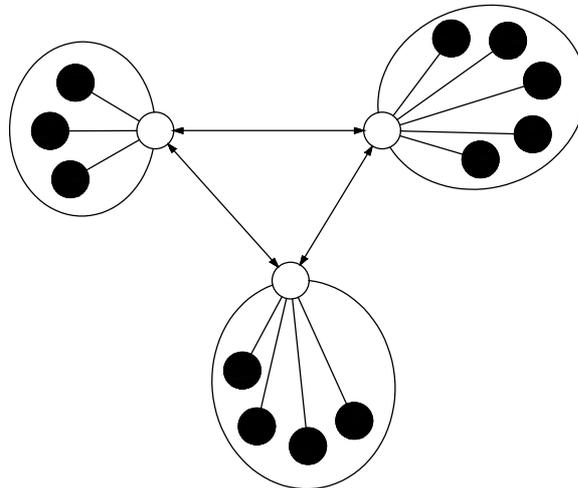
5.5.2 Federações

Uma federação é composta por um grupo de agentes que possui um único agente com mais autoridade que os demais, sendo este, o representante do grupo. Cada representante de uma federação pode se comunicar tanto com os agentes de seu próprio grupo, quanto com outros agentes representantes de outras federações. Os demais agentes que possuem menos autoridade comunicam-se somente com seus respectivos representantes de grupo. Na Figura 15 é ilustrado a estrutura organizacional baseada em federações.

Este tipo de organização permite que agentes informem ao seu representante suas necessidades e habilidades. O representante então pode buscar ou disponibilizar soluções em outras federações por meio de troca de mensagens com outros representantes, fazendo com que as interações entre agentes no ambiente sejam reduzidas

consideravelmente. Desta forma, esta estrutura é capaz de aumentar a velocidade e a eficiência do processo de busca pela solução do problema global.

Figura 15 – Estrutura por federações.



Fonte – Horling e Lesser (2004), editado pelo autor.

5.5.3 Sociedade

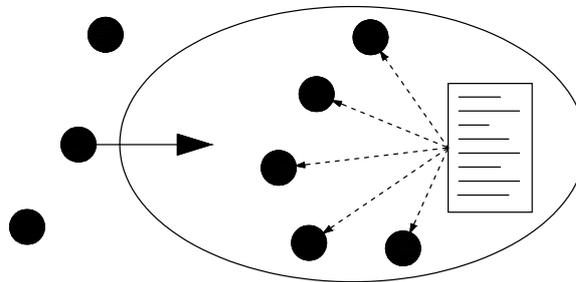
Uma sociedade é basicamente um ambiente multiagente onde existem normas e regras a serem seguidas pelos agentes que optam por fazer parte dela. Uma sociedade é um ambiente aberto, portanto, diferentes agentes, com diferentes objetivos, capacidades e comportamentos, podem entrar e sair quando quiserem, contanto que respeitem as regras estipuladas pela sociedade, como ilustrado na Figura 16. Como um exemplo de ambiente de sociedade, pode-se citar o mercado da bolsa de valores, onde existem compradores e vendedores interagindo entre si em busca de seus objetivos próprios, respeitando as regras do mercado de ações.

Estruturas em forma de sociedades podem ser utilizadas para melhorar a eficiência de resolução de problemas, uma vez que as regras impostas pela sociedade proporcionam algum nível de coordenação aos agentes.

5.5.4 Congregações

Congregações de agentes são grupos formados por agentes inteligentes dispostos em uma organização plana, a fim de obter benefícios com interesses próprios durante longos períodos de tempo. A Figura 17 ilustra este tipo de estrutura organizacional. Agentes que compõem uma congregação possuem habilidades, capacidades e objetivos, similares ou complementares. Uma vez que esta organização visa simplificar

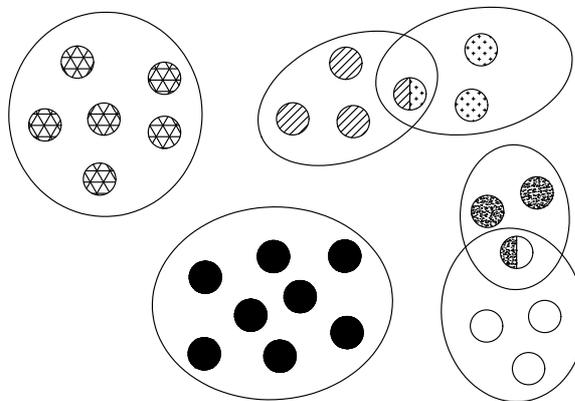
Figura 16 – Estrutura por sociedade.



Fonte – Horling e Lesser (2004), editado pelo autor.

a complexidade de busca de necessidades similares ou aptidões complementares, a comunicação entre agentes limita-se dentro de cada congregação, embora os grupos não estejam necessariamente separados (agentes podem fazer parte de duas congregações ao mesmo tempo). Esta característica diminui o número de interações no ambiente, fazendo com que esta estrutura proporcione rapidez e eficácia na busca da solução do problema.

Figura 17 – Estrutura por congregações.



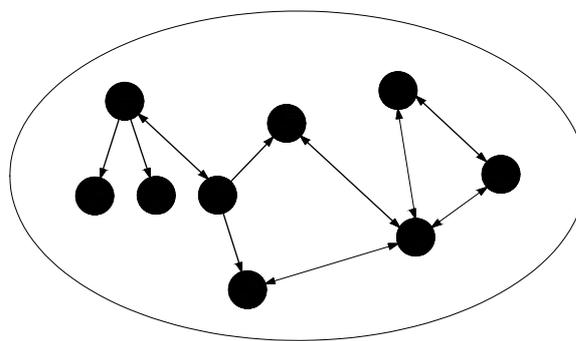
Fonte – Horling e Lesser (2004), editado pelo autor.

5.5.5 Times

A estrutura organizacional definida por time, é representada por um conjunto de agentes cooperativos, trabalhando em busca de um objetivo comum. Neste tipo de estrutura, agentes assumem diferentes papéis e subtarefas, desempenhando suas respectivas funções em prol do cumprimento do objetivo de seu time. A Figura 18 ilustra um exemplo de estrutura organizacional por time. Uma das principais vantagens

do uso deste tipo de estrutura organizacional é a capacidade de decompor problemas complexos em diversos problemas mais simples, tornando possível que agentes organizados em times solucionem cooperativamente o problema complexo que seria impossível de ser solucionado por um só agente. A eficiência deste tipo de organização é determinada pelos papéis designados e a decomposição do objetivo global, sendo fundamental estarem bem estruturados para garantir eficácia na comunicação e interação entre os agentes.

Figura 18 – Estrutura por time.



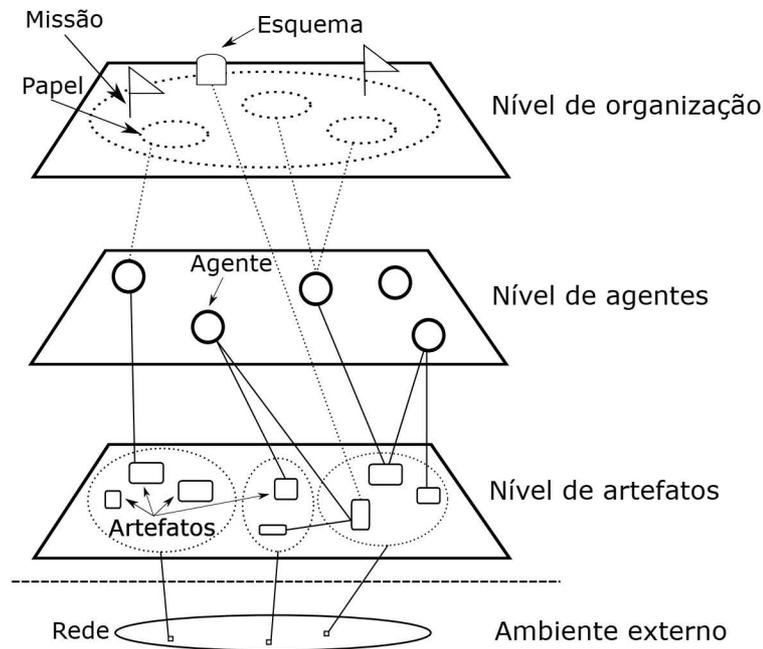
Fonte – Horling e Lesser (2004), editado pelo autor.

5.6 DESENVOLVIMENTO DE SMA

Nesta seção são apresentados alguns recursos computacionais concebidos com a finalidade de desenvolver sistemas multiagentes. A fim de reunir os conceitos teóricos discutidos neste capítulo e esclarecer a maneira como estão relacionados entre si, uma classificação destes conceitos é apresentada por meio de um diagrama global de um sistema multiagente, na Figura 19. Nesta figura é possível observar a interação entre as três dimensões de um sistema multiagente: a organização, os agentes e os artefatos.

Neste trabalho, a ferramenta utilizada para o desenvolvimento do SMA é a plataforma JaCaMo, um *framework* que comporta as três dimensões de um sistema multiagente (BOISSIER, O. *et al.*, 2020). A plataforma JaCaMo é composta pela junção de outras três ferramentas computacionais que são utilizadas para o desenvolvimento de cada uma das dimensões de um sistema multiagente mencionadas anteriormente: o MOISE+, o JASON e o CArtaGO, respectivamente. Tais ferramentas são apresentadas em detalhes nas seguintes seções.

Figura 19 – Dimensões de um SMA.



Fonte – Olivier Boissier *et al.* (2013), editado pelo autor.

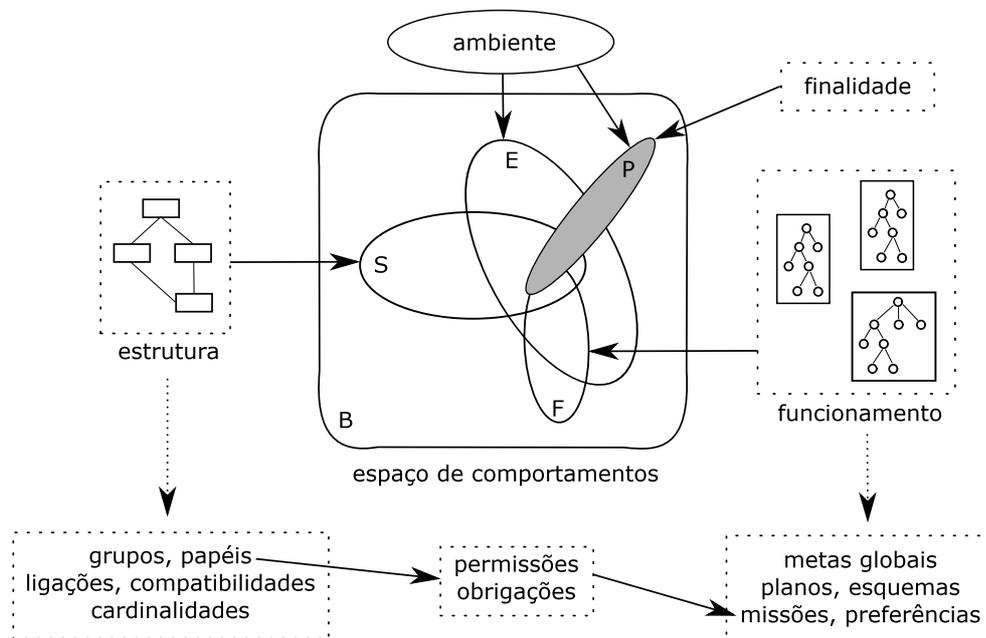
5.6.1 O modelo organizacional MOISE+

Lemaitre e Excelente (1998) classificam a organização de um sistema multiagente em duas categorias: o tipo centrado nos agentes e o tipo centrado na organização. A organização de um sistema multiagente que está implícita em determinado sistema, condição em que não pode ser identificada por um observador externo, mas somente inferida, é classificada na primeira categoria. Por outro lado, um SMA que possui um esquema de organização explícita, sendo possível que qualquer agente, interno ou externo ao SMA, a identifique, possui um esquema de organização classificado na segunda categoria. A categoria que oferece um modelo de organização explícita possui a vantagem de poder ser lida por outros ou pelos próprios agentes do sistema, fator que contribui para suas tomadas de decisão em busca de seus objetivos específicos e globais. O Moise+ (*Model of Organisation for Multi-agent Systems*) é uma ferramenta que permite implementar um modelo de organização explícita a um sistema multiagente (HUBNER, Jomi F *et al.*, 2007).

O Moise+ proporciona um modelo de organização aos sistemas multiagente que pode ser dividido em três dimensões: a funcional, a estrutural e a normativa. O aspecto funcional está relacionado à política de atribuição de tarefas aos agentes, coordenação da execução de planos e ao cumprimento de missões. O aspecto estrutural está relacionado aos papéis de cada agente, à relação entre estes papéis e aos grupos de papéis

do SMA. E, finalmente, o aspecto normativo está ligado à obrigação ou permissão para execução de tarefas e planos (GROBLER, 2007). Na Figura 20 é ilustrado melhor a participação da organização proporcionada pelo modelo Moise+ sobre os agentes de um SMA. O quadrado denominado B representa o comportamento de um agente. Os círculos internos representam a limitação da dimensão funcional (F) e da dimensão estrutural (S), bem como as limitações impostas naturalmente pelo ambiente (E). A região P, por sua vez, representa o resultado do comportamento do agente frente às restrições mencionadas, sugerindo melhor desempenho em prol de sua finalidade. Os aspectos normativos aparecem na Figura 20, ligados tanto aos aspectos funcionais quanto aos estruturais, completando assim o modelo Moise+.

Figura 20 – Dimensões do modelo organizacional Moise+.



Fonte – Jomi Fred Hubner e Sichman (2003), editado pelo autor.

Além das características mencionadas anteriormente, o modelo organizacional Moise+ independe da estrutura de funcionamento interna dos agentes do SMA, tornando-se uma ferramenta extremamente versátil. Desta forma, o Moise+ permite aplicar restrições comportamentais a diferentes tipos de agentes, limitando algumas de suas ações por meios dos três aspectos mencionados anteriormente e, consequentemente, proporcionando maior efetividade na busca pelo objetivo global do SMA.

5.6.2 O interpretador JASON

Uma das ferramentas atualmente existentes para o desenvolvimento de agentes é o JASON, um interpretador baseado em JAVA que foi desenvolvido para interpretar

a linguagem orientada à agentes *AgentSpeak* (RAO, 1996), uma linguagem baseada na arquitetura BDI, já discutida na Seção 5.2.1. Sendo assim, a linguagem de programação JASON também possui seu funcionamento baseado na arquitetura BDI. Com a mesma finalidade do mecanismo de funcionamento que implementa a dinâmica cognitiva do modelo BDI proposto por Michael Bratman, o interpretador JASON, de maneira quase análoga, possui um mecanismo chamado de *Reasoning Cycle*, por meio do qual seus agentes desempenham a dinâmica do modelo BDI. O *Reasoning Cycle* é composto por 10 etapas de funcionamento, que estão ilustradas no diagrama da Figura 21 e descritas a seguir (BORDINI, R. H. *et al.*, 2008).

1. Percepção do ambiente;
2. Atualização da base de crenças (*Belief Update Function* (BUF));
3. Recepção de comunicação de outros agentes;
4. Seleção de mensagens “socialmente aceitáveis” (*SocAcc - Socially Acceptable*);
5. Seleção de um evento (S_E - *Event Selection Function*);
6. Seleção de todos os planos relevantes;
7. Determinação dos planos aplicáveis;
8. Seleção de um plano aplicável (S_O - *Option Selection Function*);
9. Seleção de uma intenção para a próxima execução (S_I - *Intention Selection Function*);
10. Executar uma etapa de uma intenção.

Na Figura 21, os retângulos representam os principais elementos que determinam a base de crenças, conjunto de eventos, biblioteca de planos e conjunto de intenções. As caixas de bordas arredondadas e os retângulos representam funções customizáveis enquanto que os círculos representam funções vitais no funcionamento do *Reasoning Cycle* e, portanto, não podem ser alterados (BORDINI, R. H. *et al.*, 2008).

Dos blocos não numerados, os retângulos nomeados de “Intenções” e “Intenções Suspensas” representam a fila de intenções que um agente tem o intento de realizar, o losango nomeado de S_M (*Message Selection Function*) seleciona a mensagem a ser processada no ciclo corrente, e caixa de bordas arredondadas nomeada de *Belief Revision Function* (BRF) é responsável por revisar a base de crenças. Além destes elementos, existem outras duas funções de saída do agente, também representadas por caixas de bordas arredondadas, nomeadas “Agir” e “*sendMsg*”, responsáveis pela execução das ações do agente e pelo envio de mensagens, respectivamente.

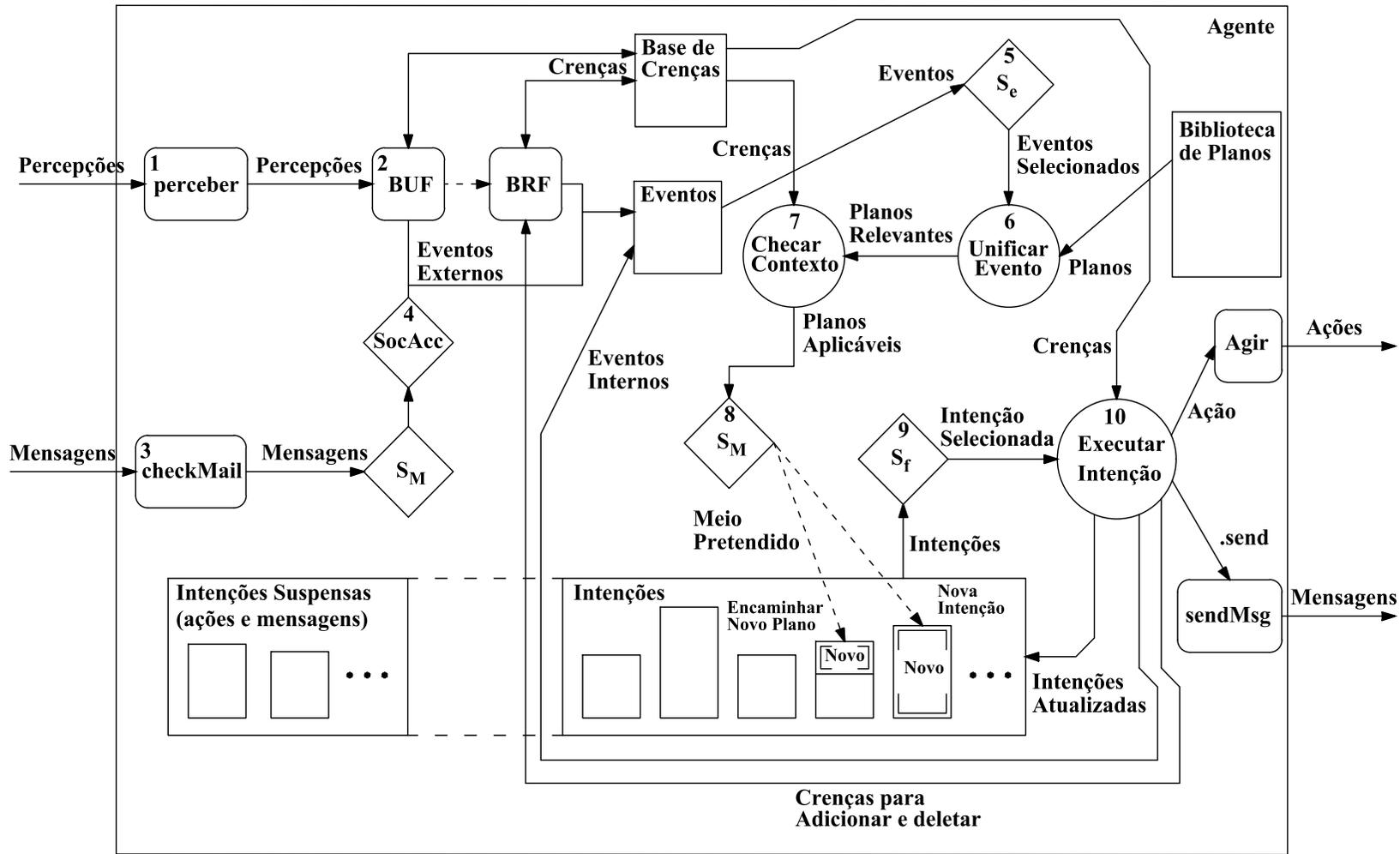


Figura 21 – JASON Reasoning Cycle.

Fonte – R. H. Bordini et al. (2008), editado pelo autor.

Analisando-se as etapas de funcionamento do *Reasoning Cycle*, é possível identificar a arquitetura BDI implementada em seu desenvolvimento. O funcionamento completo do interpretador JASON apresenta complexidade relativamente alta e, portanto, não é discutido na íntegra neste trabalho, uma vez que os conceitos básicos são suficientes para o entendimento do estudo em questão. É possível obter maior aprofundamento no assunto pela referência (BORDINI, R. H. *et al.*, 2008).

5.6.3 O framework CArtAgO

O *framework Common Artifact Infrastructure for Agents Open Environments* (CArtAgO) é uma ferramenta computacional baseada no meta-modelo *Agents & Artifacts* (A&A) para o desenvolvimento de ambientes em sistemas multiagente. Desta forma, o ambiente pode ser programado como instâncias computacionais chamadas de Artefatos, que são criados em uma determinada área de trabalho da rede onde o sistema multiagente foi programado (RICCI *et al.*, 2011).

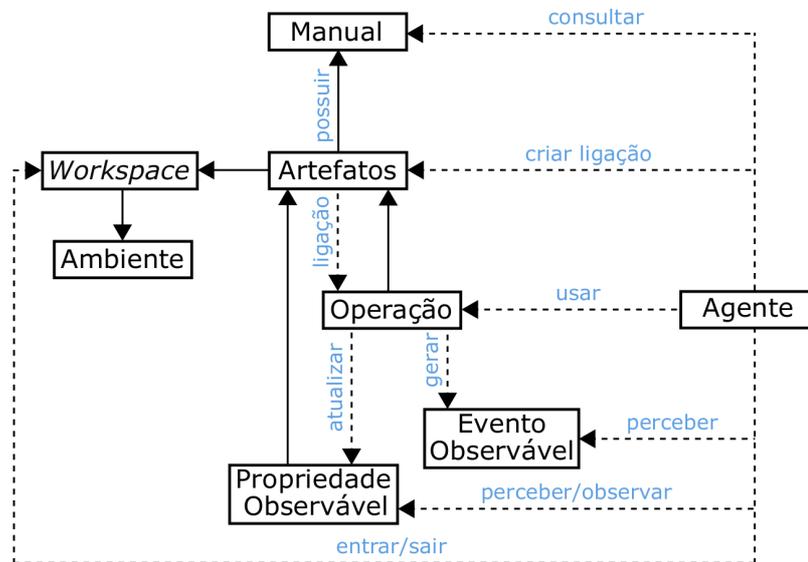
Artefatos são recursos e ferramentas as quais os agentes podem compartilhar, perceber e utilizar dinamicamente a fim de possuir um auxílio para atingir seus objetivos individuais ou coletivos (RICCI *et al.*, 2007; OMICINI *et al.*, 2008). Estas instâncias computacionais possuem propriedades destinadas a proporcionar interação com os agentes (RICCI *et al.*, 2011):

- a) Propriedades observáveis: representa estados de variáveis perceptíveis pelos agentes. Esta propriedade pode ser alterada dinamicamente em consequência de uma operação em execução pelo artefato;
- b) Operações: representa processos computacionais executados dentro dos artefatos que podem ser acionados pelos agentes ou até mesmo por outros artefatos;
- c) Sinais: artefatos podem fazer emissão de sinais perceptíveis para os agentes sem a necessidade de conter informações, tendo somente a finalidade de acusar um evento;
- d) Manual de instruções: documento virtual contendo as funcionalidades disponíveis no artefato e as instruções de como utilizá-las. Este documento tem a finalidade de tornar o artefato útil para qualquer agente, independentemente de sua estrutura interna.

Além das propriedades descritas anteriormente, os artefatos possuem ainda estados internos, não observáveis pelos agentes, que podem ser utilizados para seu próprio funcionamento. Possuem também a capacidade de conexão entre um artefato e outro, fazendo com que estes possam funcionar de maneira correlacionada ou proporcionar um funcionamento de artefatos distribuídos. Todas as possíveis interações

entre agente e artefato, conforme discutido nesta seção, estão ilustradas no diagrama da Figura 22.

Figura 22 – Possíveis interações entre agente e artefato.



Fonte – Ricci *et al.* (2011), editado pelo autor.

5.7 APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE SMA

Dentre os trabalhos encontrados na literatura que fazem utilização de SMA, apresentados no Capítulo 3, alguns autores não citam qual a ferramenta computacional utilizada para a implementação de seus agentes (TOMITA *et al.*, 1998; PARK; LIM, 2006; ZHU *et al.*, 2009; SHENG *et al.*, 2010; ABEDINI *et al.*, 2013; JIAPENG; YINGFEI, 2015; HUSSAIN *et al.*, 2016; CINTUGLU *et al.*, 2017; AGHDAM *et al.*, 2018; HABIB, Hany Fawzy; MOHAMMED, 2018; KHAZAEI; MAHMOUDI, 2019), enquanto outros fazem utilização do *middleware*¹ JADE (WAN *et al.*, 2010; NASCIMENTO; ROLIM, 2013; PINTO, 2015; ANANDA *et al.*, 2016; REIS, 2016; HABIB, H. F. *et al.*, 2017; UZAIR *et al.*, 2019). Diversas linguagens orientadas à agentes estão presentes na literatura, como por exemplo 3APL, IMPACT, JASON, JADE, JADEx, CLAIM, JACK, GOAL, BRAHMS, MINERVA, FLUX, entre outras (BELLIFEMINE, F. *et al.*, 2003; BORDINI, R. H. *et al.*, 2006; SHAOPENG; JUN, 2011). Dentre estas linguagens, constatou-se somente a presença da linguagem JADE nas aplicações de SMA à proteção de microrredes, conforme pôde ser verificado na revisão bibliográfica apresentada. A alta interoperabilidade garantida pela rigorosa adesão aos padrões FIPA e a grande disponibilidade de

¹ Software que fornece serviços para aplicações além daqueles disponíveis pelo sistema operacional.

documentação que auxiliam na sua implementação, garantem ao JADE ampla utilização para o desenvolvimento de sistemas multiagentes (BORDINI, R. H. *et al.*, 2006). O *framework* JADE proporciona diversos recursos baseados nos padrões estipulados pela FIPA, disponibilizando biblioteca de comportamentos para desenvolvimento de agentes, serviços de plataforma, suporte para comunicação, entre outras ferramentas de desenvolvimento, como *debugger* e recursos gráficos (BELLIFEMINE, F. *et al.*, 2003; SEGHROUCHNI *et al.*, 2009). Apesar destes recursos, o JADE não possui o funcionamento de seus agentes baseados na arquitetura BDI (*Beliefs, Desires and Intentions*) e, portanto, oferece agentes com capacidade de raciocínio menos semelhante ao da mente humana, deixando abertura para discussões a respeito do grau de inteligência que pode ser implementado em seus agentes. Além disto, o JADE é baseado em programação sequencial e não oferece um meio específico para criação de ambientes. Levando-se em consideração a complexidade da aplicação de SMA na proteção de microrredes, tornam-se evidentes as significantes vantagens do uso do JASON para o desenvolvimento de um sistema de proteção inteligente para microrredes de baixa tensão, uma vez que este permite a modelagem de ambientes, apresenta programação baseada em unificação e predicados, e possui seu funcionamento baseado na arquitetura BDI.

O desenvolvimento de agentes BDI, utilizando-se a plataforma JASON, proporciona as vantagens mencionadas na Seção 5.2.1 à estratégia de proteção proposta que, como resultado, mostra-se um sistema de proteção de microrrede de baixa tensão robusto, versátil e com alta confiabilidade de operação. A aplicação de agentes baseados na arquitetura BDI para a finalidade de proteção de microrredes é um estudo aparentemente inédito, e deve proporcionar maior acurácia na detecção e localização de faltas, bem como maior seletividade na operação do sistema de proteção de microrredes. A integração e as propriedades das ferramentas escolhidas para a realização da pesquisa tornaram possível o desenvolvimento e o estudo aprofundado de um esquema de proteção com tais características, fator que é comprovado pelos resultados desta tese de doutorado.

5.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características de mudança de topologia das microrredes propulsionaram o desenvolvimento de pesquisas no âmbito de um de seus maiores empecilhos, seu esquema de proteção. A necessidade de constante adaptação à novas situações, que exige análise de cenário operacional e tomada de decisões racionais, direcionou os estudos desta área para a exploração de recursos da IA, como por exemplo, os SMA. O conteúdo apresentado neste capítulo comprova que as características dos SMA permitem que estes possam ser utilizados em diversas aplicações de Sistemas Elétricos de Potência, dentre elas, a proteção de microrredes de baixa tensão com

geração distribuída predominantemente composta por fontes com conexão via interface de conversores estáticos.

6 MODELAGEM DAS MICRORREDES

Dois sistemas teste foram modelados para aplicação do sistema de proteção elaborado, ambos seguindo os padrões europeus de redes de distribuição de energia. Os sistemas teste foram desenvolvidos com a utilização do *software* MATLAB/SIMULINK, e suas características são detalhados nas seções a seguir.

6.1 MICRORREDE 1

O primeiro sistema teste, neste trabalho referido como Microrrede 1, teve sua criação inspirada em estudos de microrredes reais desenvolvidas na França. O laboratório *Grenoble Electrical Engineering Laboratoire* (G2Elab) da *Université Grenoble Alpes*, desenvolve estudos e participa de projetos de pesquisa europeus e franceses relacionados à *Smart Grids* e fontes de energia renováveis. O G2Elab situa-se no *smart building Grenoble Energie - Enseignement Recherche* (GreEn-ER), um projeto desenvolvido pela universidade em parceria com os órgãos de pesquisa franceses *Commissariat à l'Énergie Atomique* (CEA) e *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS), e com a empresa francesa de construção EIFFAGE, que consistiu na edificação deste prédio inteligente para desenvolvimento de pesquisas e estudos, tornando-se, ao mesmo tempo, sede das escolas de engenharia da universidade.

O *smart building* GreEn-ER é um protótipo construído com as mais inovadoras tecnologias referentes à eficiência energética. O consumo de energia elétrica e térmica de todo o edifício é monitorado e gerenciado eficientemente por um sistema central automatizado (DELINCHANT *et al.*, 2016), portanto existem diversos pontos de medição de parâmetros elétricos distribuídos por toda a edificação. Além do gerenciamento central de energia, o edifício conta também com um eficiente sistema de climatização *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC), estação meteorológica e diferentes recursos energéticos distribuídos, como por exemplo: módulos fotovoltaicos, geradores eólicos, baterias, veículos elétricos e co-gerador a gás.

A implementação do *smart building* GreEn-ER faz parte de um projeto de pesquisa, que visa realizar a integração de diferentes projetos inovadores e sustentáveis para formar um eco distrito inteligente na cidade de Grenoble, considerada um dos maiores centros de pesquisa em tecnologia energética do mundo. O projeto é baseado em sistemas de energia urbana, com foco de estudo na integração de geração distribuída de fontes renováveis, e com o objetivo de compreender os efeitos da implantação massiva de energias renováveis, considerando o gerenciamento de energia em escala urbana. Desta forma, foi modelada uma microrrede trifásica de baixa tensão com geração distribuída predominantemente composta por fontes de geração com interface de conexão via conversores estáticos.

As características da microrrede modelada foram baseadas no modelo científico

de referência proposto em (CIGRE, 2014). Sendo assim, o sistema teste utilizado neste trabalho foi modelado com parâmetros técnicos de redes de distribuição europeias, obtidos de (CIGRE, 2014), onde a baixa tensão é padronizada em 0,4kV e a frequência de operação em 50Hz. A Figura 23 ilustra o diagrama unifilar da Microrrede 1.

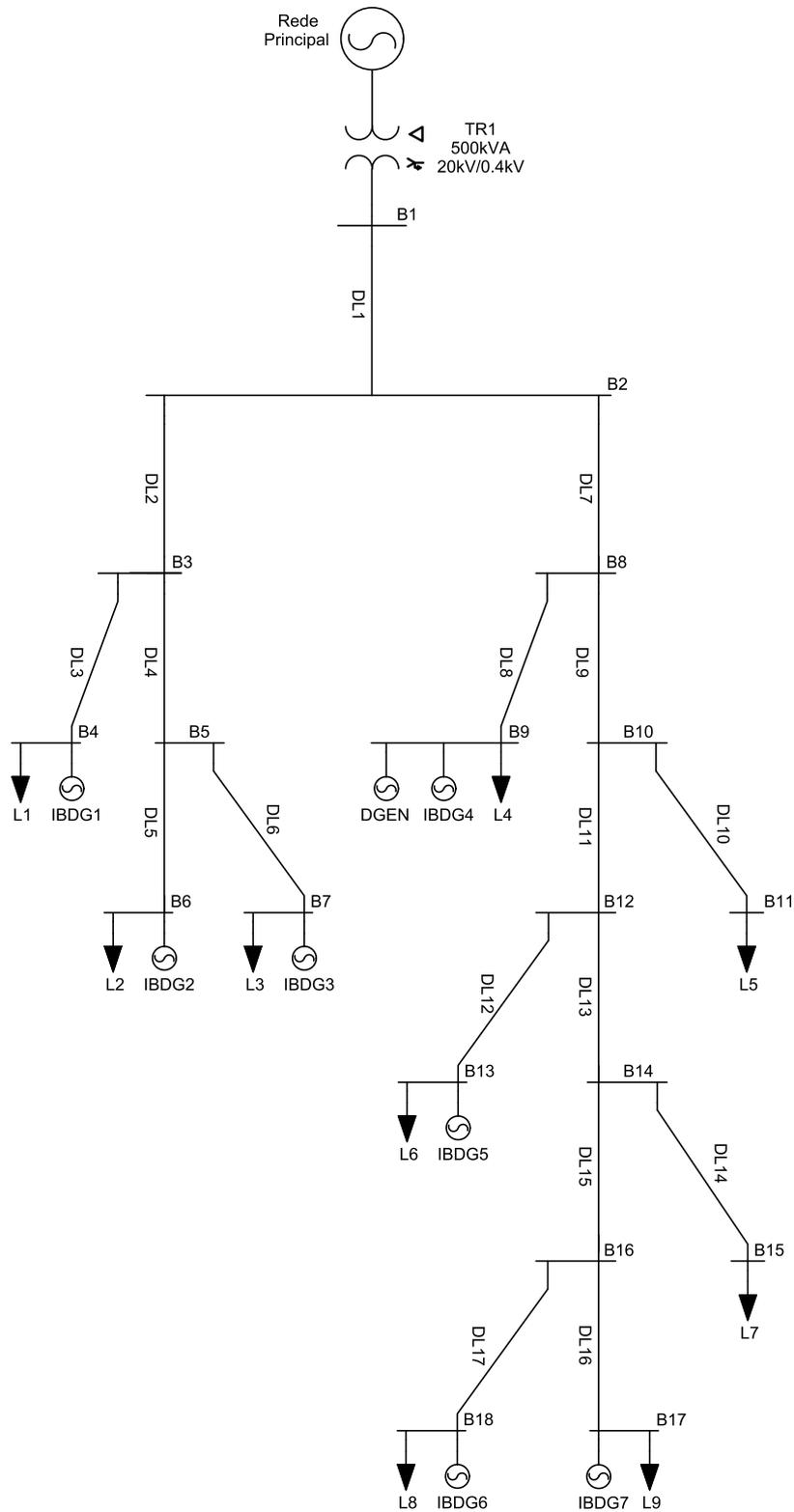
A microrrede apresentada na Figura 23 é composta por 9 cargas residenciais (L1 – L9), 7 fontes de geração com interface via conversores estáticos (IBDG1 – IBDG7) e 1 gerador à diesel (DGEN). As linhas de distribuição da microrrede foram modeladas com propriedades de cabos subterrâneos, conforme parâmetros sugeridos por (CIGRE, 2014). Todas as cargas do sistema também tiveram sua modelagem baseada neste mesmo documento científico, considerando as capacidades de consumo, fator de potência e distribuição topológica. Também baseado nos parâmetros sugeridos em (CIGRE, 2014), a rede de média tensão (rede principal) foi modelada como uma fonte de tensão e impedância equivalente.

Em contrapartida aos elementos da microrrede mencionados anteriormente, as GDs tiveram sua modelagem matemática desenvolvida baseada em outra referência. O gerador à diesel (DGEN) foi modelado como uma fonte de tensão e impedância equivalente calculada a partir de catálogo de especificações técnicas da comercializadora de geradores e motores Marelli Motori Group (FKI, 2005). Detalhes a respeito dos cálculos da modelagem e dos parâmetros utilizados estão apresentados no Apêndice A. As demais GDs, por sua vez, foram modeladas conforme os dois modelos apresentados no Capítulo 4, sendo as IBDGs 2 e 4 utilizando a estratégia de controle com quadro de referência SYRF (IBDG Modelo 2) e as IBDGs restantes utilizando o modelo simplificado (IBDG Modelo 1).

6.1.1 Topologias e restrições de operação

Para o funcionamento adequado do modelo proposto e para que o objetivo deste trabalho seja alcançado, duas topologias principais foram propostas: microrrede operando em modo conectado à rede principal e microrrede operando em modo ilhado. Visando atender a questões ecológicas e de balanço de potência, considerou-se que a fonte de geração à diesel só é ativada quando a microrrede está operando em modo ilhado. Nesta configuração, esta fonte desempenha um papel fundamental na operação da microrrede, uma vez que é responsável pelo balanço de carga e geração e, conseqüentemente, pela estabilização da tensão e da frequência de operação. A Figura 23 ilustra a microrrede teste com nomenclatura em seus elementos. Neste esquema elétrico, as barras do sistema são denominadas pela letra “B” (B1, B2, B3, etc.). De maneira semelhante, as linhas de distribuição são denominadas pelas iniciais “DL”, bem como as fontes de geração com interface via conversores estáticos pelas letras “IBDG”, e as cargas pela letra “L”.

Figura 23 – Microrrede 1.



Fonte – próprio autor.

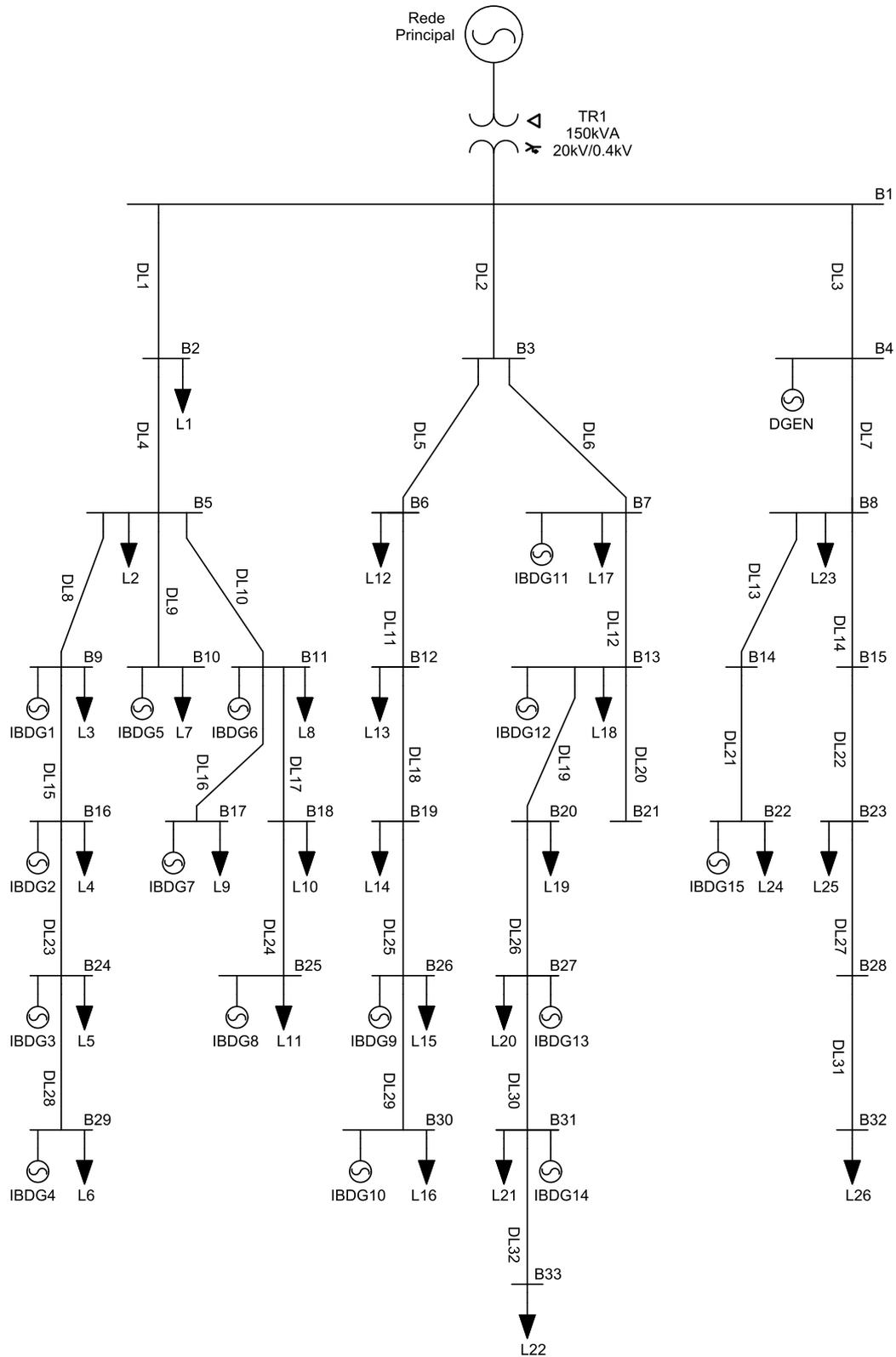
6.2 MICRORREDE 2

Similarmente ao sistema teste apresentado na seção anterior, o segundo sistema teste, denominado Microrrede 2, também é baseado nas características de redes de distribuição do sistema elétrico europeu. A modelagem é uma adaptação de um sistema de distribuição semi-rural real situado em Portugal, e já foi utilizado em outros estudos anteriormente (VAZ, 2015; SAPOUNTZOGLU *et al.*, 2019, 2020). A referida rede de distribuição é trifásica, desbalanceada, com cargas residenciais e com alta inserção de geração distribuída (VAZ, 2015). As cargas são majoritariamente monofásicas e todas as IBDGs foram modeladas conforme o modelo simplificado apresentado no Capítulo 4 (IBDG Modelo 1), também de maneira monofásica. O diagrama elétrico unifilar deste modelo é apresentado na Figura 24. A nomenclatura em seus elementos segue a mesma lógica descrita anteriormente. As conexões de cada uma das fases das cargas e gerações do diagrama trifásico estão detalhadas no Apêndice B, juntamente com os parâmetros utilizados para modelagem de todos os elementos da microrrede.

6.2.1 Topologias e restrições de operação

Assim como para a Microrrede 1, duas topologias foram propostas para a Microrrede 2, sendo uma delas com a microrrede operando em modo conectado à rede principal, e a outra, com a microrrede operando em modo ilhado. As restrições de topologia devido a questões ecológicas e de balanço de potência também foram aplicadas à este modelo. Sendo assim, a fonte de geração à diesel só permanece ativa quando a microrrede está operando em modo ilhado.

Figura 24 – Microrrede 2.



Fonte – (VAZ, 2015), editado pelo autor.

7 METODOLOGIA DE DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ZONA SOB FALTA

Neste capítulo são apresentados os princípios elétricos adotados para determinação de existência de faltas, a arquitetura do sistema multiagente proposto e o funcionamento geral do esquema de proteção desenvolvido.

7.1 PRINCÍPIOS DE DETECÇÃO E DE ANÁLISE DE EVENTOS

Com base nos princípios teóricos fundamentais de sistemas elétricos de potência, foram estabelecidos critérios utilizando-se três parâmetros para realizar a detecção e análise de um possível evento na microrrede: potência ativa (direção e magnitude), amplitude de tensão e impedância aparente. A escolha do uso da direção de potência ativa foi baseada nos princípios dos estudos apresentados na Seção 3.1.2. A aplicação destes critérios pode ser classificada em duas etapas, sendo umas delas a etapa de detecção de eventos, e a outra, a etapa de análise de eventos.

7.1.1 Etapa de detecção de eventos

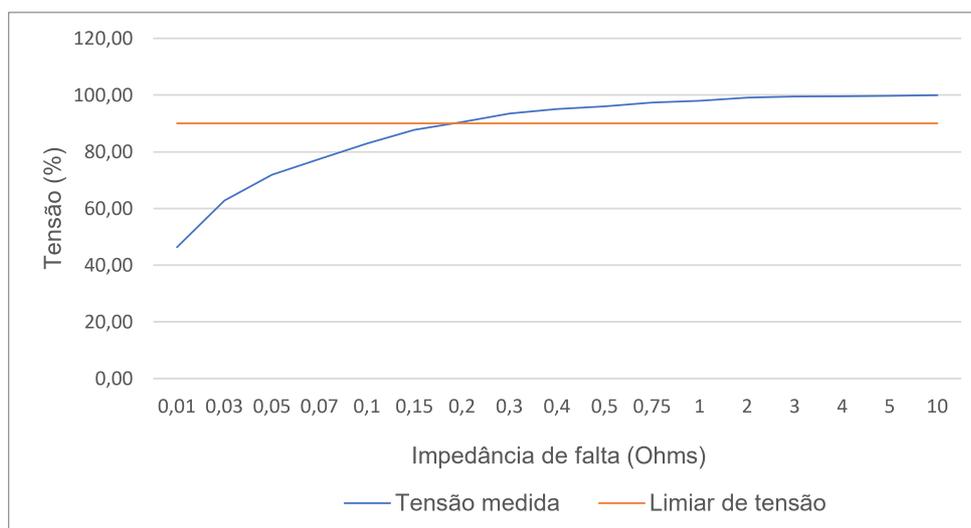
Na etapa de detecção de eventos, são utilizados somente os parâmetros de tensão e impedância. Baseado nos conceitos teóricos de circuitos elétricos aplicados à curto-circuitos, os critérios estipulados nesta etapa são fundamentados no provável surgimento de consequências decorrentes da incidência de faltas de baixa impedância em redes de distribuição de energia. Nestas circunstâncias, espera-se observar a ocorrência de afundamento de tensão e alterações substanciais nos valores de impedância próximos ao local da falta (BLACKBURN; DOMIN, 2014; KINDERMANN, 2010).

Estudos na literatura mostram que não há um consenso claro sobre a classificação técnica de faltas com relação à impedância, deixando em aberto discussões sobre a definição de faltas de baixa e alta impedância. A determinação da impedância de uma falta depende de uma ampla variedade de fatores, como a causa do curto-circuito, a resistência de arco elétrico, a composição do solo ou a resistência de qualquer outro material que faça parte do caminho percorrido pelo curto-circuito (BARNARD; PAHWA, 1993). Algumas definições encontradas na literatura classificam impedâncias de faltas com base na corrente de curto-circuito, como em (ALJOHANI; HABIBALLAH, 2020; SAPOUNTZOGLU *et al.*, 2019; BLACKBURN; DOMIN, 2014; IEEE, 2021). Em outros estudos, menciona-se os valores de impedância diretamente, ainda que não seja apresentada uma fundamentação científica sólida como justificativa, como os estudos citados em (BARNARD; PAHWA, 1993), que mencionam valores de impedância de falta que variam de 10Ω a 100Ω para redes de distribuição de média tensão. Desta forma, em vista das diversas possibilidades de classificação, a determinação de valores de baixa impedância para faltas em redes de distribuição dependerá de suas

características técnicas.

Neste trabalho, os valores de impedância para uso nas simulações de falta foram determinados a partir de uma estimativa realizada com base em alguns resultados de testes experimentais no modelo da Microrrede 2. Simulações com valores de impedância de falta que variam, não uniformemente, de $0,01 \Omega$ até 10Ω foram realizadas considerando um único cenário de falta monofásica (AG) à 70% da linha DL2, com a microrrede conectada à rede principal. Este cenário e localização de falta foram escolhidos pois observou-se afundamento de tensão menos evidente na região próxima ao curto-circuito em outras simulações. Medidas de tensão e impedância foram obtidas para um único medidor posicionado à 0% da linha DL2, e são apresentados nos gráficos das figuras 25 e 26.

Figura 25 – Gráfico de variação de tensão com relação à impedância de falta.

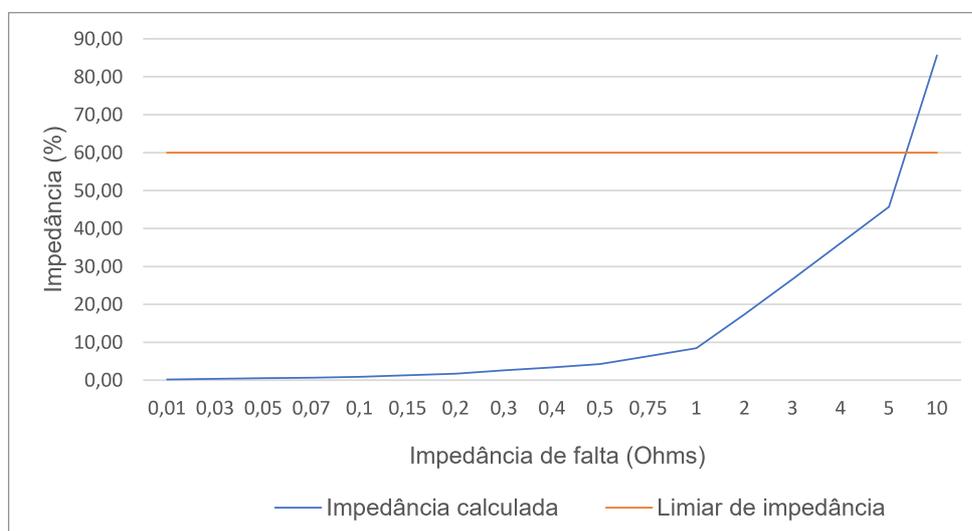


Fonte – próprio autor.

O gráfico da Figura 25 apresenta valores de tensão percentuais para a variação de impedâncias de falta, referentes à tensão nominal da rede, junto ao limiar de detecção de afundamento de tensão adotado neste trabalho, estipulado em 90% da tensão nominal da rede. Este limiar foi baseado nas normas de operação em sistemas de distribuição, que normalmente estipulam valor de tolerância de fornecimento de tensão em $\pm 5\%$ da tensão nominal da rede. Nota-se que, para a microrrede em questão, impedâncias de falta de valores próximos à $0,15 \Omega$ ou maiores podem ser indetectáveis por esta estratégia.

O gráfico da Figura 26, por sua vez, apresenta valores percentuais de impedância no ponto de medição para cada valor da variação de impedâncias de falta, junto ao limiar de detecção adotado neste trabalho, estipulado em 60% do valor da impe-

Figura 26 – Gráfico de variação de impedância medida com relação à impedância de falta.



Fonte – próprio autor.

dância de operação normal da microrrede. Este limiar foi determinado empiricamente, buscando-se detectar variações abruptas nos valores de impedâncias monitorados. O valor de impedância de operação normal é definido para cada ponto de medição, considerando as medições realizadas antecipadamente à situação de contingência. Neste gráfico, é possível observar que a utilização de medição de impedância para detecção de eventos pode ser mais abrangente, apesar destas medições não apresentarem variações em situação de contingência em alguns pontos da microrrede, como, por exemplo, em medições realizadas em ramos de carga.

Com base nestas observações, determinou-se o uso de valores de tensão e impedância para detecção de eventos na microrrede, e simulações de falta para valores de impedância de 0,01 Ω , 0,1 Ω , 1 Ω , 10 Ω e 50 Ω . A detecção de eventos pelo afundamento de tensão ocorrerá quando a medição ultrapassar o limite estipulado de 90% da tensão nominal, enquanto que a detecção de eventos pela alteração no valor de impedância ocorrerá quando houver uma variação de -40% no valor de impedância de operação normal, em um intervalo de tempo de 6 ciclos elétricos.

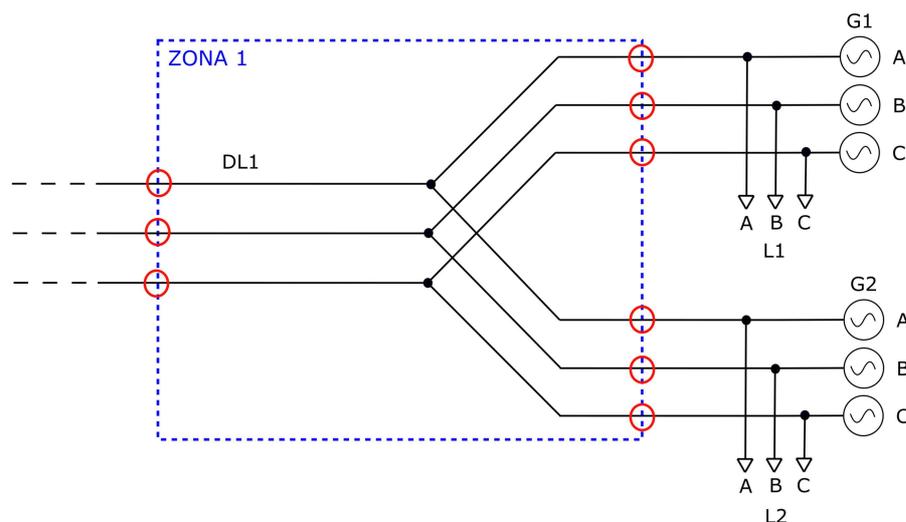
7.1.2 Etapa de análise de eventos

A partir da detecção de um evento, faz-se necessário realizar uma análise de informações da rede para deliberar sobre a existência de falta. Nesta seção são detalhadas as estratégias de identificação de falta para diferentes situações de contingência.

7.1.2.1 Princípio básico

Neste trabalho, os parâmetros analisados para efetuar esta deliberação são a magnitude de tensão e a potência ativa (direção e magnitude). A estratégia para detectar faltas consiste em definir uma zona em que seja possível monitorar o fluxo de potência ativa em todas as vias de entrada ou saída de energia, conforme exemplificado na Figura 27. Neste diagrama é possível observar um ramo de uma microrrede trifásica hipotética, com uma zona de proteção definida e os pontos de entrada e saída de energia destacados em vermelho. Duas unidades de geração estão representadas por G1 e G2, e duas cargas estão representadas por L1 e L2, todas conectadas ao restante não ilustrado da microrrede por meio da linha de distribuição DL1. Neste caso, considera-se que G1 e G2 estão gerando mais energia do que a demanda existente em L1 e L2.

Figura 27 – Estratégia de análise de eventos - Circunstância 1.

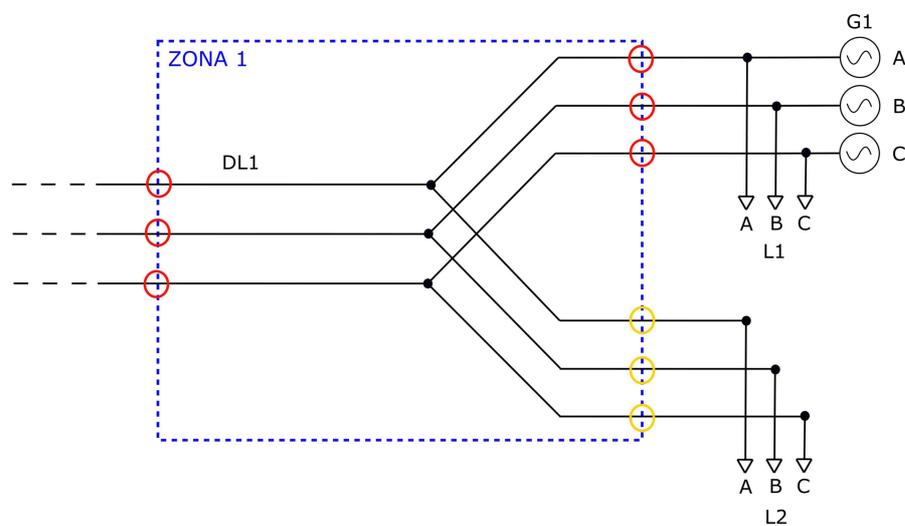


Fonte – próprio autor.

O segmento da microrrede a ser avaliado é o que está no interior da região demarcada pela Zona 1. De acordo com as leis de Kirchhoff, na ausência de falta interna à esta zona, uma análise por fase demonstra impossibilidade de potência ativa entrando simultaneamente em todos os pontos destacados em vermelho na imagem da Figura 27. Por outro lado, a existência de uma falta interna à região delimitada pela Zona 1, possibilita entrada de potência ativa em um ou mais pontos destacados na imagem (círculos em vermelho). Desta forma, espera-se identificar uma falta interna à zona de proteção estipulada por meio da avaliação do sinal de medida de potência ativa aferida em pontos de medição apropriados.

Faz-se importante observar que o fluxo de potência ativa depende dos valores de carga e geração presentes na microrrede, portanto, uma análise complementar deve ser realizada para os casos em que não haja geração em um determinado ramo da microrrede, ou para os casos em que a potência gerada seja inferior ao consumo da carga situada neste ramo. Na Figura 28 é apresentada uma situação onde as circunstâncias descritas são exemplificadas. Nesta imagem, considera-se que G1 gera mais energia do que o consumo de L1.

Figura 28 – Estratégia de análise de eventos - Circunstância 2.



Fonte – próprio autor.

Na circunstância apresentada, a ocorrência de uma falta de baixa impedância interna à zona de proteção causará uma redução do fluxo de potência que flui em direção à carga L2, impossibilitando a detecção de entrada de potência ativa em todos os pontos de medição conforme proposto na circunstância anterior. Sendo assim, busca-se identificar a presença de faltas internas à zona de proteção com base na constatação de entrada de potência ativa nos pontos de medição, juntamente com a verificação de uma redução de fluxo de potência de 20% em um intervalo de tempo de 6 ciclos elétricos nos pontos demarcados em amarelo na Figura 28. A determinação desta porcentagem de variação foi realizada por meio de testes em simulações.

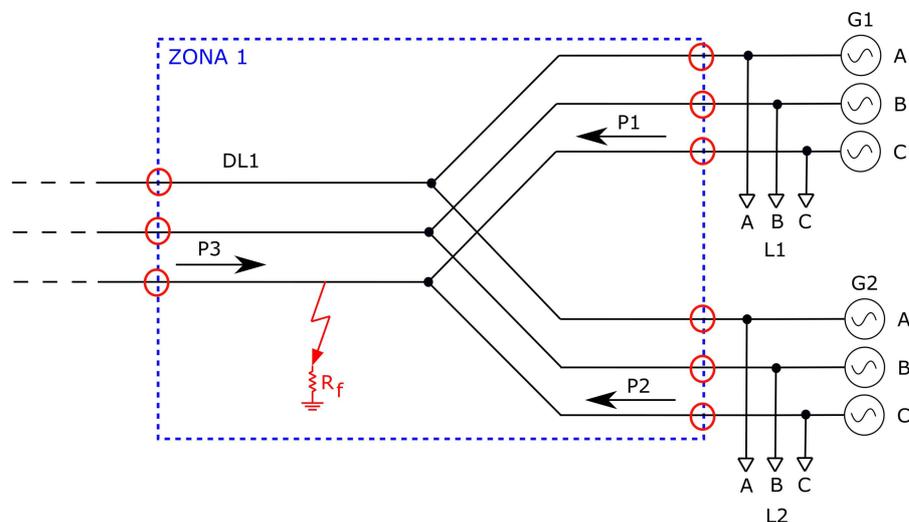
As avaliações das estratégias apresentadas são realizadas de acordo com o tipo de falta, conforme descrito nas seções seguintes.

7.1.2.2 Identificação de faltas monofásicas e trifásicas

Para faltas monofásicas e trifásicas é possível realizar a análise proposta para cada uma das fases separadamente, conforme ilustrado na Figura 29. Nesta imagem,

observa-se a ocorrência de uma falta monofásica na fase C, interna à Zona 1, com impedância de falta R_f . Os fluxos de potência nos pontos monitorados desta fase devem fluir no sentido indicado por P1, P2 e P3 quando as gerações G1 e G2 forem maiores que as cargas L1 e L2. Caso as cargas L1 e L2 sejam maiores do que G1 e G2, espera-se que P1 e P2 apresentem sentidos opostos aos ilustrados na Figura 29, juntamente com a variação de -20% no valor de magnitude em um intervalo de 6 ciclos elétricos. Para uma falta trifásica, os mesmos comportamentos são esperados para cada uma das fases do sistema.

Figura 29 – Estratégia de análise de eventos - Falta monofásica.



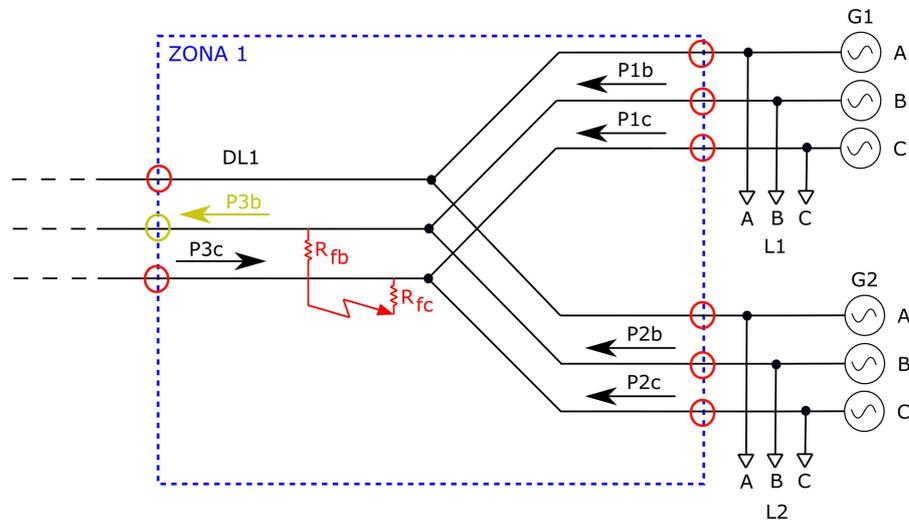
Fonte – próprio autor.

7.1.2.3 Identificação de faltas bifásicas e bifásicas-terra

Para faltas bifásicas, é necessário realizar uma análise considerando um número maior de fatores, já que se trata de um tipo de falta desequilibrada e que apresenta contato entre fases. O diagrama da Figura 30 mostra uma situação de falta bifásica, novamente considerando geração em G1 e G2 maior do que o consumo de energia em L1 e L2.

Nesta imagem é ilustrada uma situação de falta entre as fases B e C, sendo R_{fb} e R_{fc} a representação da impedância de falta entre as fases. Devido ao baixo valor de impedância destas variáveis, as tensões das fases B e C no ponto da ocorrência de falta devem ter valores muito próximos, e as correntes que fluem pelas resistências R_{fb} e R_{fc} devem ser iguais. Esta conexão entre fases faz com que as análises do fluxo das potências apresentados em Seção 7.1.2.2 sejam invalidadas em algumas circunstâncias. Como pode ser observado na Figura 30, dependendo da posição da barra *swing*

Figura 30 – Estratégia de análise de eventos - Falta bifásica.



Fonte – próprio autor.

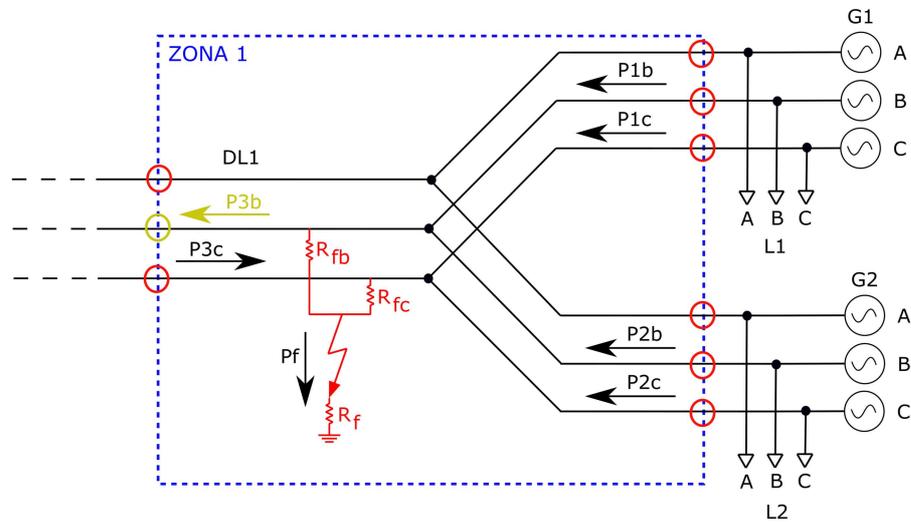
do sistema, a potência ativa $P3b$ fluirá no sentido oposto ao fluxo de potência $P3c$, buscando atender às novas configurações de circuito elétrico imposta pela presença da conexão entre fases. O mesmo comportamento poderá ser observado para o caso de ocorrência de uma falha bifásica-terra, conforme apresentado na Figura 31. Caso este comportamento não ocorra, os fluxos de potência obedecerão o comportamento esperado para faltas monofásicas e trifásicas.

Observa-se, neste caso, a presença de um fluxo de potência P_f , que será determinado pelo valor da impedância de falta e pela corrente de curto-circuito que circulará em direção ao terra. Para faltas de baixa impedância, este valor não possui magnitude suficiente para influenciar os fluxos de potência monitorados pela zona de proteção determinada. Para ambos os casos apresentados nas figuras 30 e 31, a presença da impedância entre fases no ponto da falta e, quando presente, a conexão ao terra, fazem com que o fluxo de potência de entrada ($P3c$) seja maior do que o fluxo de potência de saída ($P3b$).

7.1.2.4 Considerações finais

Com base nas estratégias apresentadas nesta seção, foi desenvolvido um sistema multiagente capaz de interpretar as informações de topologia e medições na microrrede a fim de realizar a deliberação sobre uma possível existência de falta. O detalhamento do funcionamento do SMA é feito nas seções seguintes.

Figura 31 – Estratégia de análise de eventos - Falta bifásica-terra.

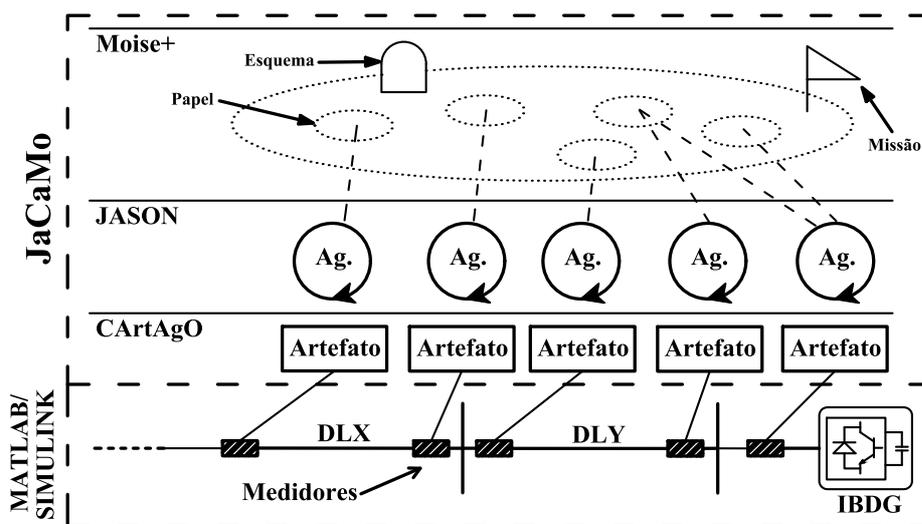


Fonte – próprio autor.

7.2 SISTEMA MULTIAGENTE PROPOSTO

Conforme mencionado no Capítulo 5, o SMA deste trabalho foi desenvolvido utilizando-se o *framework* JaCaMo. Na Figura 32 é ilustrado o funcionamento geral das simulações realizadas.

Figura 32 – Visão global do SMA proposto.



Fonte – próprio autor.

Os modelos de microrrede utilizados possuem medidores em sua topologia e,

quando simulados, geram um arquivo do tipo *.dat* para cada um destes medidores, contendo medidas RMS de potência ativa, tensão e impedância ao longo do tempo. Diversos cenários de falta foram simulados no *software* MATLAB/Simulink para obtenção destes arquivos.

As medidas obtidas das simulações são lidas pelos artefatos, que são programados como *smart meters* utilizando-se os recursos do CArtAgO. Desta forma, as simulações do Simulink e do Sistema Multiagente são realizadas separadamente. As medições e as funções de proteção implementadas nos *smart meters* são acessadas pelos agentes para realização das análises baseadas nas estratégias descritas na Seção 7.1. As ações e interações entre os agentes do SMA são regidas pelas regras e normas de organização programadas utilizando-se os recursos do Moise+. O detalhamento de cada uma destas camadas está apresentado a seguir.

7.2.1 Zonas de proteção e posicionamento de agentes

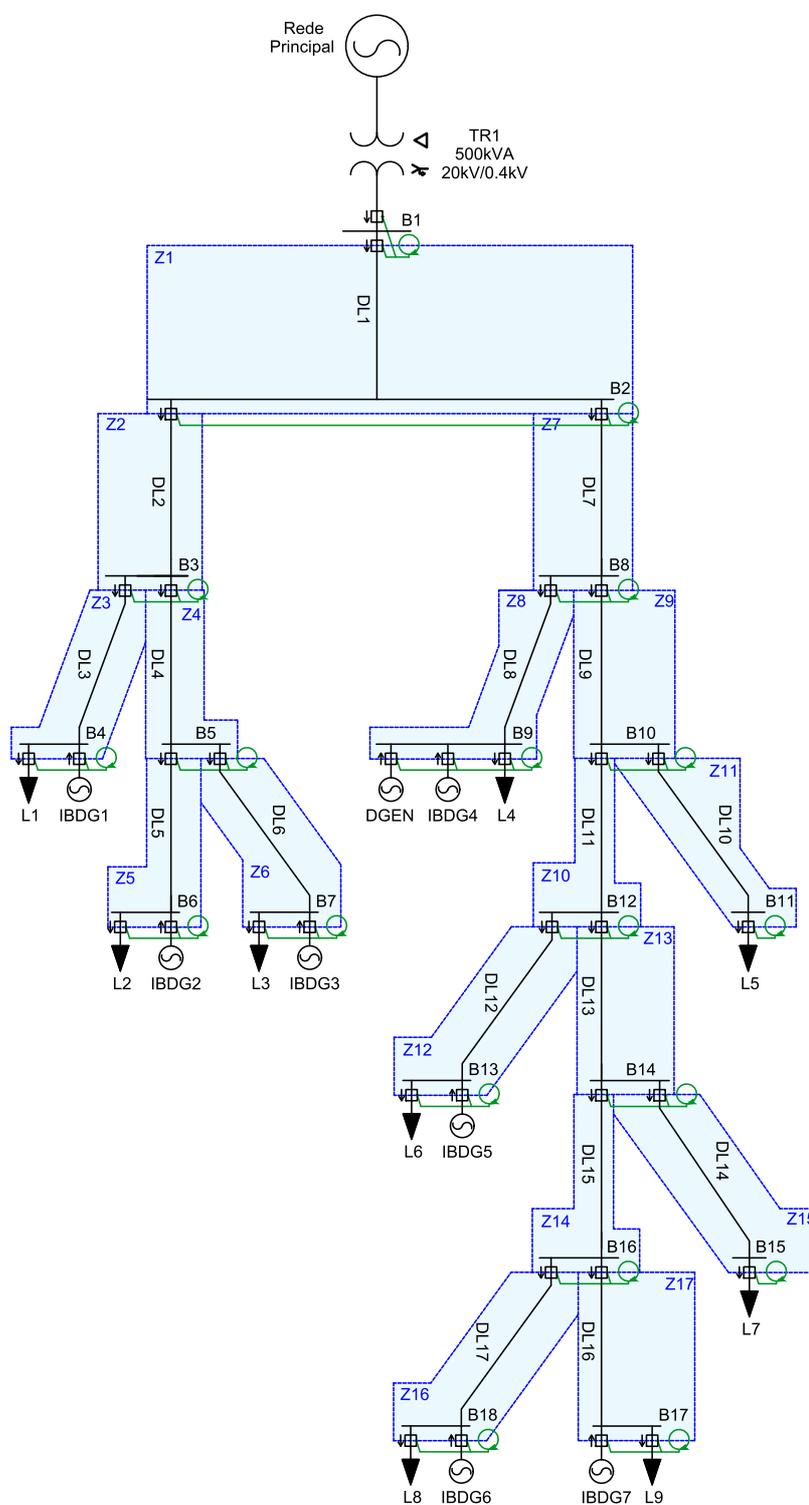
Seguindo-se a lógica da estratégia apresentada na Seção 7.1, as zonas de proteção devem ter medidores posicionados em suas fronteiras, de maneira que um medidor faça parte de, no máximo, duas zonas de proteção. A quantidade de medidores na implementação de um sistema de proteção é um fator importante na determinação dos recursos financeiros necessários, portanto o SMA proposto foi desenvolvido com capacidade para operar com diferentes distribuições físicas de medidores na microrrede, desde que atendendo duas restrições: medidores de linha de distribuição devem ser posicionados sempre no início da linha; um limite mínimo de distância física de distribuição de medidores na microrrede deve ser respeitado, porém não foi quantificado neste trabalho.

Desta forma, duas configurações de posicionamento de medidores foram propostas para cada um dos sistemas teste modelados. Nas figuras 33, 34, 35 e 36 são apresentadas estas configurações e suas respectivas formações de zonas, resultantes da posição dos medidores. Nas imagens, as zonas são representadas pelas áreas demarcadas em azul e os medidores são representados pelos quadrados acompanhados de uma flecha que indica a polaridade das medições. Estas polaridades foram definidas e padronizadas conforme o elemento do sistema em que o medidor está situado. Quando situado em um elemento ativo, a polaridade é definida no sentido do elemento para a barra. Quando posicionado em um elemento passivo, a polaridade é definida no sentido da barra para o elemento.

Os agentes do sistema de proteção proposto devem estar posicionados próximos às barras da microrrede, monitorando as informações fornecidas pelos medidores locais. Esta determinação visa eliminar o uso de sistemas de comunicação entre agentes e medidores. Nas figuras 33, 34, 35 e 36 os agentes são representados pelos círculos verdes, conectados aos seus respectivos medidores. Cada um dos agentes

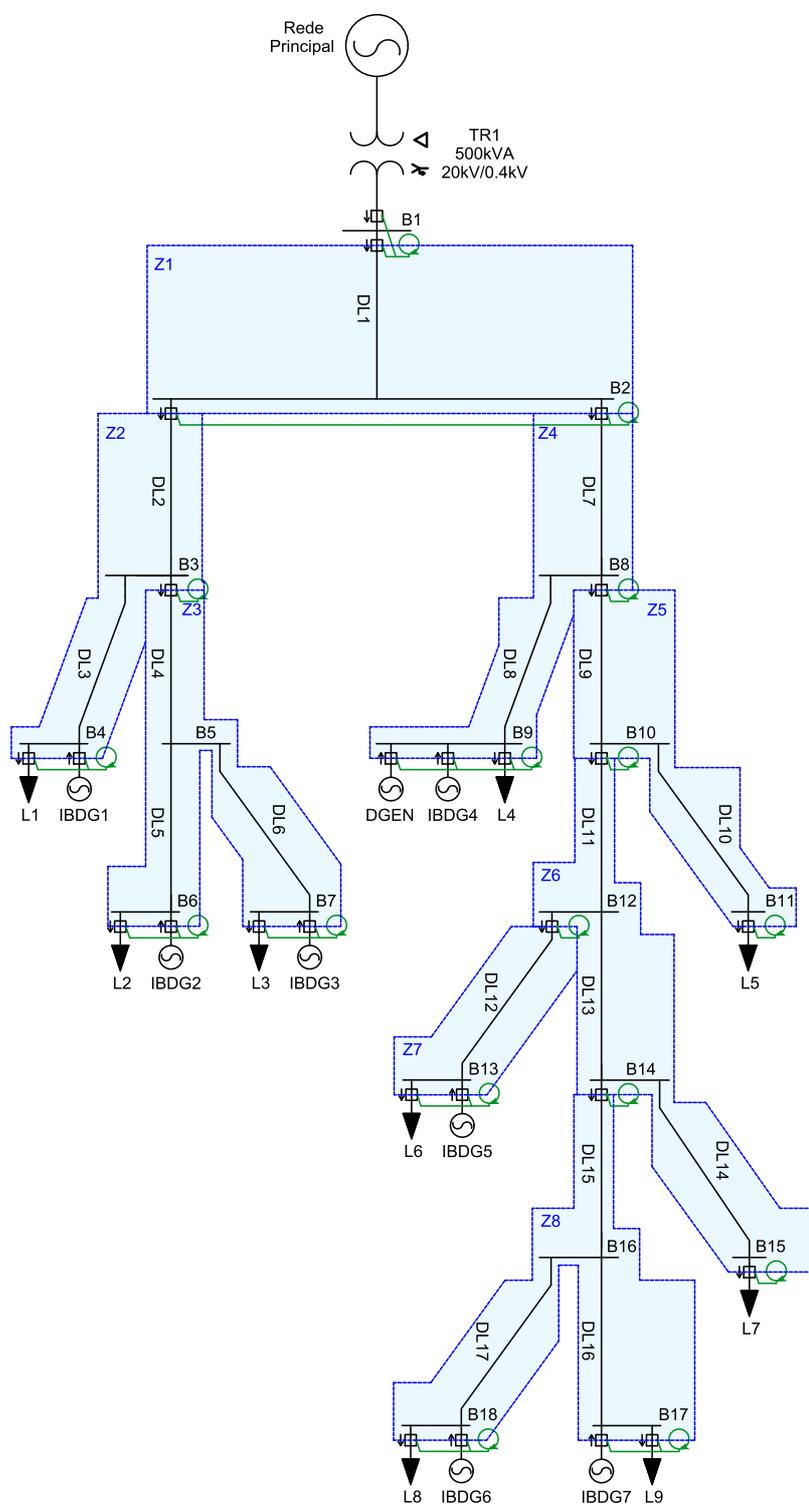
do sistema recebe a mesma nomenclatura da barra à qual está situado.

Figura 33 – Microrrede 1, configuração 1.



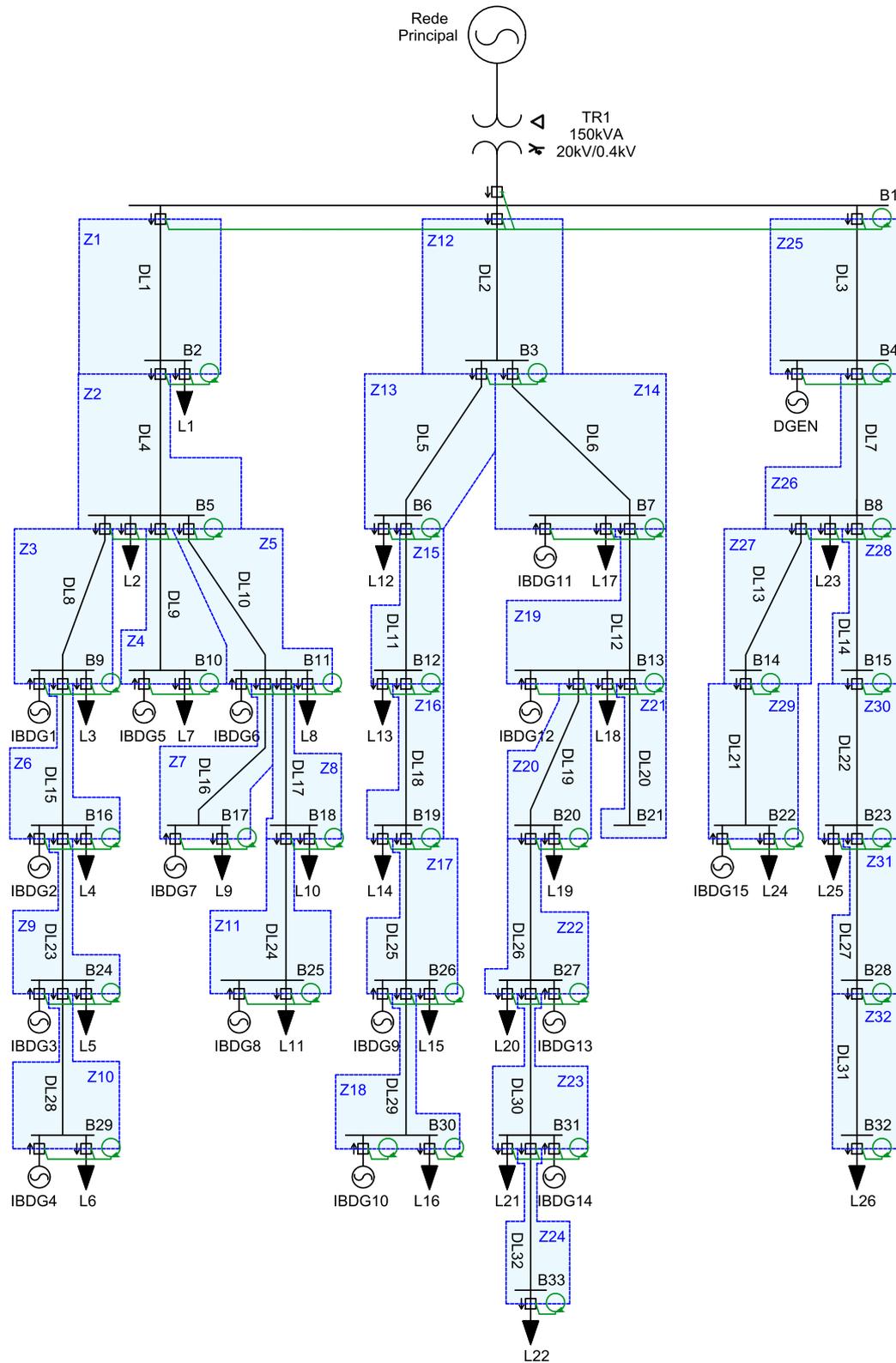
Fonte – próprio autor.

Figura 34 – Microrrede 1, configuração 2.



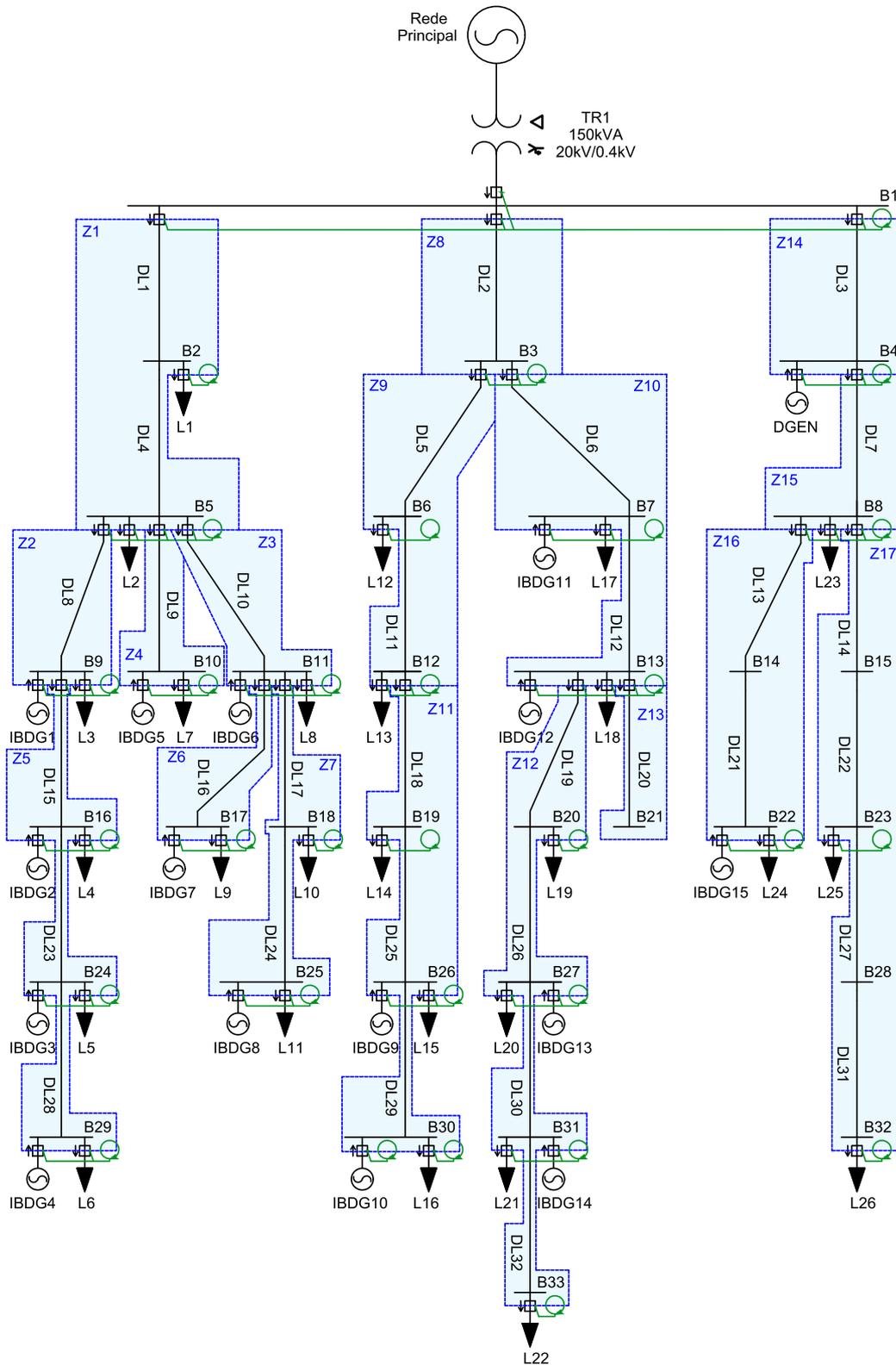
Fonte – próprio autor.

Figura 35 – Microrrede 2, configuração 1.



Fonte – próprio autor.

Figura 36 – Microrrede 2, configuração 2.



Fonte – próprio autor.

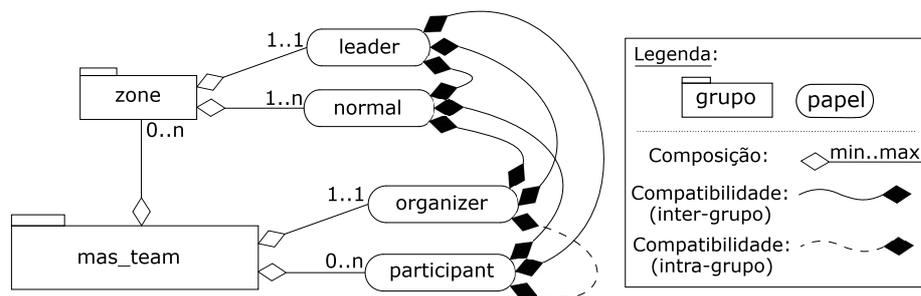
7.3 ORGANIZAÇÃO DO SMA

A organização do SMA proposto foi desenvolvida utilizando-se as dimensões estrutural, funcional e normativa presentes no modelo organizacional oferecido pelo Moise+, e possui três finalidades principais:

- Coordenar a inicialização do sistema de proteção;
- Estabelecer funções e regras de interação entre agentes para viabilizar a implementação de um sistema descentralizado em busca de um objetivo comum;
- Utilizar de seus recursos como auxílio para o desenvolvimento do SMA.

No tocante à dimensão estrutural da organização proposta, dois tipos de grupo foram estabelecidos, conforme pode ser observado na representação gráfica da Figura 37.

Figura 37 – Diagrama simplificado das especificações estruturais do sistema organizacional do SMA.



Fonte – próprio autor.

O diagrama apresentado elucida as possibilidades de formação de grupos, adoção de papéis e interações entre os agentes integrados no modelo de organização em questão. O tipo de grupo *mas_team* é instanciado somente uma vez, e será composto por todos os agentes do sistema de proteção. Neste grande grupo, dois papéis estão disponíveis para serem adotados pelos agentes:

- Organizer*: somente um agente pode adotar este papel dentro de uma instância de *mas_team*. O agente que ocupa o papel de *organizer* é responsável por coordenar a avaliação inicial de topologia que o sistema de proteção faz da microrrede, e por conduzir as ações necessárias para viabilizar a simulação do SMA nas microrredes modeladas;
- Participant*: não existem limitações organizacionais para o número de agentes que podem adotar este papel em uma instância de *mas_team*. Um agente

possuindo este papel segue planos da organização e recebe instruções do agente *organizer* durante o processo de inicialização do sistema de proteção.

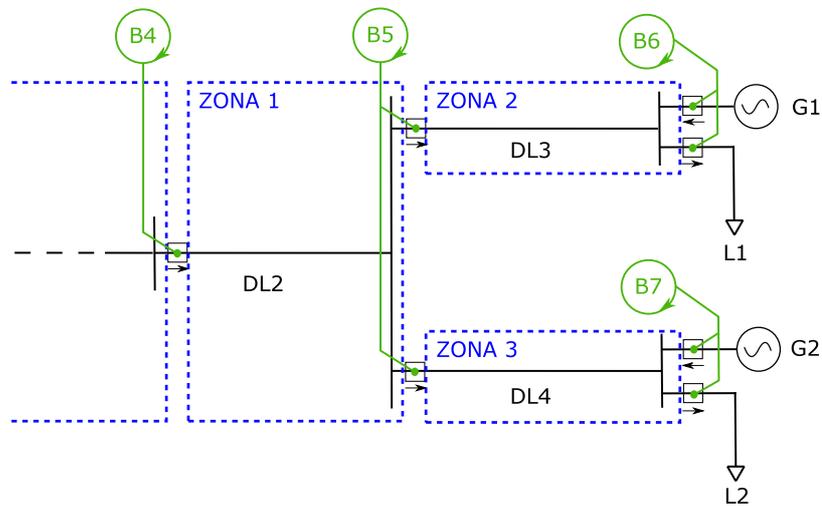
Para que a detecção e análise de eventos na microrrede sejam realizadas, grupos são criados para representar as zonas de proteção apresentadas na seção anterior. As zonas de proteção são criadas como instâncias do tipo de grupo *zone*, sem limitação de quantidade, e disponibilizam dois tipos de papéis:

- a) *Leader*: somente um agente do grupo pode adotar este papel dentro de uma instância de *zone*. A função exercida pelo agente que possui este papel é analisar as informações locais e as informações recebidas dos outros agentes do grupo, e deliberar sobre a existência de falta em sua zona de proteção;
- b) *Normal*: não existem limitações organizacionais para o número de agentes que podem adotar este papel em uma instância de *zone*, embora este número deva ser restringido pelas limitações técnicas provenientes da aplicação em questão. Um agente ocupando este papel realiza análise de informações locais e envia conclusões parciais sobre o evento para o *leader* de sua zona de proteção.

O diagrama da Figura 37 ilustra também a compatibilidade entre papéis dentro das possibilidades oferecidas pelo modelo de organização proposto. A única compatibilidade intra-grupo permitida pela formação apresentada na Figura 37 é entre os papéis *organizer* e *participant*, indicando que um agente pode possuir os dois papéis dentro de uma mesma instância de *mas_team*. O restante das compatibilidades apresentadas são inter-grupos, que significa que um agente pode ter diferentes papéis em diferentes grupos, desde que respeitando as regras de compatibilidade. Para facilitar a compreensão, um exemplo de formação de zonas em ramo de uma microrrede hipotética é ilustrada na Figura 38. Nesta figura, observa-se a formação das zonas 1, 2 e 3 a partir da disposição dos medidores deste ramo da microrrede hipotética. Conforme mencionado anteriormente, agentes são sempre posicionados nas barras do sistema e monitoram os medidores imediatamente próximos à sua barra. Cada uma das zonas formadas representa uma instância do tipo de grupo *zone*. Nota-se que, o agente B6 faz parte somente do grupo Zona 2, e que o agente B7 faz parte somente do grupo Zona 3. O agente B5, por sua vez, é integrante dos três grupos nomeados na imagem, enquanto que o agente B4 faz parte do grupo Zona 1 e de um grupo que representa uma zona não relevante nesta exemplificação. Deste modo, a compatibilidade inter-grupos é importante para garantir, por exemplo, que o agente B5 possa desempenhar o papel de *leader* na Zona 1 e o papel de *normal* nas zonas 2 e 3. Na Figura 39 é ilustrado uma representação gráfica geral da formação de grupos utilizando-se as instâncias *mas_team* e *zone*.

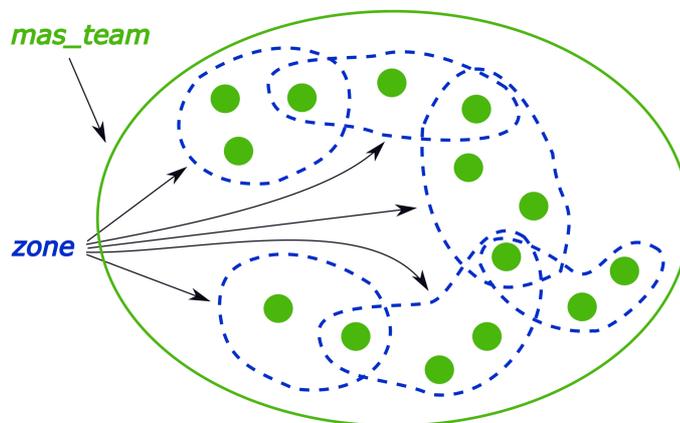
A proposta de formação de grupos deste trabalho baseia-se, principalmente,

Figura 38 – Exemplo de formação de zonas e adoção de múltiplos papéis.



Fonte – próprio autor.

Figura 39 – Formação de grupos do SMA proposto.



Fonte – próprio autor.

em características de três das estruturas organizacionais apresentadas na Seção 5.5. A possibilidade de um agente de fazer parte de mais de um grupo simultaneamente e possuir objetivos e capacidades complementares com outros agentes do mesmo grupo, além de a comunicação entre estes ser realizada somente internamente ao grupo durante a operação do sistema de proteção, são características evidentes na estrutura organizacional por congregações (Seção 5.5.4). A cooperatividade entre agentes em busca de um objetivo comum por meio da adoção de diferentes papéis e divisão de tarefas, são características utilizadas na estrutura organizacional por times (Seção 5.5.5). Finalmente, a restrição de informações locais aos agentes que

possuem o papel *normal* enquanto que os agentes com papel *leader* têm acesso a informações mais abrangentes, trazem à tona características da estrutura organizacional por hierarquia (Seção 5.5.1).

Com as especificações da dimensão estrutural devidamente atendidas, os agentes passam a ter como referência de ações as especificações da dimensão funcional que, por sua vez, são normatizadas pela dimensão normativa da organização. A dimensão funcional é formada por um conjunto de diretrizes que determina como um objetivo global pode ser alcançado estipulando um esquema de divisão de tarefas e sua forma de execução. Desta forma, um objetivo global é decomposto em objetivos menores, que podem ser decompostos em objetivos ainda menores, e assim sucessivamente. Cada uma das instruções de um esquema da dimensão funcional de uma organização é associada à uma missão, e será executada pelos agentes que estão comprometidos com esta missão. As regras que determinam a possibilidade de um agente comprometer-se com uma missão dependem do papel adotado por este agente, e são definidas na dimensão normativa da organização. O Quadro 5 apresenta as especificações normativas da organização do SMA deste trabalho.

Quadro 5 – Especificações normativas da organização do SMA.

Papel	Condição deôntica	Missão
<i>Organizer</i>	<i>obligation</i>	<i>mOrganizer.</i>
<i>Participant</i>	<i>obligation</i>	<i>mParticipant.</i>
<i>Leader</i>	<i>obligation</i>	<i>mLeader.</i>
<i>Normal</i>	<i>obligation</i>	<i>mNormal.</i>

Fonte – próprio autor.

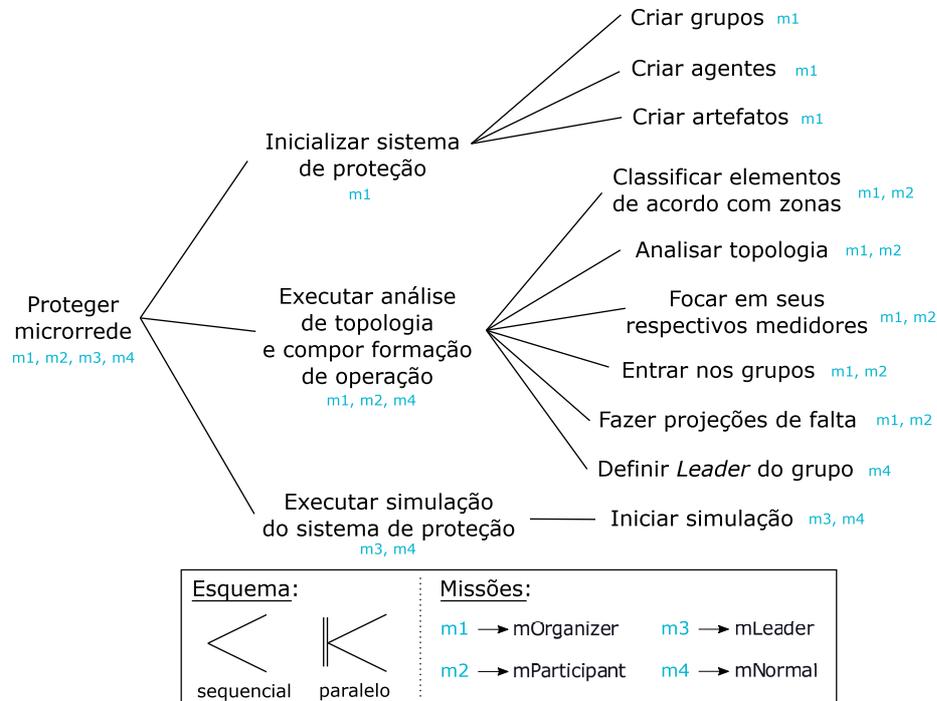
As normas apresentadas neste quadro indicam que a adoção de um papel obrigatoriamente requer o comprometimento com a missão correspondente ao papel adotado.

Conforme mencionado anteriormente, as missões determinam as atribuições que um agente possui no conjunto de instruções do esquema da dimensão funcional. Neste trabalho, o esquema da dimensão funcional está representado pelo diagrama da Figura 40.

Nesta figura observa-se a decomposição do objetivo global "Proteger microrrede" em três outros objetivos que, por sua vez, são decompostos em objetivos ainda menores. Cada um dos objetivos presentes na figura possui a indicação de suas missões associadas. O esquema funcional apresentado indica que os agentes comprometidos com as missões presentes no diagrama devem alcançar sequencialmente os objetivos menores referentes à sua missão para que os objetivos maiores sejam alcançados.

A organização do SMA proposto proporciona objetividade e efetividade na in-

Figura 40 – Diagrama representativo das especificações funcionais da organização do SMA.



Fonte – próprio autor.

teração entre os agentes do SMA tanto nas etapas de inicialização, composição da formação e análise de topologia da microrrede, quanto no funcionamento operacional do sistema de proteção elaborado, uma vez que suas funções e ações são coordenadas e conduzidas por um conjunto de regras estabelecidas.

7.4 ARTEFATOS DO SMA

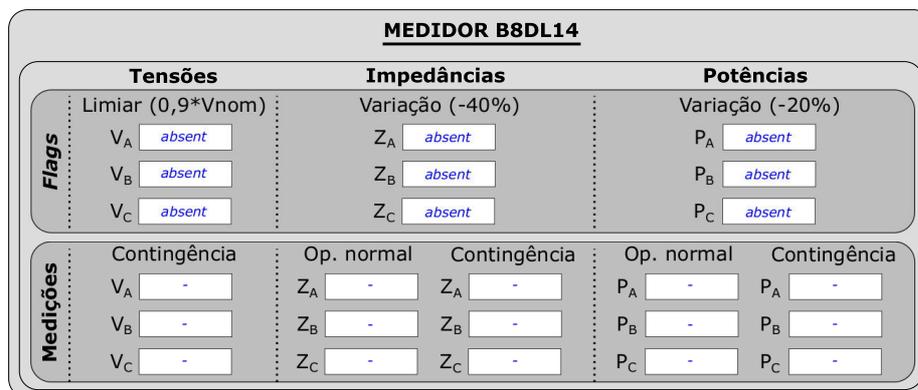
O objetivo do uso de artefatos neste trabalho é possibilitar que os agentes interpretem o comportamento dos parâmetros da microrrede em situações de contingência. A partir dos arquivos de dados obtidos da simulação no MATLAB/Simulink, os artefatos emulam os medidores da rede, viabilizando a realização de análises de eventos por parte dos agentes. Conforme apresentado na Seção 5.6.3, artefatos são instâncias computacionais que podem ser representadas como um dispositivo que, por sua vez, pode ser acessado pelos agentes por meio de propriedades observáveis, operações, sinais e manuais de instrução. No funcionamento do sistema de proteção proposto, somente um tipo de artefato foi programado, chamado de *smart_meter*. Sendo assim, no processo de inicialização do sistema, o agente que possui o papel de *organizer* cria uma instância de *smart_meter* para cada um dos medidores da microrrede. Durante

o funcionamento do sistema de proteção, as interações dos agentes com seus respectivos medidores acontecem exclusivamente por meio de propriedades observáveis. Um exemplo de artefato do tipo *smart_meter* com suas propriedades observáveis é ilustrado no exemplo da Figura 41.

Um artefato medidor apresenta suas informações divididas em duas classificações, as propriedades observáveis do tipo “Flags” e as propriedades observáveis do tipo “Medições”. As propriedades observáveis do tipo “Flags”, referentes à tensão e à impedância, indicarão se as condições de detecção de eventos apresentadas na Seção 7.1.1 foram atendidas, enquanto que as propriedades observáveis do tipo “Medições”, juntamente com as propriedades observáveis tipo “Flags” referentes à redução de potência, proverão informações para a realização das análises propostas na Seção 7.1.2.

A Figura 41 retrata o exemplo de um medidor nomeado B8DL14, em um momento em que a microrrede está em operação normal. Nesta condição, nenhuma medida é apresentada em suas propriedades observáveis.

Figura 41 – Artefato medidor em momento de operação normal da microrrede.

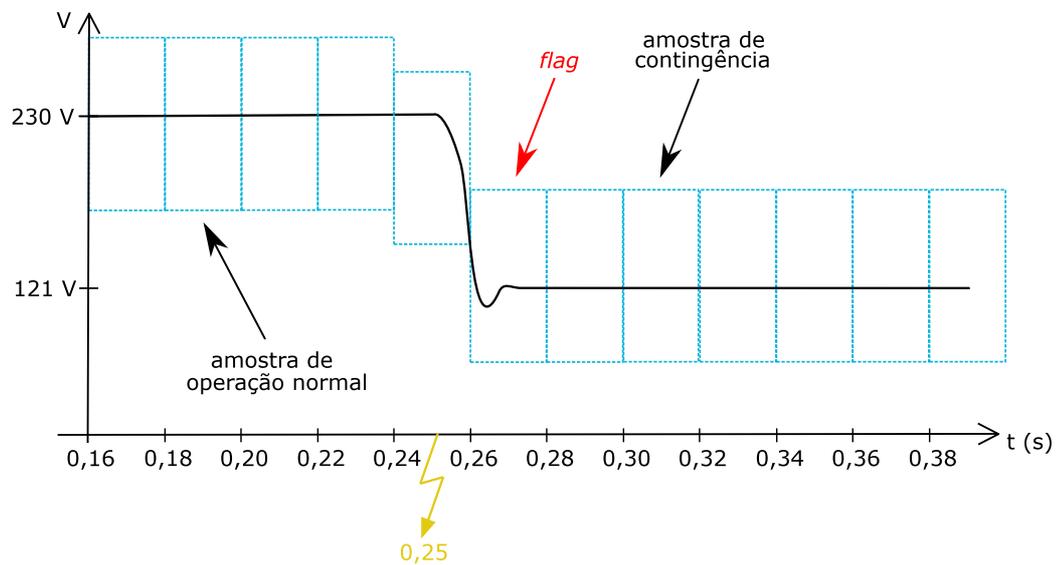


Fonte – próprio autor.

Apesar de nenhuma informação ser disponibilizada, o medidor desempenha sua função de monitoramento de medidas internamente. O gráfico hipotético da Figura 42 exemplifica como as medidas são processadas internamente pelos medidores e como suas propriedades observáveis são atualizadas.

O medidor avalia amostras de parâmetros a cada 1 ciclo elétrico de frequência 50Hz. O cálculo dessas amostras é realizado a partir da leitura dos arquivos de dados provenientes da simulação no MATLAB/Simulink. Estes arquivos contêm medições dos parâmetros a cada 0,001 s, às quais é aplicado uma janela deslizante que calcula a média aritmética dessas medidas a cada 20 ms, resultando em 1 amostra por ciclo elétrico. Tais valores foram escolhidos baseados na capacidade de processamento de

Figura 42 – Exemplificação das amostragens de medidas utilizadas pelos artefatos.



Fonte – próprio autor.

relés tradicionais providos de microprocessadores. Na Figura 42 é possível observar a exemplificação da janela deslizante ao longo de uma curva hipotética da tensão em uma fase do sistema. Este gráfico representa uma situação de contingência em que a falta ocorreu no instante 0,25 ms. No momento em que ocorre o afundamento de tensão, a amostra de medida indicada pela seta *flag* aciona a função de detecção de afundamento de tensão. Neste momento, somente as propriedades observáveis referentes à valores de operação normal são imediatamente atualizados, conforme ilustrado na Figura 43. A amostra de medição referente à operação normal da microrrede é considerada como sendo a 4^a amostra precedente à detecção de um evento.

A fim de evitar imprecisão na atualização dos parâmetros monitorados, o período de oscilação de transitórios é sobrepassado utilizando-se a 2^a amostra após a detecção de um evento, conforme indicado no gráfico da Figura 42. Neste momento, o restante das propriedades observáveis do medidor são atualizadas, resultando no conjunto de informações apresentados na Figura 44.

Todos os parâmetros monitorados pelo artefato medidor seguem as etapas de processamento de amostras descritas anteriormente. As medições e indicadores de detecção de eventos resultantes deste processo são utilizados pelos agentes para deliberar sobre a existência e localização de falta na microrrede. Os detalhamentos dos procedimentos para esta determinação são apresentados na seção seguinte.

Figura 43 – Artefato medidor no momento de detecção de um evento.

MEDIDOR B8DL14					
Tensões		Impedâncias		Potências	
Limiar (0,9*Vnom)		Variação (-40%)		Variação (-20%)	
Flags	V _A	Z _A		P _A	
	V _B	Z _B		P _B	
	V _C	Z _C		P _C	
Medições	Contingência	Op. normal	Contingência	Op. normal	Contingência
	V _A	Z _A 8,00e+09 Ω	Z _A -	P _A 0,00 W	P _A -
	V _B	Z _B 47,99 Ω	Z _B -	P _B 1020,2 W	P _B -
	V _C	Z _C 23,86 Ω	Z _C -	P _C 2037,9 W	P _C -

Fonte – próprio autor.

Figura 44 – Artefato medidor no momento de atualização final de propriedades observáveis.

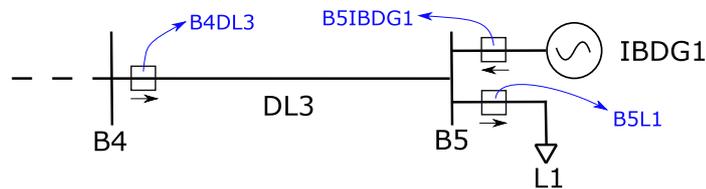
MEDIDOR B8DL14					
Tensões		Impedâncias		Potências	
Limiar (0,9*Vnom)		Variação (-40%)		Variação (-20%)	
Flags	V _A	Z _A		P _A	
	V _B	Z _B		P _B	
	V _C	Z _C		P _C	
Medições	Contingência	Op. normal	Contingência	Op. normal	Contingência
	V _A 186,06 V	Z _A 8,00e+09 Ω	Z _A 8,00e+09 Ω	P _A 0,00 W	P _A 0,00 W
	V _B 93,48 V	Z _B 47,99 Ω	Z _B 47,92 Ω	P _B 1020,2 W	P _B 169,92 W
	V _C 226,77 V	Z _C 23,86 Ω	Z _C 23,87 Ω	P _C 2037,9 W	P _C 2008,2 W

Fonte – próprio autor.

7.4.1 Nomenclatura de medidores

A regra de nomenclatura adotada para nomear cada um dos medidores presentes na microrrede tem como objetivo facilitar a implementação do sistema de proteção e auxiliar na compreensão da metodologia proposta. Sendo assim, cada medidor possui seu nome composto pela junção do nome da barra imediatamente próxima à qual está situado, com o nome do elemento em que ele situa-se. Na Figura 45 é ilustrado um exemplo de formação de nomes dos medidores.

Figura 45 – Exemplo de formação da nomenclatura dos medidores da microrrede.



Fonte – próprio autor.

7.5 AGENTES DO SMA

A partir de toda estrutura oferecida pelas dimensões da organização e dos artefatos, a função de desempenhar um sistema de proteção para uma microrrede pode, finalmente, ser exercida pelos agentes do SMA proposto. Nesta seção é apresentado o funcionamento dos agentes referente às etapas de inicialização, análise de topologia e operação do sistema de proteção.

7.5.1 Etapa de inicialização do SMA

Conforme detalhamento da organização apresentado na Seção 7.3, o SMA possui um procedimento de inicialização a partir de um único agente, denominado agente B1. Este agente é criado com algumas crenças iniciais provenientes de um arquivo do tipo *.asl*, contendo informações sobre a topologia e o posicionamento dos medidores na microrrede. Este é o arquivo de entrada de dados do sistema de proteção, e pode ser alterado de acordo com os requisitos da aplicação. Todas as crenças iniciais contendo as informações mencionadas seguem o formato do seguinte exemplo:

```
"grid_lines(b1, b2, dl(1)).
```

```
grid_gen(b10, ibdg(5), [phase_a, phase_b, null]).
```

```
grid_load(b18, l(10), [null, phase_b, phase_c]).
```

```
meter(b2, dl(4), [zone_1, zone_2])."
```

As crenças identificadas pelo predicado *grid_lines* indicarão, em seus argumentos, duas barras da microrrede ("b1", "b2") conectadas por uma linha de distribuição ("dl(1)"). Crenças identificadas pelos predicados *grid_gen* e *grid_load* possuem formatos parecidos, e indicarão em seus argumentos a conexão de geração ou carga ("ibdg(5)"/"l(10)"), trifásicas ou monofásicas, em uma determinada barra da microrrede,

indicando as fases conectadas por uma lista em seu último argumento. Finalmente, as crenças de predicado *meter* indicarão a posição de cada medidor da microrrede e os nomes das zonas às quais este medidor faz parte. A crença de predicado *meter* do exemplo anterior indica um medidor posicionado na linha “dl(4)” imediatamente próximo à barra “b2”, fazendo parte das zonas “zone_1” e “zone_2”.

Faz-se importante ressaltar que todos os agentes do SMA proposto são criados a partir do mesmo código fonte e são programados para entrar e assumir um papel no grupo *mas_team* assim que criados. Por ser o primeiro a ser criado, o agente B1 assume o papel de *organizer* deste grupo, e dá início a todos os procedimentos de inicialização do sistema. Os demais agentes assumem o papel *participant*, também logo em seguida à sua criação. Com base no arquivo de dados de entrada especificado anteriormente, o agente B1 cria todos os agentes, grupos e artefatos do SMA de acordo com as especificações de zona, topologia e posição dos medidores. Todos os agentes são criados com a mesma nomenclatura das barras da microrrede. Assim, a etapa de inicialização do sistema, estabelecida pela organização conforme o diagrama de especificações funcionais da Figura 40, é concluída.

7.5.2 Etapa de análise de topologia

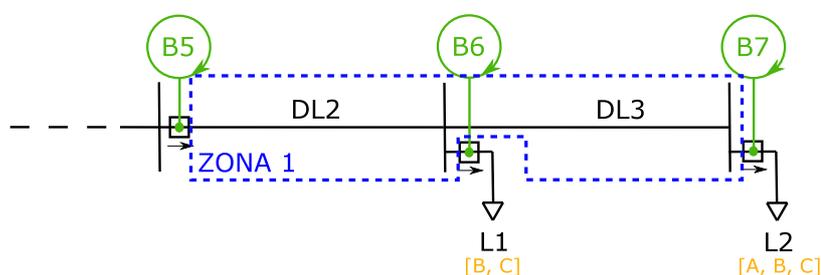
Com todos os agentes do sistema criados, inicia-se a etapa de análise de topologia, formação de grupos e projeção de fatores relacionados à situação de contingência. Seguindo o esquema de organização estabelecido, os agentes interpretam os dados de entrada para criar novas crenças à respeito da topologia da microrrede. Inicialmente, os agentes classificam os elementos da microrrede a partir das premissas de formação de zonas estabelecidas para o sistema de proteção. Sendo assim, os agentes avaliam quais elementos estão posicionados entre medidores que formam uma determinada zona, e criam crenças para armazenar suas conclusões sobre esta classificação. Em seguida, os agentes classificam todas as barras da microrrede utilizando o conceito dos termos “à montante” e “à jusante”, tomando como referência a posição em que estão situados na microrrede. Durante esta avaliação, crenças também são criadas para armazenamento das novas concepções, dando aos agentes uma noção de toda a rede.

Realizadas as análises de topologia, os agentes identificam seus respectivos medidores e lhes aplicam o recurso *focus*, uma funcionalidade oferecida pelo CARtAgO que permite que as atualizações de propriedades observáveis dos artefatos se tornem crenças do agente imediatamente após serem atualizadas. Essa funcionalidade permite que os agentes percebam alterações nos artefatos instantaneamente, possibilitando a realização de análises imediatas a mudanças no ambiente.

Concluídos os procedimentos mencionados, os agentes iniciam o processo de formação de grupos e realização de projeções de situação de contingência. A

formação dos grupos é iniciada com a entrada dos agentes nos grupos referentes às zonas às quais seus medidores fazem parte. Inicialmente, os agentes entram nas zonas adotando o papel *normal*. Com os integrantes de cada grupo definidos, os agentes projetam uma situação de contingência considerando-se no papel de *leader*, e realizam uma breve análise das circunstâncias resultantes desta projeção. Esta análise determina o conjunto de informações que o agente deve aguardar para realizar a deliberação sobre um evento. Para facilitar a compreensão, um exemplo é apresentado na Figura 46.

Figura 46 – Exemplo de projeção de situação de contingência.



Fonte – próprio autor.

No diagrama unifilar do exemplo apresentado, a Zona 1 é delimitada pelos medidores dos agentes B5, B6 e B7. Nota-se que a carga L1 não possui conexão na fase A. Em conformidade com a proposta de análise de fluxo de potência por fases, nesta condição, a Zona 1 para a fase A será delimitada somente pelos medidores dos agentes B5 e B7. Sendo assim, o agente B7, quando desempenhando o papel de *leader*, precisará aguardar o recebimento de informação referente à fase A somente do agente B5, antes de realizar a deliberação da existência de falta. Desta forma, as crenças geradas pelo procedimento de projeção de contingência proporcionam suporte e agilidade no processo de deliberação. O detalhamento das análises de situação de contingência e troca de informações entre agentes é apresentado na seção da etapa de operação do sistema de proteção.

A formação dos grupos do SMA é finalizada com a adoção do papel de *leader* em cada grupo do tipo *zone*. Tendo em vista que o sistema de proteção proposto foi desenvolvido para microrredes radiais, determinou-se que o papel de *leader* de cada uma das zonas será adotado pelo último agente à jusante em relação aos demais agentes do grupo. Esta determinação evita que um agente adote papel de *leader* em múltiplos grupos, prevenindo sobrecarga no recebimento de mensagens no momento de contingência. Desta forma, após analisar a posição de cada um dos agentes do grupo, o agente que se enquadra na determinação estipulada assume o papel de *leader*. Caso exista mais de um agente atendendo esta determinação, prevalece o

primeiro a adotar o papel.

7.5.3 Etapa de operação do sistema de proteção proposto

Para cumprir com objetivo de analisar corretamente eventos detectados na microrrede e deliberar sobre a existência de uma falta, as atividades dos agentes no funcionamento do sistema de proteção são baseadas, principalmente, em duas etapas de avaliação. A primeira delas consiste em uma avaliação individual dos fatos gerados a partir dos medidores de cada agente. Esta etapa de avaliação resulta em uma conclusão parcial sobre a existência de uma falta. A segunda etapa consiste em uma avaliação coletiva, onde todas as conclusões parciais dos agentes de um determinado grupo são enviadas para o agente que desempenha o papel *leader*. Com as conclusões parciais concentradas, uma avaliação final é realizada para a determinação da existência de falta.

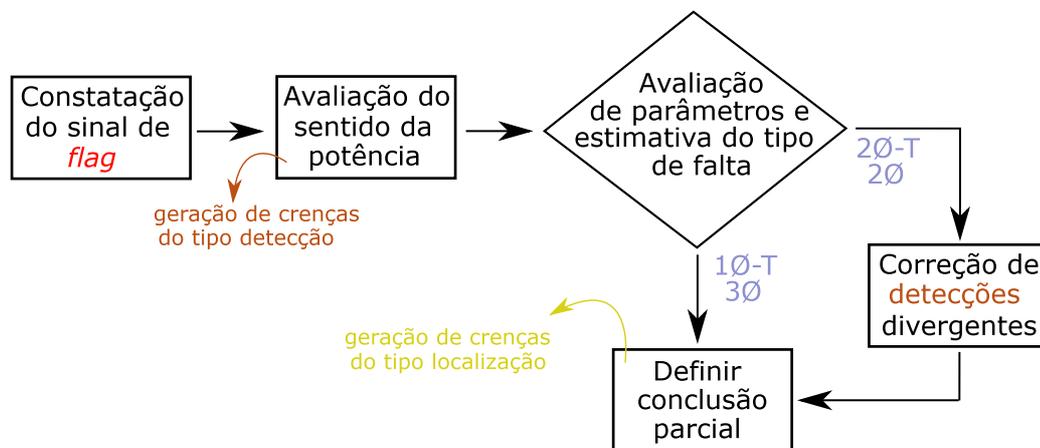
7.5.3.1 Avaliação individual

A etapa da avaliação individual é realizada separadamente por cada agente do SMA, utilizando suas crenças e informações locais obtidas a partir de seus respectivos medidores. O objetivo desta avaliação é obter uma conclusão parcial por fase da posição relativa de uma possível falta, considerando os medidores locais e suas respectivas zonas de proteção. O agente determinará a existência de falta dentro de uma determinada zona como conclusão parcial, se todas as suas análises por fase, para cada zona e para cada medidor, forem concordantes. Sendo assim, é necessária a realização de avaliações intermediárias ao processo de formação da conclusão parcial. O fluxograma da Figura 47 apresenta o funcionamento geral deste processo. As explicações referentes às etapas do fluxograma são apresentadas nas seções seguintes.

7.5.3.1.1 Inicialização e formação das primeiras opiniões

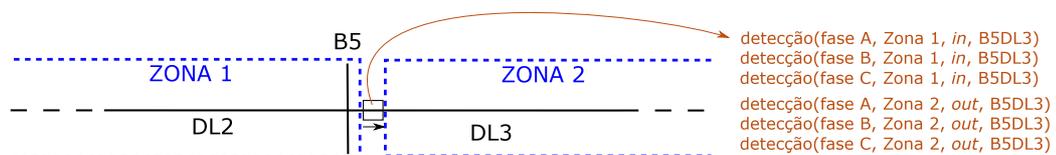
As atividades dos agentes são iniciadas a partir da detecção de um evento na microrrede, sinalizado pelos medidores por meio das propriedades observáveis do tipo *flag*. Assim que notificado, o agente avalia os fluxos de potência dos medidores, utilizando o sinal das medições de potência ativa, as indicações de detecção de *flag*, as informações de topologia e a convenção de polaridade dos medidores estabelecida para este sistema de proteção (apresentada na Seção 7.2.1). Desta avaliação surgem as primeiras opiniões do agente sobre o evento detectado, armazenadas como crenças de tipo “detecção”. Para cada medidor de sua responsabilidade, o agente gera uma crença “detecção” por fase e por zona, conforme apresentado na Figura 48.

Figura 47 – Funcionamento geral do procedimento de formação da conclusão parcial.



Fonte – próprio autor.

Figura 48 – Quantidade de crenças “detecção” para um medidor associado à duas zonas.



Fonte – próprio autor.

Cada uma das crenças "detecção" do agente indicará sua opinião sobre a posição da possível falta com relação à uma determinada zona de proteção. Esta opinião será definida dentre quatro possibilidades: dentro da zona de proteção (*in*), fora da zona de proteção (*out*), opinião neutra (*neutral*) ou dentro da zona de proteção com ressalva (*inL*). No exemplo da Figura 48, a falta poderia estar presente na Zona 1 ou em alguma zona vizinha, situada ao lado oposto ao da Zona 2.

Os fatores utilizados na formação da opinião dos agentes para as crenças “detecção” são apresentados considerando que a etapa de interpretação do sentido do fluxo de potência com relação às zonas de proteção e à polaridade dos medidores já foram realizadas, visto que a posição relativa de cada um desses quesitos gera um enorme número de combinações. Sendo assim, as análises dos fatores apresentados no Quadro 6 levam em consideração que o agente já interpretou se a potência está saindo ou entrando na zona de proteção, restando somente formar sua opinião sobre a posição da possível falta. É importante lembrar que os medidores posicionados em linhas de distribuição fazem parte de, no máximo, duas zonas. Levando-se em consi-

deração a exigência de posicionamento de medidores apresentada na Seção 7.2.1, as zonas relacionadas a um medidor estarão sempre posicionadas uma à jusante e outra à montante ao medidor referenciado.

As opiniões apresentadas no Quadro 6 são formadas a partir das informações contidas em suas 4 primeiras colunas. A primeira coluna indica a posição do medidor que está fornecendo as informações para análise. Se o medidor estiver posicionado em uma linha, assim como no exemplo da Figura 48, as circunstâncias deverão ser avaliadas conforme as circunstâncias associadas ao posicionamento em linhas, e assim por diante. A segunda coluna indica o resultado da avaliação do agente com relação à direção do fluxo de potência. Seguindo-se o exemplo da Figura 48 novamente, nota-se que é necessário levar em consideração este fator pois a potência pode estar entrando ou saindo na zona avaliada, e a formação da crença “detecção” é realizada por fase e por zona, para um mesmo medidor. Sendo assim, as informações contidas nesta coluna indicarão se a potência está entrando ou saindo da zona avaliada, e qual a posição desta zona com relação ao medidor.

Quadro 6 – Fatores utilizados para formação das crenças “detecção”.

Elemento	Sentido (zona)	Flag ($P_{-20\%}$)	Sentido (P_{pre})	Opinião
Linha	Entrando (à jusante)	Não	irrelevante	<i>in</i>
	Entrando (à jusante)	Sim	Entrando	<i>out</i>
	Saindo (à jusante)	irrelevante	irrelevante	<i>out</i>
	Entrando (à montante)	irrelevante	irrelevante	<i>in</i>
	Saindo (à montante)	Sim	Saindo	<i>in</i>
	Saindo (à montante)	Não	irrelevante	<i>out</i>
	Sem fluxo	irrelevante	irrelevante	<i>neutral</i>
Gerador	Entrando	irrelevante	irrelevante	<i>in</i>
	Saindo	irrelevante	irrelevante	<i>out</i>
	Sem fluxo	irrelevante	irrelevante	<i>neutral</i>
Carga	Entrando	Sim	irrelevante	<i>inL</i>
	Saindo	irrelevante	irrelevante	<i>out</i>
	Sem fluxo	irrelevante	irrelevante	<i>neutral</i>

Fonte – próprio autor.

As variáveis presentes nas duas colunas restantes funcionam como indicadores de alguns comportamentos da rede. O decaimento repentino do valor de medição da potência ($P_{-20\%}$) pode, ou não, indicar se a falta está localizada na direção em que a potência está fluindo. Tomando como exemplo a segunda linha de condições do Quadro 6 para linhas de distribuição, inicialmente a opinião do agente parece contraditória ao sentido da potência. Observa-se que, com a potência entrando na

zona à jusante, existindo decaimento de potência e com o sentido da potência de operação normal (P_{pre}) de entrada, o agente forma a opinião *out*. Isto ocorre pois o agente espera que não haja redução de entrada de potência em sua zona de proteção em situação de contingência.

Um outra situação aparentemente contraditória é formada pelas circunstâncias da quinta linha de condições do Quadro 6 para linhas de distribuição. Nesta situação, potência ativa é identificada saindo da zona de proteção à montante, porém o agente forma a opinião *in*. Neste contexto, o agente interpreta que, se o sentido de potência de operação normal era de saída, então o ramo da microrrede nesta direção era predominantemente composto por cargas, portanto, o decaimento de fluxo de potência ativa indica que a falta não está localizada nesta direção.

As análises de condições para geradores e cargas são substancialmente mais simples pois os medidores destes elementos fazem parte somente de uma zona de proteção e a interpretação do comportamento dos fluxos de potência nestes dois casos é mais simples de ser realizada. No entanto, a formação de opinião a respeito de uma das condições referentes à cargas oferece grau menor de confiabilidade, já que os indicadores respondem igualmente para faltas dentro e fora da zona de proteção. Sendo assim, o agente atribui a opinião *inL* para ser considerada em análise posterior, em complemento à outras informações sobre o evento detectado.

7.5.3.1.2 Estimativa do tipo de falta

Conforme discutido na Seção 7.1.2, a determinação da existência de falta pelo método proposto neste trabalho requer a realização de análises levando-se em consideração o tipo de falta responsável pela situação de contingência. Sendo assim, logo após a etapa de criação das crenças “detecção”, o agente realiza uma constatação do tipo de falta por meio da identificação de padrões nas informações dos parâmetros disponibilizadas pelos seus medidores. As circunstâncias que levam o agente à conclusão do processo de deliberação à respeito do tipo de falta são apresentados no Quadro 7. A determinação do tipo de falta será feita entre duas classificações: falta trifásica/monofásica e falta bifásica/bifásica à terra. Isto é possível pois as análises propostas são somente duas, uma para cada classificação de tipo de falta.

O procedimento de análise do tipo de falta baseia-se no número de fases que apresentaram sinal de *flag* para tensão e impedância, considerando todos os medidores que o agente é responsável. Se o número máximo de fases com sinal de *flag* é 1, a etapa de detecção de padrões nos parâmetros automaticamente classifica a falta como monofásica. Caso o número de fases com sinal de *flag* seja maior do que 1, a avaliação é realizada para cada um dos medidores com base em seus respectivos parâmetros. Se a conclusão de pelo menos uma das avaliações dos medidores for

de ocorrência de falta bifásica ou bifásica à terra, a realização da etapa seguinte de correção de crenças “detecção” é realizada somente para as duas fases identificadas.

Quadro 7 – Regras utilizados para determinação do tipo de falta.

Regra	Determinação
Afundamento de tensão (abaixo de 80% da tensão nominal) em três fases	Falta trifásica/monofásica
Afundamento de tensão (abaixo de 90% da tensão nominal) em uma fase e sobretensão (acima de 110% da tensão nominal) em duas fases	Falta trifásica/monofásica
Afundamento de tensão (abaixo de 90% da tensão nominal) em uma fase e sobretensão (acima de 110% da tensão nominal) em somente uma das duas fases restantes	Falta trifásica/monofásica
Afundamento de tensão (abaixo de 90% da tensão nominal) em duas fases e sobretensão (acima de 110% da tensão nominal) em uma fase	Falta bifásica/bifásica à terra
Afundamento de tensão (abaixo de 90% da tensão nominal) em duas fases e ausência de sobretensão (medição acima de 90% e abaixo de 110% da tensão nominal) na fase restante	Falta bifásica/bifásica à terra
Decaimento de impedância (-60% em 6 ciclos elétricos) em duas fases e medição de impedância menor que 10x impedância de operação normal na fase restante	Falta bifásica/bifásica à terra
Decaimento de impedância (-60% em 6 ciclos elétricos) em uma fase e medição de impedância menor que 10x impedância de operação normal nas fases restantes	Falta trifásica/monofásica
Condições não identificadas nas regras anteriores	Falta trifásica/monofásica

Fonte – próprio autor.

7.5.3.1.3 Correção de crenças divergentes

Se a determinação do tipo de falta for de falta bifásica ou bifásica à terra, faz-se necessário realizar uma verificação das crenças do tipo “detecção” estabelecidas inicialmente conforme procedimentos apresentados na Seção 7.5.3.1.1. Isso ocorre devido ao comportamento de faltas que envolvem somente duas fases da microrrede, conforme discutido na Seção 7.1.2.

Devido ao fato de que o agente cria as crenças do tipo “detecção” baseando-se somente em informações isoladas sobre cada fase, a conexão entre duas fases pode fazer com que o agente forme uma opinião equivocada sobre a localização da possível falta nesta circunstância. Isto acontece, pois, a ocorrência de faltas de baixa impedância envolvendo duas fases pode acarretar na circulação de fluxo de potência em sentidos opostos entre as duas fases em situação de falta, fazendo com o que o agente opine sobre a localização da falta de maneira equivocada para uma destas fases. Sendo assim, o agente identifica as crenças “detecção” às quais ele atribuiu opiniões divergentes para as fases em questão, e atualiza uma delas seguindo a mesma opinião da que tiver maior valor de potência ativa na situação de contingência. Este procedimento é realizado considerando-se que parte da potência que entra no nó da falta é dissipada pelas impedâncias de falta (entre fases e falta à terra), além de parte da potência ser destinada ao terra nas situações em que a falta é bifásica-terra.

7.5.3.1.4 Definição de conclusão parcial

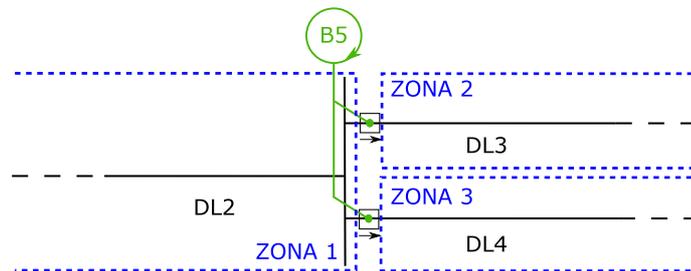
Com todas as crenças do tipo “detecção” devidamente constituídas, o agente passa para a etapa de definição da conclusão parcial, que é composta por crenças do tipo “localização”. Esta conclusão é estabelecida por zonas e por fase, considerando todas as crenças do tipo “detecção” relacionadas. Conforme mencionado no início desta seção, o agente definirá a existência de falta em sua conclusão parcial quando todas as crenças “detecção” de uma determinada fase, em uma determinada zona, forem concordantes neste sentido. Na Figura 49 é ilustrado um exemplo para facilitar a compreensão.

Na imagem, observa-se que o agente B5 monitora os medidores B5DL3 e B5DL4, e faz parte das zonas 1, 2 e 3. Neste exemplo, considera-se que a potência flui, nas três fases, das linhas DL3 e DL4 para a linha DL2.

Ocultando-se o diagrama unifilar e evidenciando-se o sentido dos fluxos de potência por fase, obtém-se a representação gráfica apresentada na Figura 50.

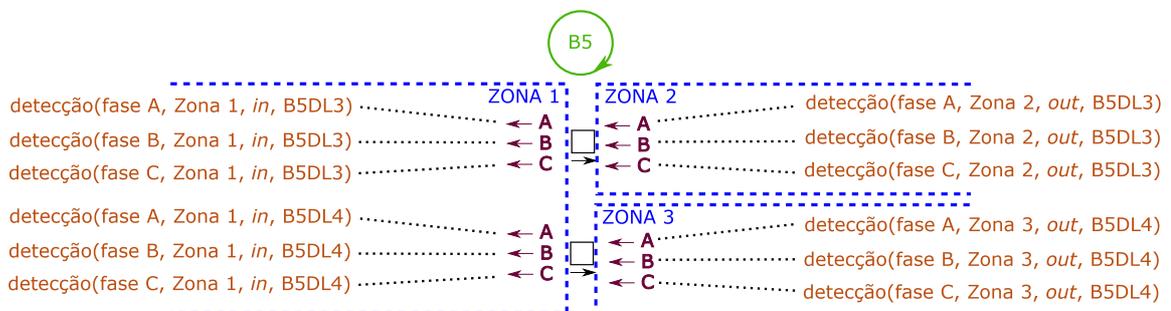
Nesta figura, o agente constata que existe um fluxo de saída para as fases A, B e C nas zonas 2 e 3, e um fluxo de entrada para as fases A, B e C na Zona 1, representados pelas setas na cor roxa. As crenças “detecção” formadas para cada uma das avaliações do sentido da potência estão devidamente indicadas na figura. A

Figura 49 – Exemplo de circunstância inicial para definição de conclusão final.



Fonte – próprio autor.

Figura 50 – Perspectiva do agente e formação de opiniões.



Fonte – próprio autor.

conclusão parcial do agente é definida com base nestas crenças, para cada uma das zonas, seguindo-se as regras apresentadas no Quadro 8.

As regras apresentadas no Quadro 8 são de simples interpretação, uma vez que levam em consideração somente as opiniões de posicionamento com relação à zona de proteção. As condições apresentadas na coluna da esquerda são obtidas das crenças do tipo “detecção”, e a determinação é utilizada para formação das crenças do tipo “localização” (conclusão parcial). Pelas informações apresentadas na tabela, nota-se que, se existir pelo menos uma opinião *out* dentre as opiniões avaliadas, a localização da falta é dada como externa à zona, pois, conforme mencionado no início desta seção, todas as crenças do tipo “detecção” devem ser concordantes para constatar a existência de falta interna à zona de proteção como conclusão parcial. A presença de opinião *in* é válida em outras combinações na ausência de *out*, pois as demais opiniões não implicam em certeza de posicionamento de falta externo à zona de proteção como a opinião *out*. As opiniões *inL* e *neutral* não possuem poder de decisão por si só, por isso, se não há presença de opiniões *in* ou *out* no mesmo grupo de crenças “detecção” avaliado, a determinação para a crença “localização” é *neutral*.

Em complemento às opiniões das crenças "detecção", o agente realiza uma rápida análise de topologia para verificar a condição *closed_zone*. Esta análise consiste em averiguar se a zona de proteção em questão está posicionada em uma extremidade dos ramos da microrrede. O agente avalia a topologia, a posição dos medidores e os agentes que fazem parte de sua zona, e determina então se esta é classificada como *closed_zone* ou não. Esta informação é útil para a situação em que o agente identifica crença "detecção" com opinião *neutral* em um medidor de linha de distribuição. Neste caso, conforme apresentado no Quadro 8, o agente determina que a falta é externa a zona de proteção, pois espera-se que uma falta interna provoque fluxo de potência entrando pelo único medidor de linha de distribuição que faz parte desta zona.

Quadro 8 – Regras para determinação das crenças do tipo "localização".

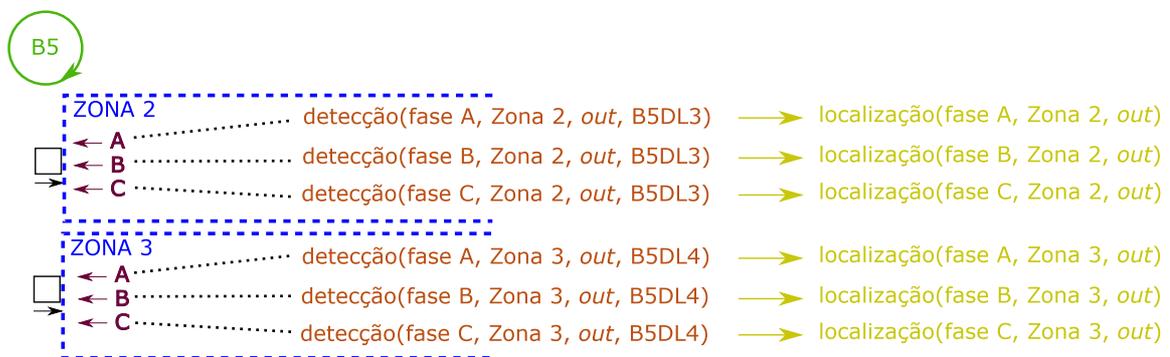
Regra	Determinação
Presença de <i>out</i>	<i>out</i>
Presença de <i>in</i> , ausência de <i>out</i> , ausência de <i>inL</i>	<i>in</i>
Presença de <i>in</i> , presença de <i>inL</i> , ausência de <i>neutral</i> , ausência de <i>out</i>	<i>in</i>
Presença de <i>neutral</i> , ausência de <i>in</i> ausência de <i>inL</i> , ausência de <i>out</i> e existência da condição <i>closed_zone</i>	<i>out</i>
Presença de <i>inL</i> , ausência de <i>in</i> , ausência de <i>neutral</i> , ausência de <i>out</i>	<i>neutral</i>
Presença de <i>in</i> , presença de <i>inL</i> , presença de <i>neutral</i> , ausência de <i>out</i>	<i>in</i>
Presença de <i>inL</i> , presença de <i>neutral</i> , ausência de <i>in</i> , ausência de <i>out</i>	<i>neutral</i>
Presença de <i>neutral</i> , ausência de <i>in</i> , ausência de <i>inL</i> , ausência de <i>out</i>	<i>neutral</i>

Fonte – próprio autor.

Com base nas informações apresentadas no Quadro 8, nota-se que, para as zonas 2 e 3 do exemplo tomado, a deliberação se torna simples pois só há um medidor associado à cada uma delas. Portanto, o agente determina as crenças do tipo "localização" conforme ilustrado na Figura 51.

A formação das crenças referentes à Zona 1, por sua vez, é realizada de acordo com a ilustração da Figura 52. Como, neste caso, as opiniões das crenças de "detecção" são iguais para as três fases, obtém-se as crenças do tipo "localização" indicando existência de falta na Zona 1. Assim que uma crença do tipo "localização" é criada,

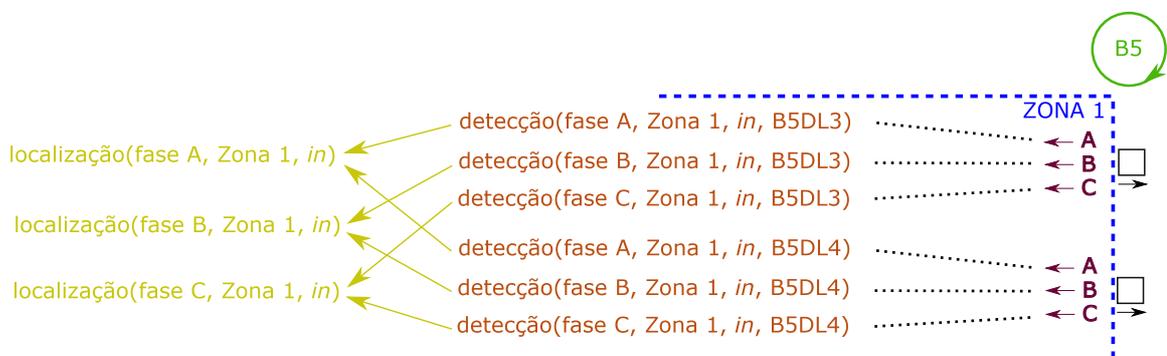
Figura 51 – Formação de conclusão parcial para as zonas 2 e 3.



Fonte – próprio autor.

ela é imediatamente enviada para o agente que desempenha o papel de *leader* no grupo associado, para a realização da etapa de avaliação coletiva. Supondo como exemplo que os agentes B1, B2 e B3 fazem parte de uma determinada Zona 7, o fluxo de mensagens pode ser representado pela ilustração da Figura 53. Para cada crença “localização” criada, uma mensagem é enviada.

Figura 52 – Formação de conclusão parcial para a Zona 1.

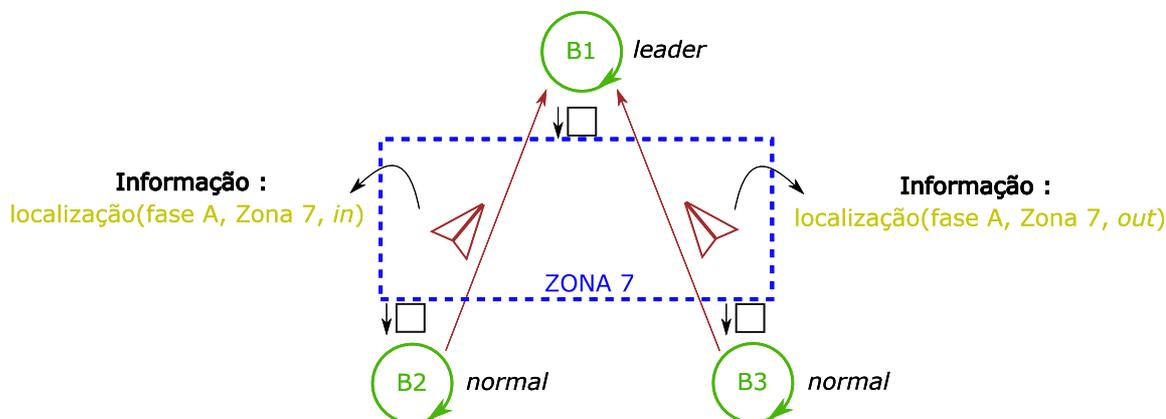


Fonte – próprio autor.

7.5.3.2 Avaliação coletiva

Com as opiniões parciais de cada agente do grupo reunidas, resta ao agente que desempenha o papel *leader* realizar a deliberação final sobre a existência de falta. Esta deliberação ocorre para cada zona e para cada fase, e é realizada por meio da análise das crenças do tipo “localização”. A existência de falta será determinada como interna à uma zona de proteção quando todas as opiniões contidas nas crenças “localização” forem concordantes neste sentido, para cada uma das fases separadamente. A

Figura 53 – Exemplo de fluxo de mensagens entre agentes do mesmo grupo após determinação da conclusão parcial.



Fonte – próprio autor.

concordância entre estas opiniões será dada pelas regras apresentadas no Quadro 9. Nesta etapa da avaliação, as opiniões *neutral* são desconsideradas, por não afetarem o resultado da determinação final.

Quadro 9 – Regras para conclusão final da análise de eventos.

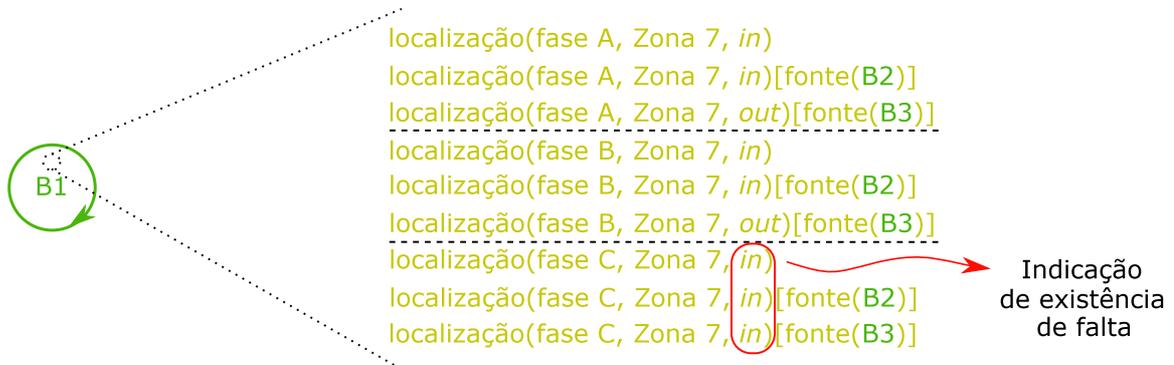
Regra	Conclusão
Presença de <i>out</i>	Inexistência de falta
Presença de <i>in</i> , ausência de <i>out</i>	Existência de falta

Fonte – próprio autor.

Ainda levando-se em consideração o exemplo da Figura 53, uma situação hipotética do estado da base de crenças do agente B1 no momento da deliberação da conclusão final pode ser exemplificada pela ilustração da Figura 54.

Na Figura 54 é possível observar que todas as crenças que determinarão a conclusão final reunidas. A informação entre colchetes ao lado de cada crença indica o remetente da mensagem. As crenças que não possuem colchetes foram criadas pelo próprio agente B1. Nota-se que para as fases A e B, a opinião do agente B3 foi discordante com as opiniões dos demais, enquanto que para a fase C, todos possuem a mesma opinião. Sendo assim, como resultado da aplicação das regras do Quadro 9, o agente interpreta o conjunto de crenças e determina a existência de falta na Zona 7.

Figura 54 – Exemplo de informações da base de crença do agente para formação da conclusão final.



Fonte – próprio autor.

7.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema de proteção proposto tem como objetivo desempenhar a função de proteção de microrredes de maneira descentralizada, explorando os recursos oferecidos pela programação lógica orientada à agentes. A representação de fatos relacionados ao sistema elétrico por meio das noções mentalísticas proporcionadas pelo uso da arquitetura BDI, possibilitam a realização de interpretações de sistemas complexos por meio de informações elementares relacionadas à seus eventos. Apesar da dinâmica de funcionamento da aplicação em questão requerer, principalmente, interatividade reativa para cumprir com o objetivo principal de proteger a microrrede em situação de contingência, a metodologia proposta busca explorar as vantagens provenientes do antropomorfismo e das propriedades de nível social oferecidas pelas ferramentas utilizadas, mediante realização de análises em momentos não críticos da operação da microrrede.

A utilização de comunicação entre agentes é fundamental para o funcionamento do sistema de proteção proposto, uma vez que o raciocínio lógico dos agentes utilizando somente informações de parâmetros aferidos localmente na microrrede não possibilita a identificação da natureza do evento avaliado. No entanto, a estratégia do uso de opiniões dos agentes permite que as mensagens possuam estrutura de dados reduzida, viabilizando o uso de técnicas de comunicação alternativas aos modelos e protocolos apresentados na Seção 5.3. Ademais, a versatilidade que os recursos da programação lógica orientada à agentes oferece, permite ao sistema de proteção alcançar alto grau de flexibilidade, sendo capaz de se adaptar autonomamente à diferentes microrredes por meio de análises de topologia a partir de um único arquivo simples de entrada de dados.

Os resultados apresentados no Capítulo 8 visam mensurar a eficácia da metodologia proposta e identificar as vantagens e desvantagens em seu uso, com relação à finalidade designada neste trabalho.

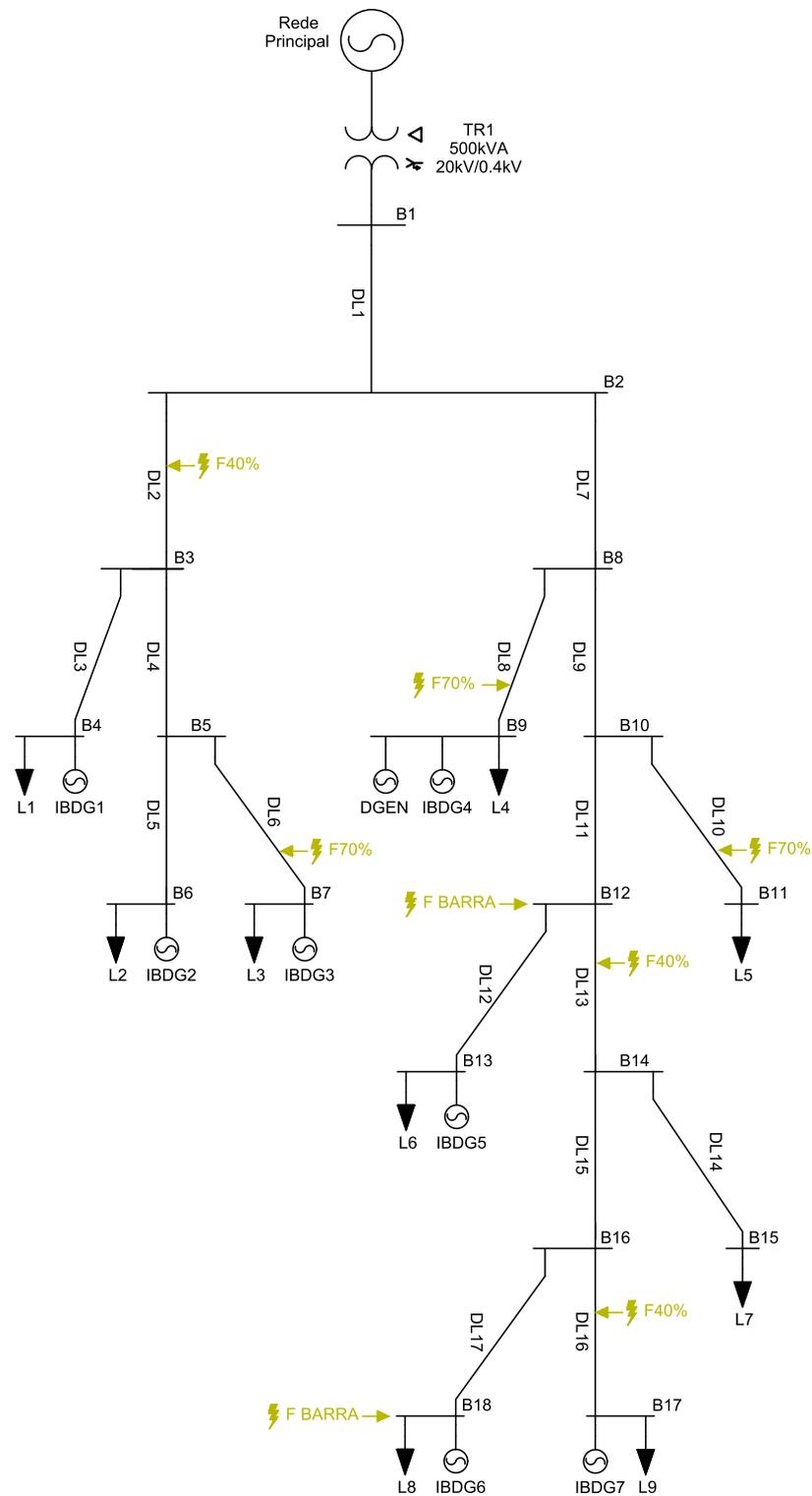
8 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da atuação do SMA proposto para diferentes locais de falta nas duas microrredes modeladas. Foram simulados 8 locais de falta em cada microrrede, considerando os modos de operação ilhado e conectado à rede principal. Para cada local de falta, foram feitas simulações para os tipos de falta AG, AB, ABG e ABCG, e também para impedâncias de falta com valores de $0,01 \Omega$, $0,1 \Omega$, 1Ω , 10Ω e 50Ω . As simulações do SMA foram realizadas para todos os cenários resultantes das combinações de condições mencionadas, considerando duas configurações de posicionamento de medidores para cada cenário de operação de cada microrrede (configurações apresentadas na Seção 7.2.1, no Capítulo 7). Além disto, a Microrrede 1 foi simulada considerando ainda dois cenários de geração por parte das IBDGs Modelo 1. Sendo assim, um dos cenários propostos para a Microrrede 1 terá geração de energia de suas IBDGs Modelo 1 em 100% de sua capacidade de geração, enquanto que o outro cenário terá geração de energia de suas IBDGs Modelo 1 em 30% de sua capacidade máxima de geração. Todos os valores de geração são apresentados no Apêndice A. Desta forma, foram realizadas, no total, 1536 simulações da atuação do SMA, sendo 1024 na Microrrede 1, divididas igualmente entre os dois cenários de geração propostos, e 512 na Microrrede 2.

As localizações das faltas para cada uma das microrredes são ilustradas nas figuras 55 e 56. Os indicadores em amarelo especificam o elemento em que a falta é aplicada. Para as faltas em linhas de distribuição, o percentual do comprimento da linha que representa o local da incidência da falta é indicado considerando-se sempre como referência a distância da barra conectada à este elemento mais próxima ao PCC. Os resultados apresentados nas tabelas das seções 8.2, 8.3 e 8.4 seguem os seguintes critérios de classificação:

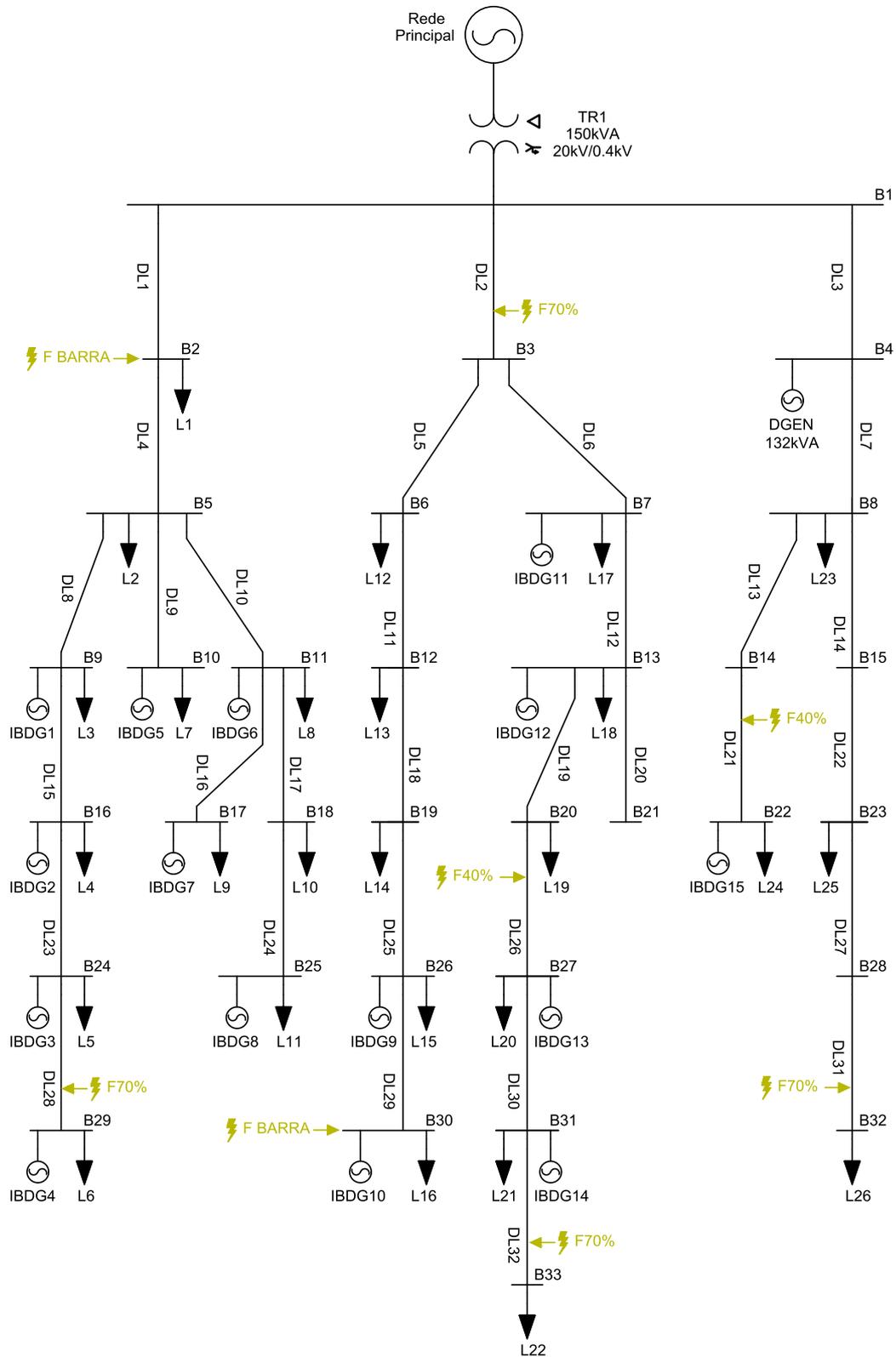
- a) Determinações Corretas (DC): são computados os casos em que a determinação do SMA coincide com a zona da falta aplicada;
- b) Não Detecção de Eventos (NDE): são computados os casos em que não houve detecção de evento;
- c) Determinação Multi-Zonas (DMZ): são computados os casos em que há identificação da zona correta e uma ou mais zonas;
- d) Não Determinação de Falta (NDF): são computados os casos em que há detecção de evento e não há identificação da existência de falta;
- e) Determinação de Zona Incorreta (DZI): são computados os casos em que há identificação de uma ou mais zonas incorretas, sem identificação da zona de ocorrência da falta;
- f) Número Total (NT): são computados todos os casos simulados.

Figura 55 – Locais de falta simulados na Microrrede 1.



Fonte – próprio autor.

Figura 56 – Locais de falta simulados na Microrrede 2.



Fonte – próprio autor.

8.1 DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO DA ATUAÇÃO DO SMA

Nesta seção é apresentada a dinâmica de funcionamento da atuação do SMA para uma falta do tipo AB localizada à 40% da DL2 na Microrrede 1, em modo conectado à rede principal, com valores de geração das IBDGs Modelo 1 em 30% de sua capacidade máxima, conforme apresentado na Tabela 18 (Apêndice A), e configuração 2 de posicionamento de medidores.

Com base na indicação de formação de zonas apresentada no diagrama da Figura 57 (Figura 34 reinserida nesta seção para facilitar a leitura), verifica-se que a falta está situada na Zona 2 e que os agentes responsáveis pela identificação de falta nesta zona são os agentes B2, B3 e B4. Estes agentes desempenham os papéis de *normal*, *normal* e *leader*, respectivamente. Sendo assim, a explicação da atuação do SMA será realizada com foco nos referidos agentes e na Zona 2, com o intuito de prover clareza no detalhamento e concisão na elucidação dos mecanismos de funcionamento do SMA.

Conforme descrito no Capítulo 7, a primeira etapa dos procedimentos para determinação da existência de uma falta é a etapa de detecção de eventos, sinalizada pela atualização nas propriedades observáveis dos medidores do sistema. O Quadro 10 apresenta o nome dos medidores da Zona 2 e seus respectivos agentes responsáveis.

Quadro 10 – Agentes e seus respectivos medidores da Zona 2.

Agente	Medidores
B2	B2DL2
B3	B3DL4
B4	B4L1 e B4IBDG1

Fonte – próprio autor.

Após a atualização das propriedades observáveis dos medidores, as informações disponíveis para serem interpretadas pelo agente B2 são as apresentadas pela ilustração do medidor B2DL2, na Figura 58.

Observa-se nesta figura a indicação de *flag* para as fases A e B, tanto para parâmetros de tensão quanto para parâmetros de impedância. Nota-se também que os valores das medições de tensão e impedância são concordantes com os sinais de *flag* observados. Para facilitar a compreensão, a Figura 58 ilustra também a representação da posição relativa do medidor com relação à Zona 2, conforme distribuição de medidores estabelecida no Capítulo 7. Utilizando a convenção de polaridade dos medidores e considerando a posição relativa do medidor B2DL2, o agente B2 interpreta a medição de potência de sinal positivo na fase A, em situação de contingência, como fluxo de entrada na Zona 2. Em conformidade com esta lógica de interpretação, o agente B2 interpreta os valores de potência negativos das fases B e C, como fluxo de saída de

potência da Zona 2.

Com base nestas informações, o agente forma as primeiras opiniões à respeito do evento referente à Zona 2, e as armazena como crenças de predicado “detecção”. As opiniões desta etapa são formadas para cada medidor do agente, somente para as fases com sinalização de *flag*, conforme apresentado no Quadro 11.

Quadro 11 – Crenças das primeiras opiniões do agente B2 sobre o evento.

Agente	Crenças “detecção” geradas
B2	detecção(fase A, Zona 2, <i>in</i> , B2DL2)
	detecção(fase B, Zona 2, <i>out</i> , B2DL2)

Fonte – próprio autor.

De maneira análoga, as informações disponíveis após a detecção do evento para o agente B3, são apresentadas na ilustração do medidor B3DL4, na Figura 59. Neste caso, observa-se acusação de afundamento de tensão para as fases A e B, e indicação de *flag* de impedância somente para a fase B. Este fato é irrelevante para as interpretações do agente, haja vista que as *flags* de detecção funcionam de maneira complementar. Nota-se que, para a posição relativa do medidor em questão, o sinal positivo na medição de potência indica fluxo saindo da zona avaliada. Sendo assim, o fluxo de potência para as 3 fases, em operação normal, fluía no sentido de entrada na Zona 2, e, após a ocorrência da falta, somente o fluxo da fase A passou a sair da referida zona. A partir do conjunto de informações disponibilizado neste medidor, o agente B3 interpreta os sinais das medidas em situação de contingência de acordo com a convenção de polaridade dos medidores e forma suas opiniões sobre o evento, referentes à Zona 2. As opiniões formadas pelo agente B3 são representadas pelas crenças dispostas no Quadro 12.

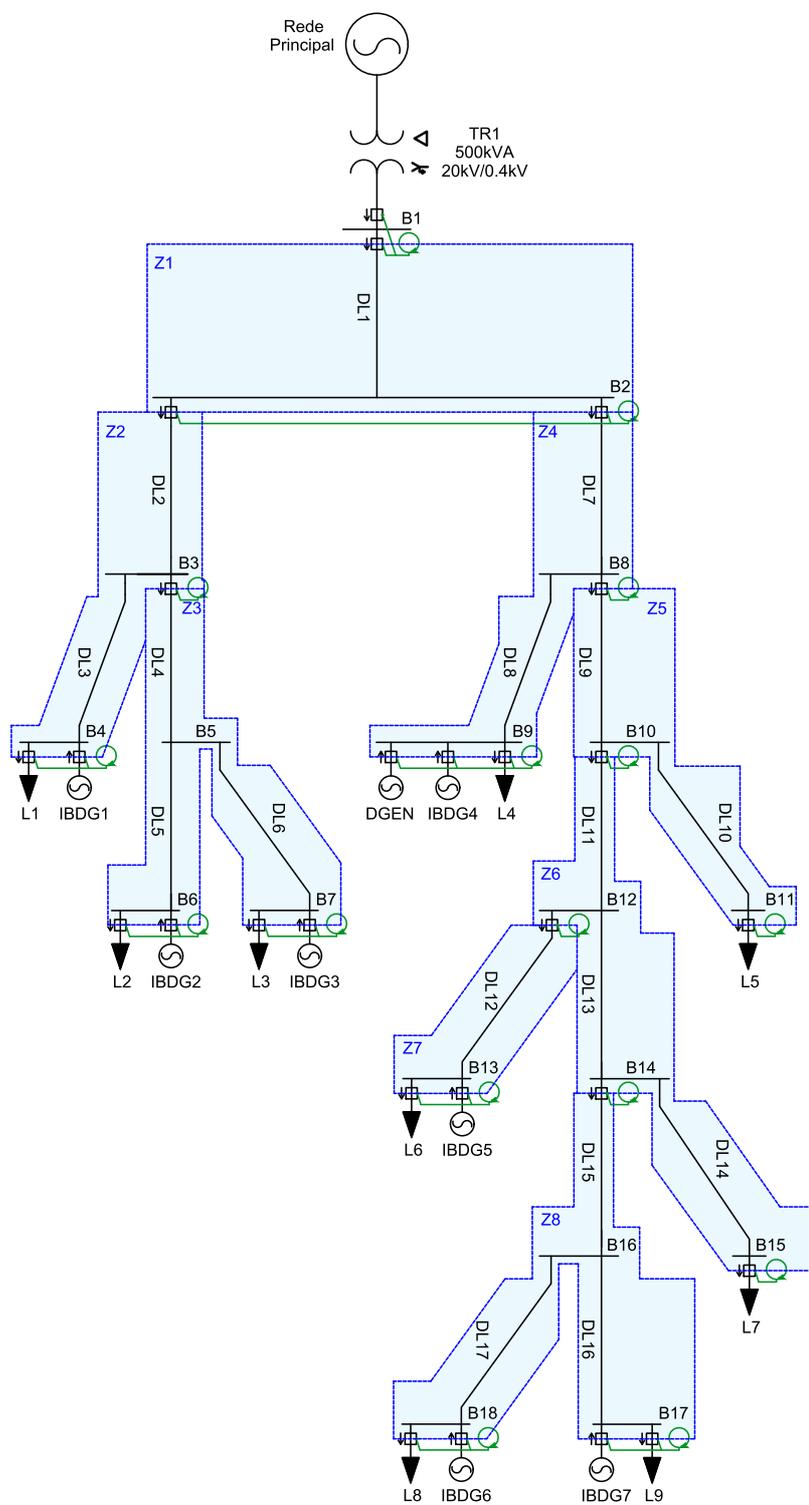
Diferentemente dos agentes B2 e B3, o agente B4 possui dois medidores. As informações disponíveis para o agente B4, após a atualização das propriedades observáveis, são apresentadas na Figura 60 e na Figura 61.

Quadro 12 – Crenças das primeiras opiniões do agente B3 sobre o evento.

Agente	Crenças “detecção” geradas
B3	detecção(fase A, Zona 2, <i>out</i> , B3DL4)
	detecção(fase B, Zona 2, <i>in</i> , B3DL4)

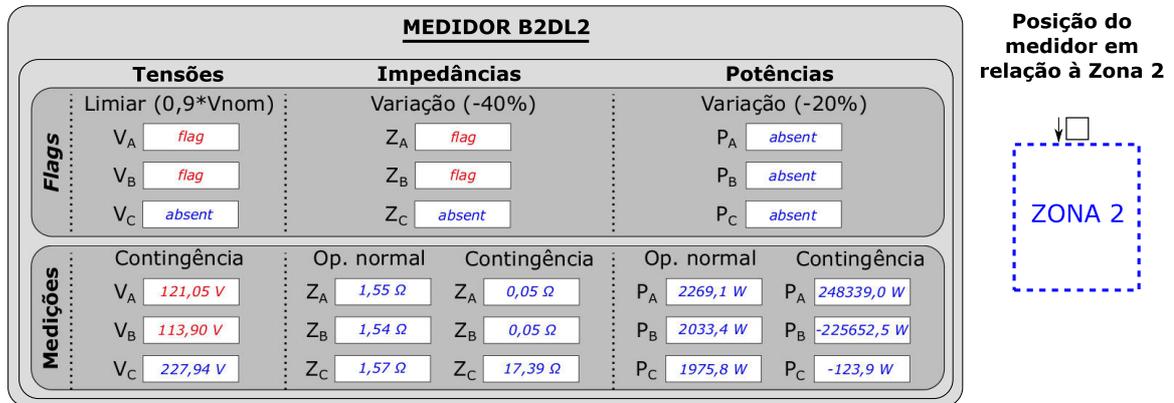
Fonte – próprio autor.

Figura 57 – Microrrede 1, configuração 2.



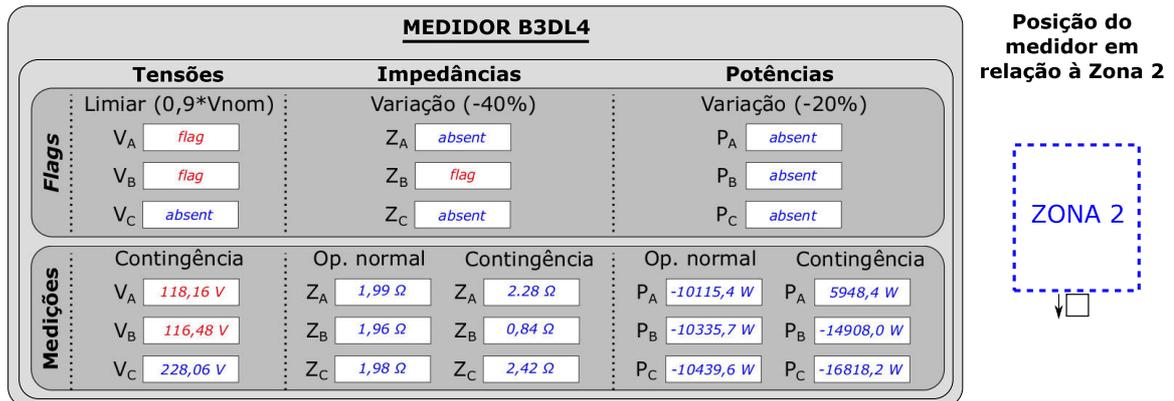
Fonte – próprio autor.

Figura 58 – Artefato medidor B2DL2 após atualização de propriedades observáveis.



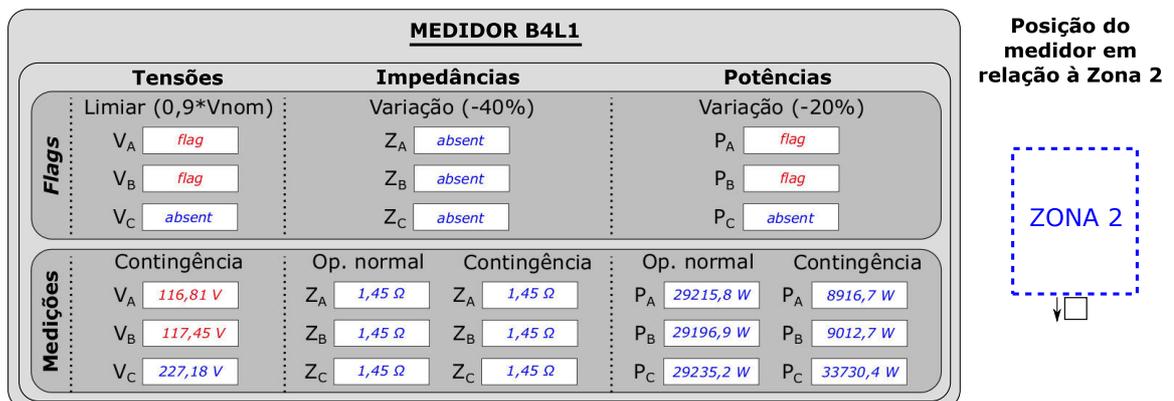
Fonte – próprio autor.

Figura 59 – Artefato medidor B3DL4 após atualização de propriedades observáveis.



Fonte – próprio autor.

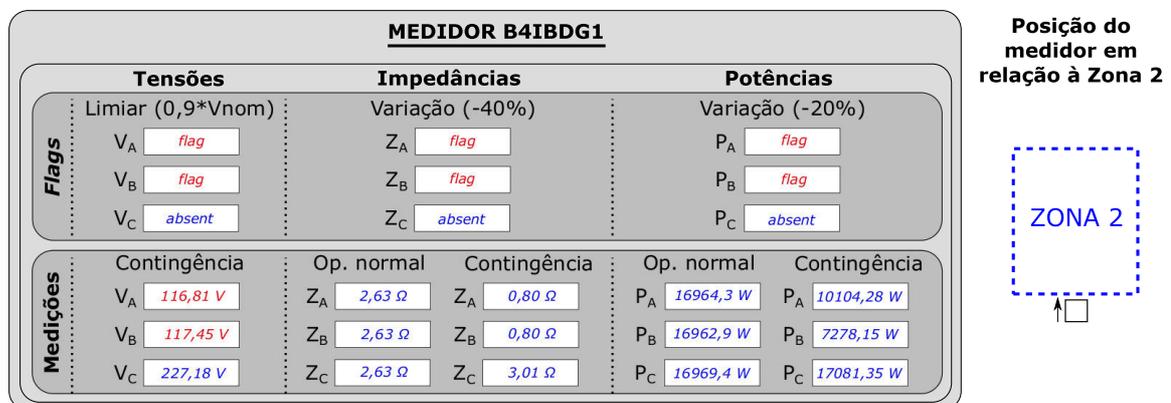
Figura 60 – Artefato medidor B4L1 após atualização de propriedades observáveis.



Fonte – próprio autor.

No medidor B4L1, além das *flags* de tensão, observa-se também a indicação de variação negativa da potência nas fases A e B. Por ser um medidor posicionado em um ramo de carga, as impedâncias não sofrem alterações. Seguindo-se as regras de interpretação apresentadas no Quadro 6 (Capítulo 7), o agente B4 forma suas opiniões à respeito das fases A e B deste medidor, apresentadas no Quadro 13. Nota-se que, apesar do sinal da medição de potência e da convenção de polaridade dos medidores indicarem fluxo de potência saindo da Zona 2, a opinião inicial formada pelo agente indica falta dentro da zona de proteção, com ressalva (*inL*). Esta interpretação é realizada de acordo com os princípios apresentados na Seção 7.1.

Figura 61 – Artefato medidor B4IBDG1 após atualização de propriedades observáveis.



Fonte – próprio autor.

O medidor B4IBDG1, por sua vez, está posicionado em um ramo de geração. Além das *flags* de tensão e impedância, observa-se também a acusação de variação negativa de potência. Conforme regras de interpretação apresentadas no Quadro 6 (Capítulo 7), o agente B4 forma as opiniões apresentadas no Quadro 13, referente à cada um de seus medidores.

Quadro 13 – Crenças das primeiras opiniões do agente B4 sobre o evento.

Agente	Crenças “detecção” geradas
B4	detecção(fase A, Zona 2, <i>in</i> , B4IBDG1)
	detecção(fase B, Zona 2, <i>in</i> , B4IBDG1)
	detecção(fase A, Zona 2, <i>inL</i> , B4L1)
	detecção(fase B, Zona 2, <i>inL</i> , B4L1)

Fonte – próprio autor.

Seguindo os procedimentos do fluxograma apresentado na Figura 47 (Capítulo 7), após criação das crenças do tipo “detecção”, os agentes realizam a avaliação dos parâmetros para estimativa do tipo de falta. Essa avaliação também é realizada

com base nas informações oferecidas pelos medidores, conforme apresentado anteriormente nas figuras 58, 59, 60 e 61. A avaliação dessas informações é realizada por meio das regras apresentadas no Quadro 7 (Capítulo 7). O resultado da estimativa do tipo de falta feita por cada um dos agentes da Zona 2 são apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14 – Estimativa de tipo de falta de cada agente da Zona 2.

Agente	Estimativa de tipo de falta
B2	bifásica/bifásica-terra
B3	bifásica/bifásica-terra
B4	bifásica/bifásica-terra

Fonte – próprio autor.

A estimativa de um tipo de falta que envolve duas fases do sistema conduz a análise para a etapa de correção de crenças "detecção" divergentes, como pode ser visto no fluxograma da Figura 47 (Capítulo 7). Nesta etapa, o agente avalia as opiniões contidas nas crenças do tipo "detecção" e, se necessário, as atualiza. Observando-se as crenças apresentadas nos quadros 11, 12 e 13, nota-se que somente os agentes B2 e B3 tiveram opiniões divergentes dentre suas próprias crenças. O agente B2 verifica no medidor B2DL2 que, em situação de contingência, a medição de potência em módulo na fase A é maior do que a medição de potência em módulo na fase B. Desta forma, a opinião de sua crença "detecção" da fase B é atualizada para a mesma opinião da crença da fase A, conforme apresentado no Quadro 15.

Quadro 15 – Atualização de opiniões das crenças do agente B2.

Agente	Crenças "detecção" geradas
B2	detecção(fase A, Zona 2, in, B2DL2)
	detecção(fase B, Zona 2, in, B2DL2)

Fonte – próprio autor.

Similarmente, o agente B3 identifica no medidor B3DL4 que a medição de potência em módulo na fase A é menor do que a medição de potência em módulo na fase B, considerando as medições de situação de contingência. Sendo assim, a opinião de sua crença "detecção" na fase A é atualizada para a mesma opinião da crença da fase B, conforme apresentado no Quadro 16. As opiniões do agente B4 não são alteradas nesta etapa pois são concordantes entre si.

Em continuação aos procedimentos de análise individual do evento, os agentes avaliam as crenças de predicado "detecção" atualizadas, a fim de determinar a conclusão parcial sobre o evento, composta pelas crenças de predicado "localização". Esta avaliação é realizada de acordo com as regras apresentadas no Quadro 8 (Capítulo 7), e são realizadas por fase. Sendo assim, os agentes finalizam esta avaliação com uma

Quadro 16 – Atualização de opiniões das crenças do agente B3.

Agente	Crenças “detecção” geradas
B2	detecção(fase A, Zona 2, <i>in</i> , B3DL4)
	detecção(fase B, Zona 2, <i>in</i> , B3DL4)

Fonte – próprio autor.

crença “localização” para cada fase em que houve detecção de evento, para cada zona à qual o agente faz parte. Conforme mencionado no início da seção, são apresentadas somente as crenças relacionadas à Zona 2 para assegurar clareza na explanação.

A formação das crenças “localização” para o agente B4 é dado pela combinação das opiniões das crenças “detecção” de cada fase. Neste caso, a combinação de opiniões das duas fases foi a mesma, composta por uma opinião *in* e uma opinião *inL*. De acordo com as regras apresentadas no Quadro 8 (Capítulo 7), esta combinação resulta em crença “localização” com opinião *in*. Os agentes B2 e B3, por sua vez, possuem somente uma crença “detecção” por fase, portanto a aplicação das regras do Quadro 8 (Capítulo 7) para as opiniões únicas mencionadas, resultam na criação das crenças “localização” com opiniões *in*.

Assim que uma crença “localização” é criada, ela é imediatamente enviada pelos agentes que possuem o papel *normal* para o agente que possui o papel *leader*. Todas as crenças “localização” geradas pelos agentes nesta etapa são concentradas na base de crenças do agente B4, e são exibidas em uma organização por fases no Quadro 17.

Quadro 17 – Crenças “localização” concentradas na base de crenças do agente B4.

Fase	Crenças
Fase A	localização(fase A, Zona 2, <i>in</i>)[fonte(B2)]
	localização(fase A, Zona 2, <i>in</i>)[fonte(B3)]
	localização(fase A, Zona 2, <i>in</i>)
Fase B	localização(fase B, Zona 2, <i>in</i>)[fonte(B2)]
	localização(fase B, Zona 2, <i>in</i>)[fonte(B3)]
	localização(fase B, Zona 2, <i>in</i>)

Fonte – próprio autor.

Finalmente, o agente B4 realiza a deliberação final sobre a existência de falta interna à zona de proteção com base nas crenças “localização” referidas. A análise desta etapa de avaliação é realizada por fase, conforme as regras estabelecidas no Quadro 9 (Capítulo 7). Desta forma, a determinação final da deliberação é de falta interna à Zona 2.

Faz-se importante frisar que, todo procedimento descrito na atuação do SMA para determinação da existência de falta dando enfoque somente aos agentes da Zona

2, ocorreu simultaneamente para todas as zonas de proteção da microrrede que obtiveram sinal de detecção de evento em seus agentes. A deliberação da existência de falta em cada uma das zonas de proteção é realizada de maneira totalmente independente, proporcionando um sistema de proteção com funcionamento descentralizado. Para o cenário de falta abordado nesta seção, somente os agentes da Zona 2 chegaram à conclusão de existência de falta, fazendo com que o sistema de proteção atuasse corretamente visando isolar a zona em falta.

8.2 SIMULAÇÕES MICRORREDE 1 - CENÁRIO 1 DE GERAÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do SMA na Microrrede 1 com geração de suas IBDGs Modelo 1 em 30% de suas respectivas capacidades máximas, para as configurações 1 e 2 de posicionamento de medidores.

8.2.1 Configuração 1 de posicionamento de medidores

Conforme mencionado no início deste capítulo, os resultados das simulações são classificados em 5 categorias de avaliação para permitir a realização de uma análise clara sobre o desempenho do SMA. Os resultados são apresentados sob diferentes perspectivas, conforme exposto nas tabelas a seguir.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados gerais e os resultados comparativos do desempenho do SMA para os dois modos de operação da microrrede. A coluna DC mostra a quantidade de casos com determinação correta obtida pelo SMA. Nota-se um percentual de acerto levemente maior para o modo de operação conectado à rede principal. No total, o sistema de proteção proposto acertou suas decisões em 80,1% das simulações realizadas. A metodologia de análise de existência de falta pelo SMA proposto poderia ter um aproveitamento ainda melhor se levarmos em consideração os números apresentados na coluna NDE. Esta coluna indica que em 12,9% dos casos simulados não houve detecção de evento por parte dos medidores, portanto as análises do sentido de fluxos de potência do SMA não foram realizadas.

Tabela 1 – Resultado de simulações na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 1 de geração.

Modo de operação	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Conectado	128	106	82,8	16	12,5	4	3,1	2	1,6	0	0,0
Ilhado	128	99	77,3	17	13,3	0	0,0	7	5,5	5	3,9
Total	256	205	80,1	33	12,9	4	1,6	9	3,5	5	2,0

Fonte – próprio autor.

Os valores presentes na coluna DMZ indicam que, em 4 casos, as detecções de falta foram realizadas em mais de uma zona, incluindo a correta. Em análise indivi-

dual destes casos, verificou-se que oscilações provocadas pela presença das IBDGs Modelo 2 aumentaram o tempo de estabilização da rede, fazendo com que, em alguns casos, o intervalo de espera de 2 ciclos elétricos não fosse suficiente para análise das amostras das medições dos artefatos. A oscilação de valores próximos de zero fez com que os agentes interpretassem sinais de medidas que não representam o sentido correto do fluxo de potência aferido.

Na coluna NDF são apresentados os números de casos em que não houve determinação de existência de falta em nenhuma zona da microrrede, mesmo havendo detecção de evento. Em análise individual de casos, verificou-se que as faltas aplicadas nestes casos não provocaram alterações suficientes para causar a esperada variação negativa de potência em alguns pontos da microrrede. Sendo assim, as combinações de opiniões dos agentes foram divergentes, acarretando na ausência de determinação de existência de falta.

A coluna DZI representa o número de casos em que o SMA determinou a existência de falta em zona incorreta, sem a determinação da zona correta. Os 5 casos computados são decorrentes do mesmo motivo. Os tipos e valores de impedâncias de falta dos casos computados não ocasionaram o comportamento de fluxos de potência esperado para uma determinada região da microrrede. Mesmo com a presença da falta, o fluxo de potência foi capaz de fluir pelo caminho da falta e pelo caminho de saída da zona de proteção, fazendo com que o SMA se equivocasse em sua deliberação.

A causa dos erros de atuação do sistema de proteção proposto podem ser observados também pelos dados apresentados nas tabelas 2 e 3, onde são apresentados casos computados por impedâncias de falta e por tipo de falta.

Tabela 2 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 1 de geração.

Impedância de falta (Ω)	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
0,01	48	48	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
0,1	48	46	95,8	0	0,0	1	2,1	0	0,0	1	2,1
1,0	48	36	75,0	1	2,1	1	2,1	9	18,8	1	2,1
10,0	48	30	62,5	16	33,3	1	2,1	0	0,0	1	2,1
50,0	48	30	62,5	16	33,3	1	2,1	0	0,0	1	2,1
10e ⁶	16	15	93,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	6,2

Fonte – próprio autor.

A Tabela 2 apresenta valores crescentes de impedância de falta, onde 10e⁶ representa as faltas bifásicas por não apresentarem contato com o solo. Observa-se nesta tabela que o número de acertos (DC) decresce à medida que o valor da impedância de falta aumenta, apresentando 100% de acerto para faltas sólidas e 95,8% de acerto para faltas de impedância de 0,1 Ω . Os valores em NDE indicam

que, para valores de impedâncias mais altos, a ocorrência de casos com ausência de detecção de eventos é maior.

Pelos valores apresentados em NDE e NDF, observa-se que impedâncias de falta de $1,0\Omega$, $10,0\Omega$ e $50,0\Omega$ apresentam comportamentos que podem ser atribuídos a faltas de alta impedância, já que não causaram alterações suficientes para detecção de evento e para ocasionamento de variação negativa de potência de 20% no intervalo de 6 ciclos elétricos, conforme estabelecido na metodologia.

Os números apresentados na coluna DZI da Tabela 2 fornecem um pouco mais de detalhes sobre os 5 casos apresentados na Tabela 1. O comportamento observado em análise individual destes casos, de existência de fluxo de potência fluindo pelo caminho da falta e pelo caminho de saída da zona de proteção, é justificado na Tabela 2. Nota-se que o referido comportamento não é observado para faltas de impedância $0,01\Omega$, indicando que os demais valores foram altos suficientes para não acarretar no comportamento de fluxos de potência esperados.

Finalmente, na Tabela 3, são apresentados os casos computados por tipo de falta. Nota-se que os casos com falta do tipo monofásica foram os mais difíceis de serem avaliados pelo SMA, apresentando somente 46,2% de acertos. Isto ocorre, pois, faltas monofásicas causam menos alterações nos parâmetros da microrrede quando comparados com faltas que envolvem mais de uma fase. Conforme pode ser observado, todos os casos de não detecção de eventos e de não determinação de falta, foram casos com aplicação de falta monofásica.

Tabela 3 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 1 de geração.

Tipo de falta	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
AB	16	15	93,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	6,2
ABCG	80	76	95,0	0	0,0	4	5,0	0	0,0	0	0,0
ABG	80	77	96,2	0	0,0	0	0,0	0	0,0	3	3,8
AG	80	37	46,2	33	41,2	0	0,0	9	11,2	1	1,2

Fonte – próprio autor.

8.2.2 Configuração 2 de posicionamento de medidores

Ao contrário do que era esperado, o sistema de proteção proposto apresentou desempenho levemente superior para a configuração 2 de posicionamento de medidores, quando comparado com a configuração 1. A formação de zonas mais amplas, com maior número de medidores e agentes, e, conseqüentemente, necessidade de avaliação de um número maior de variáveis para cada uma das zonas de proteção, sugeriam maior complexidade nos procedimentos de deliberação de existência de falta

do SMA. Contudo, os números apresentados nas tabelas 4, 5, e 6 mostram que o sistema de proteção proposto obteve bons resultados de atuação.

Tabela 4 – Resultado de simulações na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 1 de geração.

Modo de operação	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Conectado	128	108	84,4	16	12,5	0	0,0	4	3,1	0	0,0
Ilhado	128	99	77,3	17	13,3	0	0,0	12	9,4	0	0,0
Total	256	207	80,9	33	12,9	0	0,0	16	6,2	0	0,0

Fonte – próprio autor.

Na Tabela 4, nota-se que não há diferença significativa de atuação entre os dois modos de operação da microrrede, e que o percentual de acerto do sistema de proteção foi de 80,9%. O número de casos computados em que não houve detecção de evento foi o mesmo nas duas configurações de posição de medidores, representando 12,9% dos casos simulados.

A Tabela 4 mostra também que não houve casos de detecção multi-zonas e casos de detecção de zonas incorretas, fato indicado pelos valores presentes nas colunas DMZ e DZI. Esta diferença, em comparação com a configuração 1, é atribuída ao posicionamento e maior número de medidores por zonas de proteção. A distância mais ampla entre medidores fez com que alguns deles fossem menos impactados pela oscilação causada pelas IBDGs Modelo 2, fazendo com que não houvesse casos computados na coluna DMZ como observado nos resultados de simulações da configuração 1. Já os casos de detecção de zonas incorretas passaram a não ocorrer nesta configuração, pois os sentidos dos fluxos de potência puderam ser melhor avaliados com zonas de proteção mais amplas e com mais medidores, fatores que favoreceram a interpretação correta do evento por parte do SMA.

Em contrapartida às melhorias na atuação do SMA provenientes da mudança de posicionamento de medidores, os resultados obtidos para a configuração 2 apresentaram maior número de casos em que não houve determinação de existência de falta. A Tabela 5 mostra que, casos sem determinação de existência de falta ocorreram para todos os valores de impedância de falta, com exceção das faltas bifásicas. Para todos estes casos, a incidência de falta não foi suficiente para que medidores de carga detectassem a variação negativa de potência esperada, afetando a interpretação do sentido do fluxo de potência pelos agentes.

Nota-se que, para os valores de impedância de $0,01\Omega$ e $0,1\Omega$, somente 2 casos foram computados apresentando o comportamento mencionado. Os valores de impedância de $1,0\Omega$, $10,0\Omega$ e $50,0\Omega$, demonstram-se ser valores altos considerando as características de impedâncias dos elementos da Microrrede 1, já que apresentaram um número significativamente maior de casos nas colunas NDE e NDF.

Por fim, a Tabela 6 mostra os resultados obtidos por tipos de falta. Assim como para a configuração 1 de posicionamento de medidores, a configuração 2 apresenta taxa de acerto menor para as faltas monofásicas, com 45,0% de acertos. Novamente, todos os casos em que não houve detecção de eventos tiveram incidência de falta monofásica.

Tabela 5 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 1 de geração.

Impedância de falta (Ω)	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
0,01	48	47	97,9	0	0,0	0	0,0	1	2,1	0	0,0
0,1	48	47	97,9	0	0,0	0	0,0	1	2,1	0	0,0
1,0	48	35	72,9	1	2,1	0	0,0	12	25,0	0	0,0
10,0	48	31	64,6	16	33,3	0	0,0	1	2,1	0	0,0
50,0	48	31	64,6	16	33,3	0	0,0	1	2,1	0	0,0
10e ⁶	16	16	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0

Fonte – próprio autor.

Tabela 6 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 1 de geração.

Tipo de falta	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
AB	16	16	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
ABCG	80	75	93,8	0	0,0	0	0,0	5	6,2	0	0,0
ABG	80	80	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
AG	80	36	45,0	33	41,2	0	0,0	11	13,8	0	0,0

Fonte – próprio autor.

8.3 SIMULAÇÕES MICRORREDE 1 - CENÁRIO 2 DE GERAÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do SMA na Microrrede 1 com geração de suas IBDGs Modelo 1 em 100% de suas respectivas capacidades máximas, para as configurações 1 e 2 de posicionamento de medidores.

8.3.1 Configuração 1 de posicionamento de medidores

Os resultados de simulações para o cenário de geração das IBDGs Modelo 1 funcionando em sua capacidade máxima de geração, demonstraram menor acurácia na atuação do SMA, apresentando um percentual de acertos de 68,8%. Conforme dados expostos na Tabela 7, o aumento de injeção de potência na rede também reduziu a sensibilidade da estratégia de detecção de eventos, fazendo com que fossem

computados 44 casos na coluna NDE. Em comparação ao Cenário 1 de geração, nota-se também um aumento de ocorrências de casos com detecção multi-zonas e de casos sem determinação de falta. Somente 2,3% dos casos simulados apresentaram determinação de zona incorreta.

Tabela 7 – Resultado de simulações na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 2 de geração.

Modo de operação	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Conectado	128	90	70,3	20	15,6	16	12,5	2	1,6	0	0,0
Ilhado	128	86	67,2	24	18,8	3	2,3	9	7,0	6	4,7
Total	256	176	68,8	44	17,2	19	7,4	11	4,3	6	2,3

Fonte – próprio autor.

A Tabela 8 mostra que a redução do percentual de acerto do sistema de proteção para o Cenário 2 de geração está relacionado, principalmente, com impedâncias de falta mais altas, apresentando ainda um bom desempenho para os valores de impedância de $0,01\Omega$ e $0,1\Omega$. Em avaliação individual de casos, observou-se também fluxos de potência consideráveis circulando pelas cargas da microrrede para os valores de impedâncias de falta de $1,0\Omega$, $10,0\Omega$ e $50,0\Omega$, sendo este o comportamento responsável por 15 dos 19 casos computados na coluna DMZ.

Tabela 8 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 2 de geração.

Impedância de falta (Ω)	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
0,01	48	45	93,8	0	0,0	2	4,2	1	2,1	0	0,0
0,1	48	46	95,8	0	0,0	1	2,1	1	2,1	0	0,0
1,0	48	30	62,5	12	25,0	2	4,2	4	8,3	0	0,0
10,0	48	23	47,9	16	33,3	5	10,4	2	4,2	2	4,2
50,0	48	24	50,0	16	33,3	4	8,3	2	4,2	2	4,2
$10e^6$	16	8	50,0	0	0,0	5	31,2	1	6,2	2	12,5

Fonte – próprio autor.

A condição de operação da microrrede em que há mais geração do que consumo de potência revelou algumas vulnerabilidades da estratégia de proteção proposta, que não puderam ser verificadas nos resultados do Cenário 1 de geração da Microrrede 1. Além dos problemas já apresentados no Cenário 1, de oscilação dos parâmetros da microrrede por conta do sistema de controle das IBDGs Modelo 2 e alterações de parâmetros insuficientes para causar variação negativa de 20% na potência em alguns pontos da microrrede, outras dificuldades relacionadas às circunstâncias do Cenário 2 de geração foram observadas.

A primeira observação está relacionada ao comportamento da barra *swing* do sistema. Buscando estabelecer balanço de potência para a microrrede, as barras *swing* nos modos de operação ilhado e conectado demonstraram alterações de resposta a situações de contingência no Cenário 2 quando comparado ao Cenário 1, principalmente na ocorrência de faltas que envolvem somente 2 fases do sistema. Em oposição ao comportamento apresentado no Cenário 1, na ocorrência de falta bifásica ou bifásica à terra, os elementos responsáveis pelo balanço de potência da microrrede passam a ter circulação de potência apresentando o maior fluxo entrando por uma das fases em que houve incidência de falta, e o menor fluxo saindo pela outra fase em que houve incidência de falta. Esta circulação de potência, que ocorre por todo caminho formado pela presença da falta, afeta a tomada de decisão dos agentes, já que a existência de falta é determinada como interna à zona de proteção se o maior fluxo de potência estiver entrando, e externa à zona de proteção para a situação contrária. Os dados apresentados na Tabela 9 mostram que o maior número de casos nas colunas DMZ, NDF e DZI estão relacionados a faltas do tipo AB e ABG.

Tabela 9 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 2 de geração.

Tipo de falta	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
AB	16	8	50,0	0	0,0	5	31,2	1	6,2	2	12,5
ABCG	80	73	91,2	0	0,0	2	2,5	5	6,2	0	0,0
ABG	80	62	77,5	0	0,0	11	13,8	3	3,8	4	5,0
AG	80	33	41,2	44	55,0	1	1,2	2	2,5	0	0,0

Fonte – próprio autor.

Uma segunda observação está relacionada ao posicionamento do gerador DGEN na microrrede. Por estar conectado à microrrede por meio de uma linha de distribuição e ser uma fonte com alta capacidade de contribuição de corrente de curto-circuito, o fluxo de potência gerado pelo DGEN é interpretado de maneira equivocada pelos agentes em alguns casos de falta. Como a estratégia de proteção foi desenvolvida utilizando-se os conceitos de referencial “jusante” e “montante”, a presença de fontes com baixa capacidade de contribuição de corrente de curto-circuito posicionada ao longo dos alimentadores da microrrede garante o bom funcionamento da estratégia de variação negativa de potência adotada. O posicionamento do gerador DGEN na barra 9 da microrrede causa interpretação equivocada por parte de alguns agentes do SMA em algumas circunstâncias. À guisa de exemplo, toma-se a incidência de uma falta ABG, $1,0\Omega$, na linha DL8 da Microrrede 1, em modo ilhado, com Configuração 1 de posicionamento de medidores. Nesta circunstância, a falta é alimentada principalmente pelo fluxo de potência do gerador DGEN, fazendo com que o medidor B8DL8 registre variação negativa de potência e, conseqüentemente, induz o agente

B8 a interpretar a falta como sendo interna à Zona 7 e externa à Zona 8. Sendo assim, é necessário incrementar a capacidade de interpretação dos agentes para lidar com mais informações da microrrede e realizar as interpretações corretamente.

8.3.2 Configuração 2 de posicionamento de medidores

Mais uma vez, a Configuração 2 de posicionamento de medidores se mostrou mais favorável para as análises do SMA do que a Configuração 1. A redução no número de medidores eliminou todos os casos de determinação multi-zonas, conforme apresentado na Tabela 10. O percentual de acerto aumentou 7,8%, chegando à um total de 76,6%.

Tabela 10 – Resultado de simulações na Microrrede 1 - Config. 1 - Cenário 2 de geração.

Modo de operação	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Conectado	128	106	82,8	20	15,6	0	0,0	2	1,6	0	0,0
Ilhado	128	90	70,3	24	18,8	0	0,0	9	7,0	5	3,9
Total	256	196	76,6	44	17,2	0	0,0	11	4,3	5	2,0

Fonte – próprio autor.

Novamente, o sistema de proteção demonstrou boa eficiência para casos com incidência de falta com impedâncias de $0,01\Omega$ e $0,1\Omega$, apresentando a maior parte das deliberações incorretas para casos com impedâncias de falta mais altas, como pode ser visto na Tabela 11. Os 4 casos apresentados nas colunas NDF e DZI associados às impedâncias de falta $0,01\Omega$ e $0,1\Omega$ foram decorrentes das características discutidas anteriormente, sendo 3 casos consequência do posicionamento do gerador DGEN na barra B9, e 1 caso decorrente do comportamento da barra *swing* do sistema para faltas bifásicas.

Tabela 11 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 2 de geração.

Impedância de falta (Ω)	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
0,01	48	45	93,8	0	0,0	0	0,0	1	2,1	2	4,2
0,1	48	47	97,9	0	0,0	0	0,0	1	2,1	0	0,0
1,0	48	32	66,7	12	25,0	0	0,0	4	8,3	0	0,0
10,0	48	29	60,4	16	33,3	0	0,0	2	4,2	1	2,1
50,0	48	29	60,4	16	33,3	0	0,0	2	4,2	1	2,1
$10e^6$	16	14	87,5	0	0,0	0	0,0	1	6,2	1	6,2

Fonte – próprio autor.

Observando-se os resultados por tipo de falta apresentados na Tabela 12, nota-se que o uso de zonas mais amplas e maior número de informações sobre o evento favoreceu a atuação do SMA, fazendo com que os casos com faltas bifásicas e bifásicas à terra fossem melhor avaliadas. O resultado deste favorecimento é expressado pelos números, que indicam determinação de existência de falta de maneira correta em 88 casos com incidência de faltas do tipo AB e ABG, utilizando-se a Configuração 2, contra os 70 casos apresentados nas simulações utilizando a Configuração 1.

Tabela 12 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 1 - Config. 2 - Cenário 2 de geração.

Tipo de falta	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
AB	16	14	87,5	0	0,0	0	0,0	1	6,2	1	6,2
ABCG	80	75	93,8	0	0,0	0	0,0	5	6,2	0	0,0
ABG	80	74	92,5	0	0,0	0	0,0	3	3,8	3	3,8
AG	80	33	41,2	44	55,0	0	0,0	2	2,5	1	1,2

Fonte – próprio autor.

8.3.3 Experimento complementar

A fim de verificar a influência do sistema de aterramento na atuação do sistema de proteção proposto, testes complementares foram realizados com a mesma modelagem de Microrrede 1, porém alterando-se o sistema de aterramento original de 3 condutores e somente 1 ponto de aterramento, para o sistema de 4 condutores, também com um ponto de aterramento. A atuação do sistema de proteção para a microrrede teste com 4 condutores apresentou percentual de acerto de 86,7% para a Configuração 1 e 75,4% para a Configuração 2. O sistema de aterramento de 4 condutores amenizou alguns dos comportamentos acentuados apresentados pela Microrrede 1 com o aterramento original, já que oferece novos caminhos para circulação de potência em situação de contingência. Conforme pode ser observado, o uso do SMA com a configuração que apresenta maior número de medidores apresentou maior sensibilidade às mudanças causadas pela troca de sistema de aterramento.

8.4 SIMULAÇÕES MICRORREDE 2

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do SMA na Microrrede 2. Diferentemente da Microrrede 1, para a Microrrede 2 não foram realizadas simulações considerando diferentes cenários de geração. Conforme mencionado no Capítulo 6, os parâmetros de linhas, cargas e geração da microrrede são apresentados com detalhes no Apêndice B. Os resultados apresentados nesta seção são proveni-

entes das simulações realizadas para as configurações 1 e 2 de posicionamento de medidores.

8.4.1 Configuração 1 de posicionamento de medidores

As simulações do sistema de proteção proposto para os casos de falta na Microrrede 2 tiveram resultados expressivamente melhores do que as simulações na Microrrede 1. Apesar da porcentagem de acertos de 86,7% não ter sido muito superior às porcentagens apresentadas nas simulações da Microrrede 1, a Tabela 13 mostra que não houve nenhum caso de detecção multi-zonas, de ausência de determinação de falta ou de detecção de zona incorreta. Sendo assim, 100% dos casos em que houve detecção de evento, tiveram a existência de falta identificada corretamente pelo SMA. Acredita-se que esta performance esteja associada às características da Microrrede 2. Conforme mencionado no Capítulo 6, a Microrrede 2 foi modelada a partir de um sistema de distribuição real de uma zona semi-rural europeia que, tipicamente, possui linhas longas e são redes com componentes resistivas de valores elevados. Sendo assim, as impedâncias de falta adotadas nas simulações se mostraram mais próximas do que pode ser considerado faltas de baixa impedância frente às características da Microrrede 2.

Tabela 13 – Resultado de simulações na Microrrede 2 - Config. 1.

Modo de operação	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Conectado	128	111	86,7	17	13,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Ilhado	128	111	86,7	17	13,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Total	256	222	86,7	34	13,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0

Fonte – próprio autor.

A Tabela 14 mostra que 100% das faltas de impedâncias $0,01\Omega$ e $0,1\Omega$ foram corretamente identificadas pelo SMA, e que somente a partir de $1,0\Omega$ começaram a ocorrer casos sem detecção de evento. Ainda assim, o percentual de acerto de 91,7% para os casos com incidência de falta com impedância de $1,0\Omega$ foi consideravelmente melhor do que o resultados obtidos para os mesmos casos na Microrrede 1.

Na Tabela 15 verifica-se o mesmo comportamento identificado nas simulações da Microrrede 1, onde a falta monofásica é o principal tipo de falta presente nos casos sem detecção de evento. Em nenhum outro caso com incidência dos demais tipos de falta foi computado ausência de detecção de evento.

8.4.2 Configuração 2 de posicionamento de medidores

Os resultados obtidos para as simulações com a configuração 2 de posicionamento de medidores foram exatamente os mesmos obtidos para a simulação com a

Tabela 14 – Resultado de simulações por impedâncias de falta na Microrrede 2 - Config. 1.

Impedância de falta (Ω)	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
0,01	48	48	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
0,1	48	48	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
1,0	48	44	91,7	4	8,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0
10,0	48	34	70,8	14	29,2	0	0,0	0	0,0	0	0,0
50,0	48	32	66,7	16	33,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0
10e ⁶	16	16	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0

Fonte – próprio autor.

Tabela 15 – Resultado de simulações por tipo de falta na Microrrede 2 - Config. 1.

Tipo de falta	NT	DC		NDE		DMZ		NDF		DZI	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
AB	16	16	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
ABCG	80	80	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
ABG	80	80	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
AG	80	46	57,5	34	42,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0

Fonte – próprio autor.

configuração 1, portanto, as tabelas e análises da seção anterior são válidas como representação dos resultados que seriam exibidos nesta seção. Alguns fatores podem ter contribuído para ausência de diferenças entre os resultados das duas configurações de posicionamento de medidores na Microrrede 2:

- Os valores de potência da GD e das cargas da Microrrede 2 são consideravelmente menores do que os valores da Microrrede 1. Esta diferença pode afetar diretamente o comportamento dos fluxos de potência da microrrede em situação de contingência, como por exemplo, nos casos em que não houve variação negativa de potência de 20% em alguns medidores de carga nas simulações da Microrrede 1;
- A relação de impedâncias de cargas da microrrede para com sua impedância total pode influenciar no comportamento dos fluxos de potência de suas linhas de distribuição de energia;
- A ausência de conexões de cargas e gerações em todas as fases de todos os ramos da microrrede acarretam em um comportamento de fluxos de potência por fase menos influenciados pela totalidade do sistema;
- O posicionamento do gerador à diesel DGEN na Microrrede 2 é conectado ao ramo central do alimentador iniciado pela linha DL3, em uma barra relativamente próxima do PCC, fazendo com houvesse poucas alterações nos fluxos

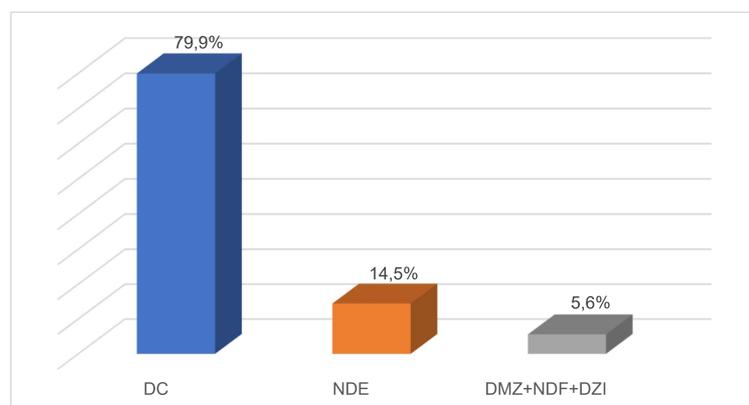
de potência da rede quando comparados os modos de operação ilhado e conectado;

- e) O sistema de aterramento da Microrrede 2 é de 4 condutores com ponto de aterramento único.

8.5 RESULTADOS GERAIS

Os resultados contidos nesta seção apresentam um panorama geral do desempenho do sistema de proteção proposto. Os gráficos exibidos nas figuras 62, 63 e 64 apresentam os resultados das 1536 simulações realizadas. Observa-se pela Figura 62 que, de maneira geral, o sistema de proteção proposto teve um bom desempenho, deliberando corretamente em 79,9% dos casos de falta na microrrede. Por outro lado, o gráfico indica também a necessidade de realização de aprimoramentos na estratégia de detecção de eventos e métodos de análise de falta. Em 5,6% dos casos simulados houve algum tipo de deliberação incorreta por parte do SMA, e em 14,5% dos casos não houve detecção de evento.

Figura 62 – Resultados gerais de todas as simulações realizadas.

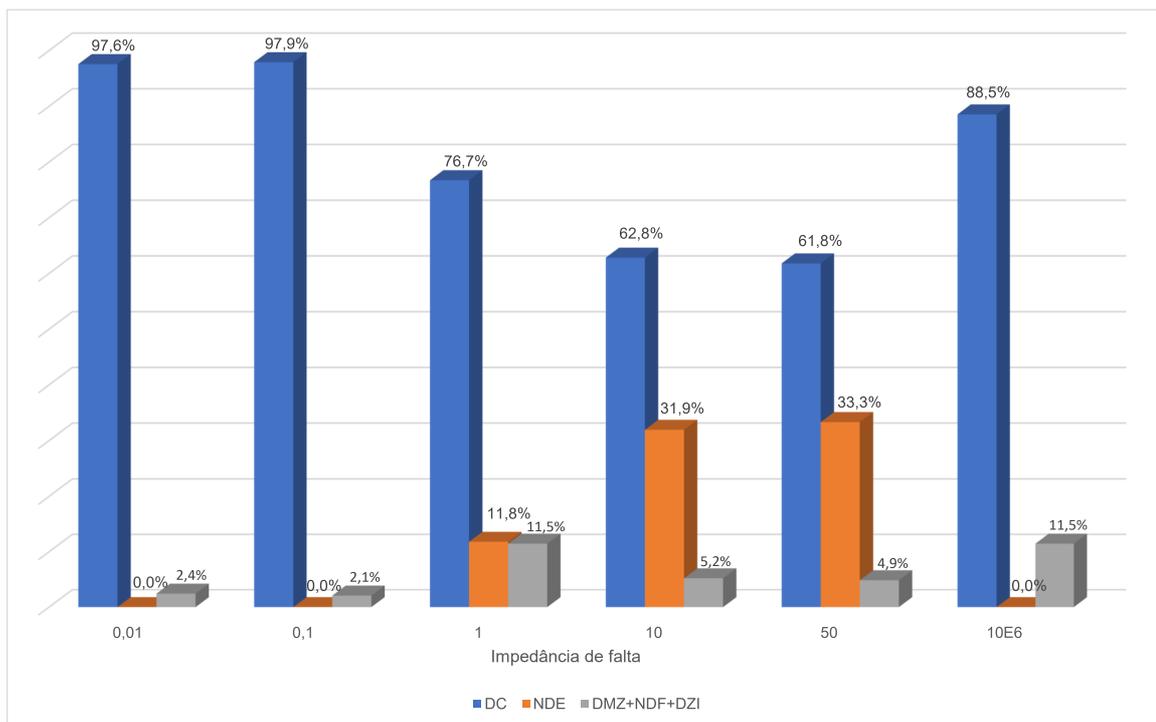


Fonte – próprio autor.

A alta porcentagem de casos em que não houve detecção de evento pode ser melhor compreendida analisando-se o gráfico da Figura 63. Neste gráfico é possível observar que o sistema de proteção apresenta bom desempenho para faltas de baixa impedância, objetivo da proposta de estudo desta tese. Apesar da inexistência de consenso sobre a definição de faltas de alta e baixa impedância, faz-se importante frisar que os resultados de deliberação correta para as impedâncias em que não houve ausência de detecção de evento foram de 97,6% e 97,9%, respectivamente. A partir da aplicação de faltas com valores de impedância que não alteram significativamente os parâmetros da microrrede, discussões sobre a classificação da falta quanto à sua

impedância passam a ser cabíveis. O gráfico da Figura 63 mostra ainda que incrementos na estratégia de detecção de faltas bifásicas são necessários, já que apresentaram erro de deliberação em 11,5% dos casos simulados.

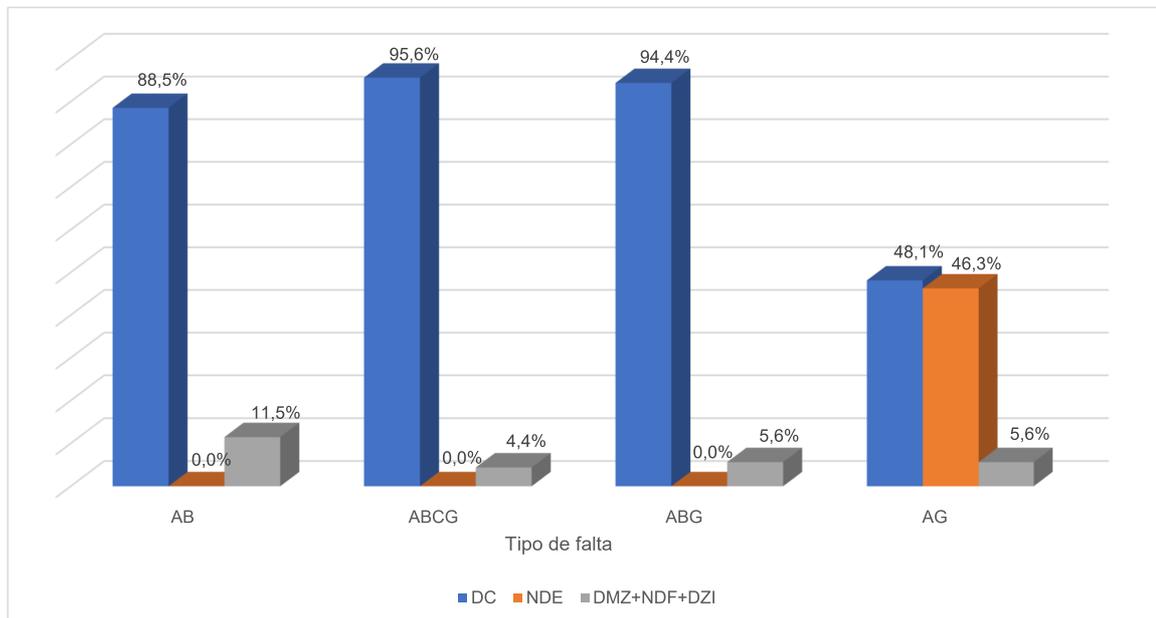
Figura 63 – Resultados gerais de todas as simulações realizadas por impedância.



Fonte – próprio autor.

No gráfico da Figura 64 os resultados são apresentados por tipo de falta. Nota-se que o único tipo de falta que foi computado com ausência de detecção de evento foi o tipo monofásico. Ademais, a metodologia de análise de falta apresentou o melhor desempenho para os casos com incidência de faltas trifásicas, com deliberação incorreta em somente 4,4% dos casos. Apesar do alto índice de casos sem detecção de eventos, a metodologia de análise do SMA também apresentou bom desempenho para os casos com incidência de falta monofásica, assim como para os casos com aplicação de faltas bifásica à terra, com percentual de deliberação incorreta em somente 5,6% dos casos.

Figura 64 – Resultados gerais de todas as simulações realizadas por tipo de falta.



Fonte – próprio autor.

8.6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos evidenciam aspectos técnicos que incitam discussões interessantes a respeito do desenvolvimento científico de aplicação de SMA em sistemas elétricos de potência e de estratégias de proteção de microrredes de baixa tensão com alta inserção de IBDGs. Fatores que foram considerados relevantes para discussão diante dos resultados deste estudo são apresentados a seguir.

8.6.1 Metodologia utilizada

Os resultados das simulações demonstraram que a metodologia proposta possui boa eficiência para proteção de microrredes de baixa tensão com alta inserção de fontes conectadas via conversores estáticos. Os percentuais de 97,6% e 97,9% de acerto nas deliberações sobre a existência de falta de valores baixos de impedância demonstram boa eficácia da estratégia elaborada, porém, outras nuances dos resultados obtidos indicam que a estratégia ainda precisa de incrementos para uma possível implementação em um sistema real. Todavia, os resultados foram considerados satisfatórios tendo em vista que o sistema de proteção proposto se baseou somente em técnicas que utilizam parâmetros de simples aferição para interpretar o comportamento das microrredes em situação de contingência. Conforme pôde ser observado na revisão de literatura do Capítulo 3, técnicas mais sofisticadas com cálculos complexos

e utilização de um número maior de parâmetros podem ser aliadas à programação orientada à agentes para obtenção de resultados mais promissores e de aplicabilidade mais abrangente, como por exemplo, incrementar o sistema de proteção proposto para detectar faltas de alta impedância e melhorar sua capacidade de detecção de eventos. No entanto, o uso de direção de fluxos de potências e suas variações em magnitude, associados à variação de valores de impedância e detecção de limiar de tensão, proporcionaram características importantes para o sistema de proteção, tais como:

- a) Desnecessidade de sincronização de medições;
- b) Simplicidade de obtenção de parâmetros a serem avaliados;
- c) Independência de ajustes fixos atrelados à características da microrrede;
- d) Desnecessidade de cálculos complexos para avaliação dos parâmetros;
- e) Capacidade de identificação de falta independente da magnitude da contribuição de correntes de curto-circuito por parte da GD.

Não obstante, é importante ressaltar que os resultados foram obtidos a partir de microrredes modeladas com sistemas de aterramento com um único ponto de aterramento, utilizando sistemas de três e quatro condutores. Embora sejam sistemas de aterramento tipicamente utilizados em redes de distribuição de energia (IEEE, 2015), outros tipos de sistema de aterramento podem ser empregados em microrredes (MOHAMMADI *et al.*, 2018), acarretando em possíveis diferenças no comportamento dos fluxos de potência em situação de contingência. Vale frisar novamente que, simulações não apresentadas na tese foram realizadas para a Microrrede 1 modelada com sistema de aterramento de ponto único e quatro condutores, apresentando algumas diferenças significativas na quantidade de deliberações corretas quando comparados aos resultados referentes ao sistema de aterramento de ponto único e três condutores, considerando simulações para o Cenário 1 de geração.

Os resultados demonstram também maior número de erros de deliberação para casos com impedâncias mais altas e faltas que envolvem somente 2 fases do sistema. A inexistência de consenso sobre a classificação de faltas de baixa e alta impedância, conforme discussão apresentada no Capítulo 7, traz à tona reflexões sobre o resultado do desempenho da técnica de detecção de eventos utilizada neste trabalho. Visto que não há alterações significativas nos parâmetros utilizados pela metodologia proposta em diversos casos de falta, considerou-se que as faltas que culminaram neste comportamento possam ser classificadas como faltas de alta impedância e, portanto, a adição de outras técnicas de detecção e análise de eventos é necessária para complementação do SMA proposto.

Os casos de faltas que envolvem somente 2 fases do sistema também necessitam de técnicas complementares para obtenção de maior abrangência de aplicabilidade,

uma vez que o sistema teste com presença de geração da GD maior do que o consumo de energia das cargas apresentou maior número de deliberações incorretas. A configuração do circuito formado pela ocorrência de uma falta bifásica ou bifásica à terra torna a previsão dos fluxos de potência bastante inexatos, uma vez que depende da localização da falta e características físicas e operacionais da microrrede. Neste trabalho não foram realizadas investigações aprofundadas para desenvolvimento de técnicas eficientes de determinação de falta para a circunstância de alta geração de energia por parte da GD, porém estima-se que somente o uso da estratégia de avaliação do sentido dos fluxos de potência seja insuficiente para melhorar o número de deliberações corretas para a circunstância em questão. O sistema de proteção pode ser melhorado por meio da implementação de um processo de análise prévia à situação de contingência por parte dos agentes, desempenhando uma etapa de estimativa de redução percentual de fluxo de potência de acordo com as características da microrrede.

8.6.2 Comunicação e desempenho computacional de agentes

Neste trabalho não foi simulada a comunicação entre os agentes, sendo as simulações todas feitas em um único computador, utilizando a infraestrutura de comunicação centralizada disponibilizada pela plataforma do JASON.

Para a aplicação em proteção de microrredes, a comunicação e o desempenho computacional dos agentes são fatores determinantes na implementação prática do SMA. Sistemas de proteção devem eliminar curtos-circuitos das redes elétricas dentro do menor intervalo de tempo possível, visando garantir segurança de seres humanos e integridade dos equipamentos conectados à rede. A tolerância de tempo de atuação de um sistema de proteção depende das características do curto-circuito, da rede elétrica e dos equipamentos conectados a ela, entretanto, os tempos de atuação costumam ser da ordem de poucas centenas de milissegundos. Portanto, tempos de processamento computacional e de comunicação devem ser levados em consideração neste tipo de aplicação. As mensagens trocadas pelos agentes do SMA proposto possuem conteúdo de fácil interpretação e de pouca informação, portanto, estima-se que o tempo gasto com a comunicação entre agentes não seja um fator impeditivo para a implementação prática do sistema de proteção proposto. Protocolos de comunicação similares à IEC 61850 poderiam viabilizar a implementação.

O tempo de atuação do sistema de proteção proposto não pôde ser avaliado com precisão neste trabalho. A execução de um grande número de agentes em um único computador, juntamente com os demais processos internos de seu sistema operacional, inviabiliza a realização de uma avaliação de tempos de processamento e resposta do sistema de proteção.

A complexidade de implementação da dinâmica cognitiva do modelo BDI, realizada pelo *Reasoning Cycle* do interpretador JASON, pode exigir alta capacidade

computacional para atender às necessidades de rápido processamento de informações exigidos por sistemas de proteção de redes elétricas, fator que pode ser determinante no orçamento de sua implementação prática. Desta forma, algumas estratégias foram adotadas na metodologia visando aumentar a viabilidade da aplicação:

- a) Utilização do artefato medidor, que é capaz de avaliar medições da microrrede a cada 20ms (1 ciclo elétrico), mantendo os agentes em estado de espera para atuar de forma reativa à detecção de um evento na microrrede;
- b) Realização de análises de topologia e projeção de fatores relacionados à situação de contingência de forma antecipada à ocorrência de um evento;
- c) Customização da função *Event Selector* do *Reasoning Cycle* do JASON, dando prioridade de processamento à algumas crenças e intenções específicas no momento subsequente à de detecção de um evento.

Alguns estudos presentes na literatura avaliam a performance computacional do JASON, porém com base em aplicações bem diferentes da proposta nesta tese (FERNÁNDEZ-BAUSET *et al.*, 2010; PÉREZ-CARRO *et al.*, 2014).

Como estimativa de tempo de atuação do sistema de proteção, mediu-se o tempo total das ações do agente *leader* da zona em falta na simulação apresentada na Seção 8.1. A medição de tempo é iniciada no momento em que ocorre a primeira detecção de *flag* pelo agente *leader* da zona em falta, e é finalizada quando este mesmo agente finaliza a deliberação sobre a existência de falta. A realização da simulação com um grande número de medidores e agentes em um mesmo processador fez com que fosse necessário a adição de tempo de espera para a execução da primeira avaliação individual dos agentes do SMA. A detecção do evento, que indica o estado de contingência na microrrede, ocorre quase que simultaneamente por todos os medidores do sistema, fazendo com que um grande número de agentes desempenhe suas primeiras ações analíticas em um mesmo momento, sobrecarregando o processador do computador em que foi feita a simulação. Este fator gera atrasos que prejudica a análise dos agentes. Sendo assim, foi necessário adicionar um tempo de espera de 5 segundos a partir do momento de detecção do evento para que as formações das primeiras crenças pudessem ser realizadas integralmente. Desta forma, o tempo total das ações do agente *leader* da zona em falta foi de 5851 ms, onde 5000 ms representa o tempo de espera mencionado. Em uma aplicação real descentralizada, o referido tempo de espera não será necessário, bem como o restante do tempo de atuação de 851 ms tende a ser reduzido devido ao processamento distribuído. As simulações foram realizadas em um computador com especificações Intel(R) Core(TM) i5 CPU M460 2,53GHz 8GB RAM Windows 10 Pro 64-bit. Sendo assim, trabalhos futuros com foco neste aspecto devem ser desenvolvidos para comprovação de viabilidade de implementação real.

8.6.3 O uso de programação lógica orientada à agentes

O uso de SMA para composição de um sistema de proteção para microrredes estimula reflexões acerca desta aplicação frente aos métodos convencionais de proteção de sistemas elétricos e aos diferentes paradigmas de linguagem de programação tradicionalmente utilizados, como por exemplo, as linguagens de programação imperativas e orientadas à objetos. As vantagens e desvantagens que podem ser obtidas com o uso do SMA para aplicações em sistemas elétricos de potência, fazendo utilização de programação lógica, são discutidas a seguir.

8.6.3.1 Aspectos positivos

As principais vantagens do uso de SMA são proporcionadas pela antropomorfologia associada ao seu conceito, tanto em nível individual, com a possibilidade de uso de noções mentalísticas para auxílio do raciocínio, quanto em nível social, por meio do uso de noções de sociedades humanas (BORDINI, R.; VIEIRA, 2003). Em nível individual, o uso da programação lógica permite que os agentes possuam arquitetura interna com funcionamento semelhante ao raciocínio humano, proporcionando autonomia e proatividade ao agente. Estas características são algumas das principais vantagens que a programação lógica orientada à agentes oferece. Os agentes de um sistema multiagente podem funcionar de maneira distribuída, com um objetivo em comum, e reagir a mudanças ao ambiente de maneira autônoma, diferentemente do funcionamento da programação orientada à objetos, por exemplo, em que os métodos são invocados a partir do comando de algum outro componente do sistema (ODELL, 2002). A autonomia dos agentes permite ainda que o SMA apresente maior tolerância à falhas, uma vez que, na ocorrência de defeito em um dos agentes do sistema, os demais são capazes de continuar operando buscando adaptação às novas condições de operação e visando alcançar seus objetivos, enquanto que outras linguagens de programação estão mais sujeitas à ocorrência de interrupção no funcionamento do sistema.

As vantagens do uso de SMA obtidas em nível individual de agentes são complementadas pela possibilidade do uso de suas habilidades sociais, que proporcionam ampla flexibilidade ao sistema como um todo. A implementação de noções de papéis, grupos e organizações faz que um agente possa desempenhar dinamicamente diversas funções em busca de um objetivo, e alterá-las conforme necessário. Esta flexibilidade, proporcionada pela programação lógica orientada à agentes, é mais difícil de ser obtida nas linguagens de programação funcionais e orientadas à objetos por exemplo, onde não é possível realizar alterações em uma função ou em um objeto durante a execução do programa (ODELL, 2002). A capacidade de uso das noções de sociedade, associado à característica modular dos algoritmos baseados em programa-

ção lógica, permitem também o uso de um único código fonte para o funcionamento de todos os agentes do SMA.

Vantagens significativas também podem ser obtidas com relação à troca de mensagens de um sistema distribuído por meio da utilização da programação lógica orientada à agentes. Visto que as mensagens trocadas entre agentes podem ser usadas com diversas finalidades, como informar um agente sobre um evento, fazer perguntas específicas ou até mesmo receber resposta sobre uma pergunta feita anteriormente (ODELL, 2002), a comunicação entre agentes oferece alto grau de flexibilidade quando comparado às mensagens informativas de parâmetros pré-definidos utilizados em outros tipos linguagem de programação. A implementação de comunicação por mensagens entre agentes utilizando linguagens de programação não lógica, requereria prever inúmeras possibilidades de variação de sintaxe de unidades de programação da linguagem utilizada.

8.6.3.2 Aspectos negativos

Em contrapartida às vantagens elencadas anteriormente, alguns empecilhos são encontrados no processo de desenvolvimento de sistemas multiagentes. Diversas são as possibilidades de interações autônomas de um agente, sejam elas com o ambiente ou com outros agentes, fator que aumenta expressivamente a complexidade do sistema à medida que há aumento no número de agentes ou aumento nas possibilidades de interação com o ambiente. O desenvolvimento dos agentes por meio do uso de linguagem de programação lógica dificulta o uso de pontos de interrupção na execução do programa para realizar a depuração de problemas e erros de programação. Além disto, a presença de inúmeros agentes em um sistema multiagente gera uma enorme quantidade de dados, armazenados de maneira distribuída, relacionados ao seu estado interno de crenças, trocas de mensagens, informações sobre artefatos e organização, entre outros. Este conjunto de fatores torna o desenvolvimento do SMA uma tarefa complexa, já que ainda não existe uma ferramenta específica para tornar o processo de depuração de execuções do algoritmo de sistemas complexos, como o SMA, um trabalho funcional.

Algumas outras dificuldades com relação ao uso da programação lógica também foram observadas ao longo do desenvolvimento do trabalho. Mais informações para melhor compreensão dos itens elencados podem ser obtidas em (BORDINI, R. H. *et al.*, 2008; BOISSIER, O. *et al.*, 2020). As referidas dificuldades são as que seguem:

- a) O uso de predicados com número de parâmetros que possam sofrer alterações durante a execução do SMA dificulta a criação de planos;
- b) Não é possível obter o tempo de execução da simulação com alto grau de exatidão com base no tempo do sistema operacional;

- c) Existe a necessidade de distinção entre termo e *string* na nomenclatura de artefatos;
- d) Ausência de possibilidade de retornar à um estado mental prévio dos agentes (crenças diferentes têm que ser apagadas uma a uma);
- e) O encadeamento de ações recursivas internas aos agentes, em que o fim das iterações é desconhecido devido à aplicação, torna complexo o planejamento de ações subsequentes por parte dos agentes, e gera dificuldades devido à descentralização do sistema.

9 CONCLUSÕES

A concepção de que sistemas multiagentes são desenvolvidos com a finalidade de solucionar problemas complexos, de natureza distribuída, situados em ambientes dinâmicos, imprevisíveis e parcialmente observáveis, sugere boa compatibilidade da proposta desta tese com a aplicação de proteção de microrredes de baixa tensão. O uso de linguagem de programação lógica orientada à agentes permitiu explorar as vantagens do antropomorfismo proveniente do uso de noções mentalísticas da arquitetura BDI e das habilidades sociais presentes nos agentes do SMA, possibilitando a elaboração de uma estratégia de proteção capaz de atuar corretamente a partir da interpretação de informações elementares da microrrede.

Frente às diversas estratégias de proteção de microrrede de baixa tensão presentes na literatura, a metodologia proposta apresentou características vantajosas considerando a aplicação em questão. A adaptabilidade proporcionada pelo SMA provou garantir alta versatilidade ao sistema de proteção proposto, uma vez que é capaz de analisar topologias e circunstâncias de operação para funcionamento adequado em diferentes microrredes, conforme pôde ser observado nos resultados. Apesar da metodologia apresentada ter sido desenvolvida para microrredes com topologias radiais, a estrutura do SMA composta pelas dimensões de organização, agentes e artefatos, bem como a estrutura modular do código fonte dos agentes devido ao uso de programação lógica, permite que o sistema de proteção seja facilmente adaptado para obter maior abrangência. Além disto, a descentralização do funcionamento da estratégia de proteção proposta assegura confiabilidade ao sistema, já que a ocorrência de problemas técnicos locais não compromete totalmente o sistema de proteção. Dessa forma, o objetivo de elaboração de um sistema de proteção para microrredes com alta inserção de geradores com conexão via conversores estáticos, para faltas de baixa impedância, foi alcançado, ainda que deixando espaço para aprimoramentos em alguns aspectos de seu funcionamento.

Os resultados desta tese demonstram que o uso de sistemas multiagente pode ser um importante recurso no desenvolvimento de sistemas de proteção para microrredes, e abre caminho para novos tópicos de investigação nesta linha de pesquisa. As inúmeras condições de operação e topologias que uma microrrede pode possuir ainda oferecem um amplo campo de exploração para desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema desta tese.

9.1 TRABALHOS FUTUROS

Esta tese abre caminho para novos tópicos de pesquisa a serem explorados em trabalhos futuros. Algumas possibilidades de incrementos neste trabalho são elencadas nesta seção para inspirar o desenvolvimento de novas pesquisas:

- a) Adicionar estratégias de detecção e análise de faltas de alta impedância;
- b) Desenvolver o SMA para desempenhar o sistema de proteção em redes elétricas não radiais;
- c) Implementar etapa de análise pré-contingência para estimativa de percentuais de redução de potência ativa e aprimorar a estratégia de detecção de eventos na microrrede;
- d) Aprimorar estratégia de proteção para levar em consideração injeção de potência reativa na microrrede por parte das IBDGs.
- e) Realizar simulações com maior variedade de tipos de IBDGs;
- f) Definir estratégia de determinação de falta bifásica/bifásica à terra para microrrede com alta geração de energia por parte da GD;
- g) Simular a comunicação do SMA utilizando, por exemplo, o simulador de redes NS-3;
- h) Implementar o SMA para simulações em tempo real para avaliação da performance do sistema de proteção proposto.

REFERÊNCIAS

ABEDINI, R.; PINTO, T.; MORAIS, H.; VALE, Z. Multi-Agent Approach for Power System in a Smart Grid Protection Context. *In: IEEE Grenoble Conference. [S.l.: s.n.], 2013. P. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2013.6652158.*

ACKERMANN, Thomas; ANDERSSON, Göran; SÖDER, Lennart. Distributed generation: a definition. **Electric power systems research**, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001. ISSN 0378-7796.

AGHDAM, T. S.; KAREGAR, H. K.; ZEINELDIN, H. H. Variable Tripping Time Differential Protection for Microgrids Considering DG Stability. **IEEE Transactions on Smart Grid**, p. 1–1, 2018. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2018.2797367.

AKOREDE, Mudathir Funsho; HIZAM, Hashim; POURESMAEIL, Edris. Distributed energy resources and benefits to the environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 724–734, 2010. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.025>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002561>.

ALJOHANI, Abdulaziz; HABIBALLAH, Ibrahim. High-Impedance Fault Diagnosis: A Review. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 23, p. 6447, 2020.

ANANDA, Stephanus Antonius; GU, Jyh-Cherng; YANG, Ming-Ta; WANG, Jing-Min; CHEN, Jun-Da; CHANG, Yung-Ruei; LEE, Yih-Der; CHAN, Chen-Min; HSU, Chia-Hao. Multi-Agent System Fault Protection With Topology Identification in Microgrids. **Energies**, v. 10, n. 1, p. 28, 2016.

ANTONOVA, G.; NARDI, M.; SCOTT, A.; PESIN, M. Distributed Generation and its Impact on Power Grids and Microgrids Protection. *In: 65TH Annual Conference for Protective Relay Engineers. [S.l.: s.n.], 2012. P. 152–161. DOI: 10.1109/CPRE.2012.6201229.*

BARNARD, John; PAHWA, Anil. Determination of the impacts of high impedance faults on protection of power distribution systems using a probabilistic model. **Electric Power Systems Research**, v. 28, n. 1, p. 11–18, 1993. ISSN 0378-7796. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(93\)90074-0](https://doi.org/10.1016/0378-7796(93)90074-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378779693900740>.

BARNES, M.; KONDOH, J.; ASANO, H.; OYARZABAL, J.; VENTAKARAMANAN, G.; LASSETER, R.; HATZIARGYRIOU, N.; GREEN, T. Real-World Microgrids - An Overview. *In: IEEE International Conference on System of Systems Engineering*. [S.l.: s.n.], abr. 2007. P. 1–8. DOI: 10.1109/SYSOSE.2007.4304255.

BARSALI, S.; CERAOLO, M.; PELACCHI, P.; POLI, D. Control Techniques of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply. *In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2002. 789–794 vol.2. DOI: 10.1109/PESW.2002.985115.

BEHESHTAEIN, S.; SAVAGHEBI, M.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. A Hybrid Algorithm for Fault Locating in Looped Microgrids. *In: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7855166.

BELLIFEMINE, F.; CAIRE, Giovanni; POGGI, Agostino; RIMASSA, Giovanni. JADE: a white paper. v. 3, jan. 2003.

BELLIFEMINE, Fabio; CAIRE, Giovanni; GREENWOOD, Dominic. **Developing Multi-agent Systems with JADE**. [S.l.]: John Wiley & Sons, fev. 2007. P. 1–286. ISBN 9780470057476. DOI: 10.1002/9780470058411.

BHASKARA, S. N.; CHOWDHURY, B. H. Microgrids: A Review of Modeling, Control, Protection, Simulation and Future Potential. *In: IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/PESGM.2012.6345694.

BLACKBURN, J Lewis; DOMIN, Thomas J. **Protective relaying: principles and applications**. [S.l.]: CRC press, 2014. ISBN 1439888116.

BOISSIER, O.; BORDINI, R.H.; HUBNER, J.; RICCI, A. **Multi-Agent Oriented Programming: Programming Multi-Agent Systems Using JaCaMo**. [S.l.]: MIT Press, 2020. (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series). ISBN 9780262360661. Disponível em:
https://books.google.com.br/books?id=GM%5C_tDwAAQBAJ.

BOISSIER, Olivier; BORDINI, Rafael H; HÜBNER, Jomi F; RICCI, Alessandro; SANTI, Andrea. Multi-Agent Oriented Programming With JaCaMo. **Science of Computer Programming**, v. 78, n. 6, p. 747–761, 2013. ISSN 0167-6423.

BOND, A. H.; GASSER, L. A Survey of Distributed Artificial Intelligence. **Readings in Distributed Artificial Intelligence**, ago. 1988.

BORDINI, R. H.; BRAUBACH, L.; DASTANI, Mehdi; SEGHROUCHNI, A. El F.; GOMEZ-SANZ, J. J.; LEITE, J.; O'HARE, G.; POKAHR, A.; RICCI, A. A Survey of Programming Languages and Platforms for Multi-Agent Systems. **Informatica**, v. 30, n. 1, 2006. ISSN 1854-3871.

BORDINI, R. H.; HUBNER, J. F.; WOOLDRIDGE, M. **Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak Using Jason**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2008. (Wiley Series in Agent Technology).

BORDINI, Rafael; VIEIRA, Renata. Linguagens de Programação Orientadas a Agentes: Uma Introdução Baseada em AgentSpeak(L). **RITA**, v. 10, p. 7–38, jan. 2003.

BRATMAN, M.E. What is intention. **Intentions in Communication**, p. 15–32, 1990.

BRATMAN, Michael. **Intention, Plans, and Practical Reason**. [S.l.]: Harvard University Press, 1987. v. 10. ISBN 9780674458185.

BRUCOLI, M. **Fault Behaviour and Fault Detection in Islanded Inverter-Only Microgrids**. 2008. Ph.D. Thesis. DOI: 10.25560/4387. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10044/1/7893>.

CHARYTONIUK, W.; WEI-JEN, Lee; MO-SHING, Chen; CULTRERA, J.; THEODORE, Maffetone. Arcing Fault Detection in Underground Distribution Networks-Feasibility Study. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 6, p. 1756–1761, 2000. ISSN 0093-9994. DOI: 10.1109/28.887231.

CHEN, Z.; PEI, X.; YANG, M.; PENG, L.; SHI, P. A Novel Protection Scheme for Inverter-Interfaced Microgrid (IIM) Operated in Islanded Mode. **IEEE Transactions on Power Electronics**, PP, n. 99, p. 1–1, 2017. ISSN 0885-8993. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2769559.

CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. [S.l.]: Institution of Engineering and Technology, 2009. ISBN 9781849190145.

CINTUGLU, M. H.; MA, T.; MOHAMMED, O. A. Protection of Autonomous Microgrids Using Agent-Based Distributed Communication. **IEEE Transactions on Power**

Delivery, v. 32, n. 1, p. 351–360, 2017. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2551368.

CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ELECTRIQUES. **Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources**. [S.l.], 2014. ISBN 978-285-873-270-8.

DAO VAN, Tu; CHAITUSANEY, S. Impacts of Inverter-Based Distributed Generation Control Modes on Short-Circuit Currents in Distribution Systems. *In: 7TH IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1645–1650. DOI: 10.1109/ICIEA.2012.6360989.

DELINCHANT, B.; WURTZ, F.; PLOIX, S.; CHANEN, J.; MARECHAL, Y. GrEn-ER Living Lab: a Green Building with Energy Aware Occupants. *In: 5TH International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS'2016)*. [S.l.: s.n.], 2016.

DONDI, P.; BAYOUMI, D.; HAEDERLI, C.; JULIAN, D.; SUTER, M. Network integration of distributed power generation. **Journal of Power Sources**, v. 106, n. 1, p. 1–9, 2002. ISSN 0378-7753. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)01031-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)01031-X).
Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877530101031X>.

DRIESEN, J.; BELMANS, R. Distributed generation: challenges and possible solutions. *In: IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2006. 8 pp. DOI: 10.1109/PES.2006.1709099.

DRIESEN, J.; KATIRAEI, F. Design for distributed energy resources. **Power and Energy Magazine, IEEE**, v. 6, n. 3, p. 30–40, 2008. ISSN 1540-7977. DOI: 10.1109/MPE.2008.918703.

DULĂU, Lucian Ioan; ABRUDEAN, Mihail; BICĂ, Dorin. Effects of Distributed Generation on Electric Power Systems. **Procedia Technology**, v. 12, p. 681–686, 2014. ISSN 2212-0173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.549>.
Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313007342>.

DUONG MINH, Bui; SHI-LIN, Chen; CHENG-WEI, Chen; KENG-YU, Lien; YUNG-RUEI, Chang; YIH-DER, Lee; JHENG-LUN, Jiang. A Simplified and Automated

Fault Current Estimation Approach for Grid-Connected Low-Voltage AC Microgrids. *In: WORLD Congress on Sustainable Technologies (WCST)*. [S.l.: s.n.], 2016. P. 89–101. DOI: 10.1109/WCST.2016.7886599.

FERNANDEZ, Rosa Maria de Castro; ROJAS, Horacio Nelson Diaz. An Overview of Wavelet Transforms Application in Power Systems. *In: 14TH Power Systems Computation Conference (PSCC)*. [S.l.: s.n.], 2002. P. 1–6.

FERNÁNDEZ-BAUSET, Victor; GRIMALDO, F.; LOZANO, M.; ORDUÑA, J. Evaluating Jason for Distributed Crowd Simulations. *In: ICAART*. [S.l.: s.n.], 2010.

FKI ENERGY TECHNOLOGY. **Data Sheets Three Phase Synchronous Generators**. Catalog. [S.l.], nov. 2005.

GEORGEFF, Michael; PELL, Barney; POLLACK, Martha; TAMBE, Milind; WOOLDRIDGE, Michael. The Belief-Desire-Intention Model of Agency. *In: INTERNATIONAL Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*. [S.l.]: Springer, 1998. P. 1–10.

GEORGEFF, Michael P; LANSKY, Amy L. Reactive Reasoning and Planning. *In: AAAI - The Association for the Advancement of Artificial Intelligence*. [S.l.: s.n.], 1987. P. 677–682.

GOMEZ, J. C.; MORCOS, M. M. Distributed generation: Exploitation of islanding operation advantages. *In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. [S.l.: s.n.], 2008. P. 1–5. DOI: 10.1109/TDC-LA.2008.4641736.

GOODWIN, Richard. Formalizing Properties of Agents. **Journal of Logic and Computation**, v. 5, n. 6, p. 763–781, 1995. ISSN 0955-792X.

GROBLER, Martin. **Determining Transmission Line Parameters From Time-Stamped Data**. Jul. 2007. M.Sc. Dissertation. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2263/24048>.

GUERRERO-RODRÍGUEZ, N. F.; REY-BOUÉ, Alexis B.; REYES-ARCHUNDIA, E. Overview and Comparative Study of Two Control Strategies Used in 3-Phase Grid-Connected Inverters for Renewable Systems. **Renewable Energy Focus**, v. 19-20, p. 75–89, 2017. ISSN 1755-0084. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.05.007>. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008417301576>.

HABIB, H. F.; YOUSSEF, T.; CINTUGLU, M. H.; MOHAMMED, O. A. Multi-Agent-Based Technique for Fault Location, Isolation, and Service Restoration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 3, p. 1841–1851, 2017. ISSN 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2017.2671427.

HABIB, Hany Fawzy; MOHAMMED, Osama. A Multiagent System for Simple Overcurrent Protection of Microgrids With Distributed Generation. *In: 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. [S.l.: s.n.], 2018. P. 1–8. DOI: 10.1109/IAS.2018.8544583.

HARON, A. R.; MOHAMED, A.; SHAREEF, H.; ZAYANDEHROODI, H. Analysis and Solutions of Overcurrent Protection Issues in a Microgrid. *In: IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*. [S.l.: s.n.], 2012. P. 644–649. DOI: 10.1109/PECon.2012.6450293.

HASSAN, H. A. A.; FU, Q.; BHARAVAJU, V.; YANG, Y.; GRAINGER, B. M. High-Speed Algorithm for Renewable Energy Based Microgrid Fault Detection and Protective Coordination. *In: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2017. P. 519–525. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8095827.

HATZIARGYRIOU, N. **Microgrids: Architectures and Control**. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, mar. 2014. P. 1–344. ISBN 978-1-118-72068-4.

HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R.; MARNAY, C. Microgrids. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 5, n. 4, p. 78–94, 2007. ISSN 1540-7977. DOI: 10.1109/MPAE.2007.376583.

HONG, Ying-Yi; WEI, Yan-Hung; CHANG, Yung-Ruei; LEE, Yih-Der; LIU, Pang-Wei. Fault Detection and Location by Static Switches in Microgrids Using Wavelet Transform and Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System. **Energies**, v. 7, n. 4, p. 2658–2675, 2014.

HOOSHYAR, A.; IRAVANI, R. Microgrid Protection. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 7, p. 1332–1353, 2017. ISSN 0018-9219. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2669342.

HORLING, Bryan; LESSER, Victor. A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms. **The Knowledge Engineering Review**, v. 19, n. 04, p. 281–316, 2004. ISSN 1469-8005.

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, 2014. ISSN 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.012>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414004233>.

HOSSAIN, Md. Alamgir; POTA, Hemanshu; ISSA, Walid; HOSSAIN, M.J. Overview of AC Microgrid Controls with Inverter-Interfaced Generations. **Energies**, v. 10, ago. 2017. DOI: 10.3390/en10091300.

HUBNER, Jomi F; SICHMAN, Jaime S; BOISSIER, Olivier. Developing Organised Multiagent Systems Using the MOISE+ Model: Programming Issues at the System and Agent Levels. **International Journal of Agent-Oriented Software Engineering**, v. 1, n. 3-4, p. 370–395, 2007. ISSN 1746-1375.

HUBNER, Jomi Fred; SICHMAN, Jaime Simao. Organização de Sistemas Multiagentes. **III Jornada de Mini-Cursos de Inteligência Artificial (JAIA03)**, v. 8, p. 247–296, 2003.

HUSSAIN, Akhtar; ASLAM, Muhammad; ARIF, Syed Muhammad. N-Version Programming-Based Protection Scheme for Microgrids: A Multi-Agent System Based Approach. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 6, p. 35–45, 2016. ISSN 2352-4677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.02.001>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467716000126>.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems**. [S./], 2011. P. 1–54. DOI: 10.1109/IEEESTD.2011.5960751.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines**. [S./], 2021. P. 1–106. DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9382208.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems—Part IV: Distribution**. [S.l.], 2015. P. 1–44. DOI: 10.1109/IEEESTD.2015.7010855.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets**. [S.l.]: Organization for Economic Co-operation e Development (OECD/IEA), 2002.

ISHCHENKO, D.; OUDALOV, A.; STOUPIS, J. Protection Coordination in Active Distribution Grids with IEC61850. *In: PES T&D*. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1–6. DOI: 10.1109/TDC.2012.6281478.

JIANG, W.; HE, Z. y.; BO, Z. q. The Overview of Research on Microgrid Protection Development. *In: INTERNATIONAL Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*. [S.l.: s.n.], 2010. P. 692–697. DOI: 10.1109/ISDEA.2010.69.

JIAPENG, Zhang; YINGFEI, Dong. Preventing False Trips of Zone 3 Protection Relays in Smart Grid. **Tsinghua Science and Technology**, v. 20, n. 2, p. 142–154, 2015. DOI: 10.1109/TST.2015.7085627.

KATIRAEI, F.; IRAVANI, R.; HATZIARGYRIOU, N.; DIMEAS, A. Microgrids Management. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 6, n. 3, p. 54–65, 2008. ISSN 1540-7977. DOI: 10.1109/MPE.2008.918702.

KHAZAEI, Ali Akbar; MAHMOUDI, Abdullah. Decentralized Adaptive Protection Structure for Microgrids Based on Multi-Agent Systems. *In: 2019 Iranian Conference on Renewable Energy Distributed Generation (ICREDG)*. [S.l.: s.n.], 2019. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICREDG47187.2019.194143.

KHONGKHACHAT, S.; KHOMFOI, S. Hierarchical Control Strategies in AC Microgrids. *In: 12TH International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. [S.l.: s.n.], 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/ECTICon.2015.7206968.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-Circuito**. [S.l.]: Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan - UFSC), 2010. ISBN 978-85-900853-9-3.

KROPOSKI, B.; LASSETER, R.; ISE, T.; MOROZUMI, S.; PAPATHANASSIOU, S.; HATZIARGYRIOU, N. Making Microgrids Work. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 6, n. 3, p. 40–53, 2008. ISSN 1540-7977. DOI: 10.1109/MPE.2008.918718.

LAI, K.; ILLINDALA, M. S.; HAJ-AHMED, M. A. Comprehensive Protection Strategy for an Islanded Microgrid Using Intelligent Relays. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 1, p. 47–55, 2017. ISSN 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2016.2604203.

LASSETER, Robert; AKHIL, Abbas; MARNAY, Chris; STEPHENS, John; DAGLE, Jeffery; GUTTROMSOM, Ross; MELIOPOULOS, A.P.; YINGER, Robert; ETO, Joe. Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS Microgrid Concept. **Consultant Report prepared for the California Energy Commission**, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS), jan. 2002. DOI: 10.2172/799644.

LASSETER, Robert H; PIAGI, Paolo. Control and Design of Microgrid Components. **Final Project Report**, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS), jan. 2006.

LEMAITRE, C; EXCELENTE, C. B. Multi-Agent Organization Approach. *In*: 2ND Iberoamerican Workshop on Distributed AI and MAS. [S.l.: s.n.], 1998. P. 42–55.

LI, Z. C.; HU, J.; HE, J. H.; YIP, T. A Protection Method for Microgrids Based on Information Sharing. *In*: 12TH IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014). [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–5. DOI: 10.1049/cp.2014.0069.

LIDULA, N. W. A.; RAJAPAKSE, A. D. Microgrids Research: A Review of Experimental Microgrids and Test Systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 186–202, 2011. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.041>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211000328X>.

LIEN, K. Y.; CHEN, S. L.; BUI, D. M.; ZHAO, W. X. A Fast Computing Algorithm for Microgrid Fault Protection System Using Communication-Assisted Digital Relays and Initially Experimental Results. *In*: 7TH International Conference on Information and Automation for Sustainability. [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICIAFS.2014.7069565.

LOPES, J. A. P.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 2, p. 916–924, 2006. ISSN 0885-8950. DOI: 10.1109/TPWRS.2006.873018.

LOUW, C.; BUQUE, C.; CHOWDHURY, S. Modelling and Simulation of an Adaptive Differential Current Protection Scheme for a Solar PV Microgrid. *In: 3RD Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–7. DOI: 10.1049/cp.2014.0894.

MARTIN, Jeremi. Distributed vs. centralized electricity generation: are we witnessing a change of paradigm, 2009.

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, 2016. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.025>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301356>.

MARTINS, Marcos. Design and Implementation of a Feasible Microgrid Model in Brazil. *In: PCIM - Power Conversion and Intelligent Motion South America 2014*. [S.l.: s.n.], out. 2014. P. 1–9.

MISHRA, D. P.; SAMANTARAY, S. R.; JOOS, G. A Combined Wavelet and Data-Mining Based Intelligent Protection Scheme for Microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 5, p. 2295–2304, 2016. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2015.2487501.

MIVEH, M. R.; GANDOMKAR, M.; MIRSAEIDI, S.; GHARIBDOOST, M. R. A Review on Protection Challenges in Microgrids. *In: PROCEEDINGS of 17th Conference on Electrical Power Distribution*. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1–5.

MOHAMED, N. A.; SALAMA, M. M. A. A Review on the Proposed Solutions to Microgrid Protection Problems. *In: IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. [S.l.: s.n.], 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/CCECE.2016.7726697.

MOHAMMADI, J.; AJAEI, F. Badrkhani; STEVENS, G. AC microgrid grounding strategies. *In: 2018 IEEE/IAS 54th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I CPS)*. [S.l.: s.n.], 2018. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICPS.2018.8369994.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 9780471226932.

NASCIMENTO, L. L.; ROLIM, J. G. Multi-Agent System for Adaptive Protection in Microgrids. *In: IEEE PES Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA)*. [S.l.: s.n.], 2013. P. 1–8. DOI: 10.1109/ISGT-LA.2013.6554435.

AL-NASSERI, H.; REDFERN, M. A.; LI, F. A Voltage Based Protection for Micro-Grids Containing Power Electronic Converters. *In: IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2006. 7 pp. DOI: 10.1109/PES.2006.1709423.

NIKKHAJOEI, H.; LASSETER, R. H. Microgrid Protection. *In: IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2007. P. 1–6. DOI: 10.1109/PES.2007.385805.

NTHONTHO, M. P.; CHOWDHURY, S. P.; WINBERG, S.; CHOWDHURY, S. Protection of Domestic Solar Photovoltaic Based Microgrid. *In: 11TH IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)*. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2012.0137.

ODELL, James. Objects and Agents Compared. **Journal of Object Technology**, v. 1, p. 41–53, mai. 2002. DOI: 10.5381/jot.2002.1.1.c4.

OLIVARES, D. E. *et al.* Trends in Microgrid Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2013.2295514.

OMICINI, Andrea; RICCI, Alessandro; VIROLI, Mirko. Artifacts in the A&A Meta-Model for Multi-Agent Systems. **Autonomous agents and multi-agent systems**, v. 17, n. 3, p. 432–456, 2008. ISSN 1387-2532.

PARK, S. J.; LIM, J. T. Modelling and Control of Agent-Based Power Protection Systems Using Supervisors. **IEE Proceedings - Control Theory and Applications**, v. 153, n. 1, p. 92–98, 2006. ISSN 1350-2379. DOI: 10.1049/ip-cta:20050141.

PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESELDONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. Distributed generation: definition, benefits and issues. **Energy Policy**, v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005. ISSN 0301-4215. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421503003069>.

PÉREZ-CARRO, Pascual; GRIMALDO, Francisco; LOZANO, Miguel; ORDUÑA, Juan. Characterization of the Jason Multiagent Platform on Multicore Processors. **Scientific Programming**, v. 22, p. 21–35, jan. 2014. DOI: 10.1155/2014/576907.

PINTO, José Octávio Cesário Pereira. **Inclusão de agentes de proteção de geradores síncronos em um sistema multiagente para proteção de microrredes**. 2015. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

PLET, C. A. **Fault Response of Inverter-Based Distributed Generation**. Mar. 2012. Ph.D. Thesis. DOI: <https://doi.org/10.25560/9537>. Disponível em:
<http://hdl.handle.net/10044/1/9537>.

PLET, C. A.; BRUCOLI, M.; MCDONALD, John DF; GREEN, Timothy C. Fault Models of Inverter-Interfaced Distributed Generators: Experimental Verification and Application to Fault Analysis, 2011. ISSN 1457710013.

PLET, C. A.; GRAOVAC, M.; GREEN, T. C.; IRAVANI, R. Fault Response of Grid-Connected Inverter Dominated Networks. *In: IEEE PES General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2010. P. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2010.5589981.

PRODANOVIC, M.; GREEN, T. C. Control and Filter Design of Three-Phase Inverters for High Power Quality Grid Connection. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 18, n. 1, p. 373–380, 2003. ISSN 0885-8993. DOI: 10.1109/TPEL.2002.807166.

RANJBAR, S.; JAMALI, S. Comprehensive Protection of Medium-Voltage Microgrids. *In: SMART Grid Conference (SGC)*. [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–7. DOI: 10.1109/SGC.2014.7150707.

RAO, Anand S. AgentSpeak (L): BDI Agents Speak Out in a Logical Computable Language. *In: EUROPEAN Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*. [S.l.]: Springer, 1996. P. 42–55.

REIS, Fernando Bereta dos. **Sistema Multiagente para Proteção Adaptativa de Retaguarda de Linha de Distribuição Aplicado em Ambiente de Microrredes**. 2016. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

RICCI, Alessandro; PIUNTI, Michele; VIROLI, Mirko. Environment Programming in Multi-Agent Systems: an Artifact-Based Perspective. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, v. 23, n. 2, p. 158–192, 2011. ISSN 1387-2532.

RICCI, Alessandro; VIROLI, Mirko; OMICINI, Andrea. The A&A Programming Model and Technology for Developing Agent Environments in MAS. *In*: INTERNATIONAL Workshop on Programming Multi-Agent Systems. [S.l.]: Springer, 2007. P. 89–106.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial**. [S.l.]: GEN LTC, 2004. ISBN 978-8535237016.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3rd ed. [S.l.]: Prentice Hall, nov. 2009. ISBN 978-0136042594.

SADEGHKHANI, I.; GOLSHAN, M. E. Hamedani; MEHRIZI-SANI, A.; GUERRERO, J. M.; KETABI, A. Transient Monitoring Function-Based Fault Detection for Inverter-Interfaced Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, PP, n. 99, p. 1–1, 2016. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2016.2606519.

SAHOO, A. K. Protection of Microgrid Through Coordinated Directional Over-current Relays. *In*: IEEE Global Humanitarian Technology Conference - South Asia Satellite (GHTC-SAS). [S.l.: s.n.], 2014. P. 129–134. DOI: 10.1109/GHTC-SAS.2014.6967571.

SALEH, S. A.; AHSHAN, R.; ABU-KHAIZARAN, M. S.; ALSAYID, B.; RAHMAN, M. A. Implementing and Testing $d-q$ WPT-Based Digital Protection for Microgrid Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 50, n. 3, p. 2173–2185, 2014. ISSN 0093-9994.

SAPOUNTZOGLU, Nikolaos; RAISON, Bertrand; SILVA, Nuno. A Fault Localization Method for Single-Phase to Ground Faults in LV Smart Distribution Grids. *In*: ELECTRIMACS 2019. [S.l.]: Springer, 2020. P. 327–338.

SAPOUNTZOGLU, Nikolaos; RAISON, Bertrand; SILVA, Nuno. Fault Detection and Localization in LV Smart Grids. *In*: 2019 IEEE Milan PowerTech. [S.l.: s.n.], 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810799.

SEGHROUCHNI, Amal El Fallah; BORDINI, Rafael H; DIX, Jürgen; DASTANI, Mehdi. **Multi-Agent Programming: Languages, Tools and Applications**. [S.l.]: Springer, 2009. ISBN 0387892982.

SHAOPENG, Tong; JUN, Zhang. A Research on Multi Agent Modeling Language.

Procedia Engineering, v. 15, p. 1842–1847, 2011. ISSN 1877-7058. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.343>. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811018443>.

SHENG, S.; LI, K. K.; CHAN, W. L.; ZENG, X.; SHI, D.; DUAN, X. Adaptive Agent-Based Wide-Area Current Differential Protection System. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 46, n. 5, p. 2111–2117, 2010. ISSN 0093-9994. DOI:

10.1109/TIA.2010.2059452.

TAO, S.; GUO, J.; XIAO, X.; LI, G. Influence Analysis of DG Penetration Levels and Grid-Connected Positions on Traditional Current Protection. *In: IEEE Electrical Power and Energy Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. P. 122–127. DOI:

10.1109/EPEC.2011.6070181.

TEODORESCU, R.; BLAABJERG, F.; LISERRE, M.; LOH, P. C. Proportional-Resonant Controllers and Filters for Grid-Connected Voltage-Source Converters. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, v. 153, n. 5, p. 750–762, 2006. ISSN

1350-2352. DOI: 10.1049/ip-epa:20060008.

TIMBUS, A.; LISERRE, M.; TEODORESCU, R.; RODRIGUEZ, P.; BLAABJERG, F.

Evaluation of Current Controllers for Distributed Power Generation Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 3, p. 654–664, 2009. ISSN 0885-8993.

DOI: 10.1109/TPEL.2009.2012527.

TOMITA, Y.; FUKUI, C.; KUDO, H.; KODA, J.; YABE, K. A Cooperative Protection

System with an Agent Model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 4,

p. 1060–1066, 1998. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/61.714454.

TSIKALAKIS, A. G.; HATZIARGYRIOU, N. D. Centralized Control for Optimizing

Microgrids Operation. *In: IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.],

2011. P. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2011.6039737.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **The Potential Benefits of**

Distributed Generation and Rate-Related Issues that May Impede their

Expansion. A Study Pursuant to Section 1817 of the Energy Policy Act of 2005.

[S.l.], 2007. P. 1–54.

USTUN, T. S.; KHAN, R. H.; HADBAH, A.; KALAM, A. An Adaptive Microgrid Protection Scheme Based on a Wide-Area Smart Grid Communications Network. *In: IEEE Latin-America Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2013. P. 1–5. DOI: 10.1109/LatinCom.2013.6759822.

USTUN, Taha Selim; OZANSOY, Cagil; ZAYEGH, Aladin. Recent Developments in Microgrids and Example Cases Around the World - A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 4030–4041, 2011. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.033>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111002735>.

UZAIR, Muhammad; LI, Li; ZHU, Jian Guo; ESKANDARI, Mohsen. A protection scheme for AC microgrids based on multi-agent system combined with machine learning. *In: 2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. [S.l.: s.n.], 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/AUPEC48547.2019.211845.

VAN TU, Dao; CHAITUSANEY, Surachai; YOKOYAMA, Akihiko. Fault current calculation in distribution systems with inverter-based distributed generations. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 8, n. 5, p. 470–477, 2013. ISSN 1931-4973.

VAZ, M. I. **Controlo de Tensão em Redes de Baixa Tensão por Atuação em Recursos Distribuídos**. 2015. Diss. (Mestrado) – Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto.

WAN, H.; LI, K. K.; WONG, K. P. An Adaptive Multiagent Approach to Protection Relay Coordination With Distributed Generators in Industrial Power Distribution System. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 46, n. 5, p. 2118–2124, 2010. ISSN 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2010.2059492.

WEISS, G. **Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence**. [S.l.]: The MIT press, 1999. ISBN 0262731312.

WHEELER, K. A.; FARIED, S. O.; ELSAMAHY, M. A Microgrid Protection Scheme Using Differential and Adaptive Overcurrent Relays. *In: IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. [S.l.: s.n.], 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/EPEC.2017.8286150.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multiagent Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons LTD, 2009. ISBN 0470519460.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. Intelligent Agents: Theory and Practice. **The knowledge engineering review**, v. 10, n. 02, p. 115–152, 1995. ISSN 1469-8005.

WOOLDRIDGE, Michael; CIANCARINI, Paolo. Agent-Oriented Software Engineering: The State of the Art. *In*: INTERNATIONAL Workshop on Agent-Oriented Software Engineering. [S.l.]: Springer, 2000. P. 1–28.

XU, Y.; PING, Y.; QUNRU, Z.; PENG, L.; JINYONG, L. Strategy Research of Low Voltage Photovoltaic Microgrid Protection. *In*: IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/APPEEC.2014.7066030.

YU, J. J. Q.; HOU, Y.; LAM, A. Y. S.; LI, V. O. K. Intelligent Fault Detection Scheme for Microgrids with Wavelet-Based Deep Neural Networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, PP, n. 99, p. 1–1, 2017. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2017.2776310.

ZAMANI, M. A.; SIDHU, T. S.; YAZDANI, A. A Protection Strategy and Microprocessor-Based Relay for Low-Voltage Microgrids. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 3, p. 1873–1883, 2011. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2120628.

ZAREI, S. F.; PARNIANI, M. A Comprehensive Digital Protection Scheme for Low-Voltage Microgrids with Inverter-Based and Conventional Distributed Generations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 1, p. 441–452, 2017. ISSN 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2566264.

ZHOU, L.; NIU, G.; QI, Z. Ping; GAO, G. Hua; XU, Y. Gang. Fault Transient Analysis in Microgrid Using Discrete Wavelet Transform. *In*: 5TH International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). [S.l.: s.n.], 2015. P. 1025–1029. DOI: 10.1109/DRPT.2015.7432381.

ZHU, Yongli; SONG, Shaoqun; WANG, Dewen. Multiagents-Based Wide Area Protection With Best-Effort Adaptive Strategy. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 31, n. 2, p. 94–99, 2009. ISSN 0142-0615.

APÊNDICE A – DADOS DA MICRORREDE 1

Os dados apresentados neste apêndice fazem referência aos parâmetros utilizados na modelagem da Microrrede 1, representada pelo diagrama unifilar da Figura 23, no Capítulo 6.

A.1 EQUIVALENTE CONCESSIONÁRIA

A rede principal foi modelada como uma fonte de tensão ideal em série com uma impedância equivalente seguindo o modelo proposto por (CIGRE, 2014), que se baseia nos parâmetros apresentados no Quadro 18.

Quadro 18 – Dados do equivalente da rede principal da modelagem da Microrrede 1.

Tensão nominal do sistema [kV]	Potência de curto-circuito [MVA]	Razão R/X
20	100	1

Fonte – CIGRE (2014), editado pelo autor.

A.2 TRANSFORMADOR

Ainda baseado nos parâmetros propostos por (CIGRE, 2014), o transformador TR1 da Microrrede 1 foi modelado com base nos dados apresentados no Quadro 19.

Quadro 19 – Dados do transformador TR1 da Microrrede 1.

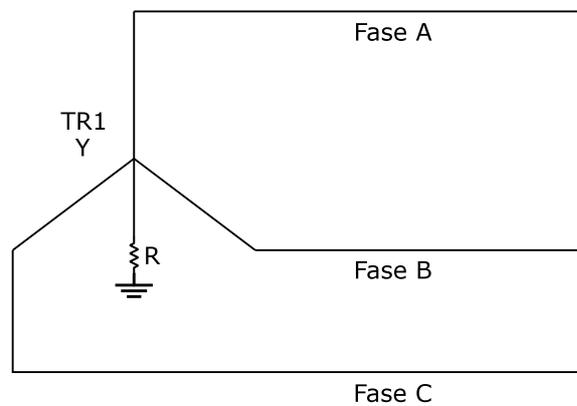
Conexão	Tensão primária [kV]	Tensão secundária [kV]	Impedância referente ao secundário [Ω]	Potência aparente nominal [kVA]	Aterramento [Ω]
Trifásico, Dyn1	20	0,4	0,0032+j0,0128	500	3

Fonte – CIGRE (2014), editado pelo autor.

A.3 SISTEMA DE ATERRAMENTO

O sistema teste Microrrede 1 foi modelado com características de sistemas de distribuição de energia de 3 condutores, com ponto único de aterramento. Sendo assim, o aterramento deste modelo de microrrede é feito pelo transformador TR1, utilizando-se a resistência de aterramento especificada no Quadro 19. Na Figura 65 é ilustrado o diagrama representativo do tipo de aterramento utilizado.

Figura 65 – Diagrama representativo do tipo de aterramento utilizado na Microrrede 1.



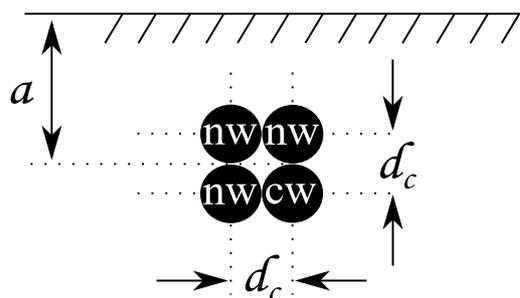
Fonte – Mohammadi *et al.* (2018), editado pelo autor.

A.4 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

As linhas de distribuição desta microrrede teste foram modeladas considerando uma rede de distribuição subterrânea com base nos parâmetros propostos em (CIGRE, 2014). Na Tabela 16 são apresentados os comprimentos das linhas de distribuição, enquanto que na Figura 66 e no Quadro 20 são apresentados dados referentes aos condutores.

Na Figura 66 é apresentada a disposição dos cabos subterrâneos, onde nw representa o condutor neutro, cw representa os condutores de fase, d_c representa a distância entre os condutores e a representa a profundidade em que os cabos se encontram.

Figura 66 – Disposição de cabos em redes subterrâneas de baixa tensão.



Fonte – CIGRE (2014), editado pelo autor.

O Quadro 20 apresenta os valores para as variáveis denotadas na Figura 66, além de dispor novos parâmetros para a modelagem das linhas de distribuição. Duas

Tabela 16 – Comprimentos das linhas de distribuição da Microrrede 1.

Barra de origem	Barra de destino	Comprimento [m]
1	2	35
2	3	35
2	8	35
3	4	35
3	5	105
5	6	35
5	7	35
8	9	35
8	10	35
10	11	35
10	12	35
12	13	140
12	14	70
14	15	35
14	16	105
16	17	35
16	18	35

Fonte – próprio autor.

novas variáveis são apresentadas neste quadro: R_{ac} , representa a resistência do cabo por quilômetro, e GMR , que representa o raio médio geométrico.

Quadro 20 – Dados de cabos subterrâneos da Microrrede 1.

Tipo de condutor	Bitola [mm ²]	d_c [cm]	R_{ac} [Ω /km]	GMR [cm]	a [m]
NA2XY	240	1,75	0,162	0,634	0,90

Fonte – CIGRE (2014), editado pelo autor.

As linhas de distribuição foram modeladas como uma resistência em série com uma indutância. Devido as curtas distâncias de linhas de distribuição em redes de baixa tensão, as capacitâncias por unidade de comprimento dos cabos foram desconsideradas. O valor da indutância da linha de distribuição da microrrede foi calculado de

acordo com a Equação (1) apresentada em (GROBLER, 2007).

$$L = 2 \times 10^{-7} \times \ln \left(\frac{GMD}{GMR} \right) \text{ [H/m]} \quad (1)$$

A.5 CARGAS

As cargas da Microrrede 1 foram modeladas como cargas trifásicas equilibradas como uma combinação paralela de elementos resistivo, capacitivo e indutivo. As potências absorvidas pelas cargas, com fator de potência indutivo de 0,95, são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Cargas da Microrrede 1.

Barra	S [kVA]
1	0,0
2	0,0
3	0,0
4	110,0
5	0,0
6	55,0
7	15,0
8	0,0
9	110,0
10	0,0
11	0,0
12	0,0
13	55,0
14	0,0
15	35,0
16	0,0
17	15,0
18	35,0
Total:	430,0

Fonte – próprio autor.

A.6 GERAÇÃO DISTRIBUIDA COM CONEXÃO VIA CONVERSORES ESTÁTICOS

Conforme mencionado no Capítulo 4, dois tipos de IBDGs foram modelados neste trabalho. Ambos os modelos foram utilizados na modelagem da Microrrede 1. Na Tabela 18 é apresentado os valores de potência aparente trifásica por barra do sistema teste. As unidades geradoras conectadas às barras 6 e 9 são do tipo IBDG Modelo 2*, enquanto que o restante das unidades geradoras conectadas às demais barras são do tipo IBDG Modelo 1. A conexão do gerador à diesel não é representada nesta tabela.

Tabela 18 – Potência trifásica por barra, provenientes das IBDGs da Microrrede 1.

Barra	S [kVA]	0.3*S [kVA]
1	0,0	0,0
2	0,0	0,0
3	0,0	0,0
4	170,0	51,0
5	0,0	0,0
6	100,0	100,0*
7	25,0	7,5
8	0,0	0,0
9	100,0	100,0*
10	0,0	0,0
11	0,0	0,0
12	0,0	0,0
13	45,0	13,5
14	0,0	0,0
15	0,0	0,0
16	0,0	0,0
17	20,0	6,0
18	110,0	33,0
Total:	570,0	111,0

Fonte – próprio autor.

* A geração de IBDGs Modelo 2 não são alteradas para o cenário de microrrede com 30% da capacidade máxima de geração por parte das IBDGs.

A.7 GERADOR À DIESEL

Conforme mencionado no Capítulo 6, o gerador à diesel da microrrede foi modelado como uma fonte ideal de tensão, em série com uma resistência e uma indutância. Tais valores foram calculados com base no catálogo de especificações técnicas da comercializadora de geradores e motores *Marelli Motori Group* (FKI, 2005). O modelo de gerador escolhido como base para a modelagem desta fonte de energia foi o *Three-phase Synchronous Generator 4 poles MJB 315 SB 4*, cujas especificações técnicas utilizadas na modelagem são apresentadas no Quadro 21. Esta unidade geradora está conectada à barra 9 da Microrrede 1, e é referida como DGEN no diagrama da Figura 23.

Quadro 21 – Dados gerador MJB 315 SB 4.

Ligação	Frequência [Hz]	Tensão nominal [V]	Potência aparente nominal [kVA]	Potência ativa nominal [kW]	Reatância subtransitória de eixo direto (X''_d)	Resistência por fase [$m\Omega$]
Estrela série	50	400	350	280	14,0	12,5

Fonte – FKI (2005), editado pelo autor.

APÊNDICE B – DADOS DA MICRORREDE 2

Os dados apresentados neste apêndice fazem referência aos parâmetros utilizados na modelagem da Microrrede 2, representada pelo diagrama unifilar da Figura 24, no Capítulo 6.

B.1 EQUIVALENTE CONCESSIONÁRIA

Para o equivalente de rede principal da modelagem da Microrrede 2 foram utilizados os mesmos parâmetros do equivalente de rede principal da Microrrede 1, apresentados no Quadro 18.

B.2 TRANSFORMADOR

Assim como na modelagem da Microrrede 1, o transformador TR1 da Microrrede 2 foi modelado com base nos parâmetros apresentados em (CIGRE, 2014), conforme dados apresentados no Quadro 22.

Quadro 22 – Dados do transformador TR1 da Microrrede 2.

Conexão	Tensão primária [kV]	Tensão secundária [kV]	Impedância referente ao secundário [Ω]	Potência aparente nominal [kVA]	Aterramento [Ω]
Trifásico, Dyn1	20	0,4	$0,0107+j0,0427$	150	3

Fonte – CIGRE (2014), editado pelo autor.

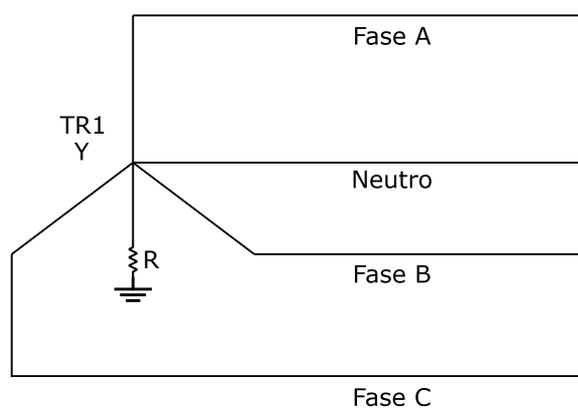
B.3 SISTEMA DE ATERRAMENTO

Para a Microrrede 2, foi utilizado o sistema de aterramento de redes de distribuição de 4 condutores, com um único ponto de aterramento. Sendo assim, o aterramento da microrrede é feito pelo transformador TR1, utilizando-se a resistência de aterramento especificada no Quadro 22. Na Figura 67 é ilustrado o diagrama representativo do tipo de aterramento utilizado neste sistema teste.

B.4 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

As linhas de distribuição da Microrrede 2 foram modeladas conforme parâmetros apresentados na Quadro 23. Nesta tabela constam os valores referentes à impedância dos condutores de fase e do condutor de neutro, bem como os comprimentos das linhas de distribuição.

Figura 67 – Diagrama representativo do tipo de aterramento utilizado na Microrrede 2.



Fonte – Mohammadi *et al.* (2018), editado pelo autor.

Quadro 23 – Parâmetros de linhas da Microrrede 2.

Barra origem	Barra destino	R_{fase} [Ω /km]	X_{fase} [Ω /km]	R_{neutro} [Ω /km]	X_{neutro} [Ω /km]	Comprimento [m]
1	2	0,667	0,100	0,667	0,100	85
1	3	0,476	0,100	0,476	0,100	40
1	4	0,667	0,100	0,667	0,100	55
2	5	0,476	0,100	0,476	0,100	65
3	6	0,641	0,150	0,641	0,150	120
3	7	0,667	0,100	0,667	0,100	105
4	8	0,667	0,100	0,667	0,100	100
5	9	0,667	0,100	0,667	0,100	70
5	10	2,970	0,150	2,970	0,150	35
5	11	2,080	0,100	2,080	0,100	105
6	12	2,080	0,100	2,080	0,100	140
7	13	0,667	0,100	0,667	0,100	35
8	14	3,060	0,150	3,060	0,150	65
8	15	1,910	0,150	1,910	0,150	65
9	16	0,667	0,100	0,667	0,100	35

Continua...

Quadro 23 – Parâmetros de linhas da Microrrede 2. (continuação)

Barra de origem	Barra de destino	R por fase [Ω/km]	X por fase [Ω/km]	R de neutro [Ω/km]	X de neutro [Ω/km]	Comprimento [m]
11	17	7,130	0,150	7,130	0,150	35
11	18	1,910	0,150	1,910	0,150	50
12	19	0,476	0,100	0,476	0,100	80
13	20	1,910	0,150	1,910	0,150	80
13	21	4,610	0,150	4,610	0,150	105
14	22	7,130	0,150	7,130	0,150	170
15	23	1,910	0,150	1,910	0,150	140
16	24	1,330	0,100	1,330	0,100	35
18	25	4,610	0,150	4,610	0,150	35
19	26	0,476	0,100	0,476	0,100	50
20	27	2,080	0,100	2,080	0,100	90
23	28	4,450	0,100	4,450	0,100	210
24	29	4,610	0,150	4,610	0,150	40
26	30	1,330	0,100	1,330	0,100	40
27	31	3,060	0,150	3,060	0,150	70
28	32	4,610	0,150	4,610	0,150	70
31	33	4,610	0,150	4,610	0,150	35

Fonte – (VAZ, 2015).

B.5 CARGAS

As potências absorvidas pelas cargas pelas cargas da Microrrede 2, por fase, são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Cargas ($\text{tg}(\phi)=0,4$).

Barra	S_A [kVA]	S_B [kVA]	S_C [kVA]
1	0,00	0,00	0,00
2	3,45	3,45	0,00
Continua...			

Tabela 19 – Cargas ($\text{tg}(\phi)=0,4$). (continuação)

Barra	S_A [kVA]	S_B [kVA]	S_C [kVA]
3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	3,45
6	1,15	0,00	0,00
7	10,35	0,00	0,00
8	3,45	3,45	3,45
9	6,90	3,45	3,45
10	3,45	13,80	0,00
11	3,45	0,00	6,90
12	3,45	3,45	0,00
13	6,90	3,45	3,45
14	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	6,90	0,00
17	13,80	0,00	0,00
18	0,00	3,45	3,45
19	3,45	3,45	0,00
20	0,00	3,45	3,45
21	0,00	0,00	0,00
22	10,35	3,45	3,45
23	0,00	0,00	3,45
24	20,70	17,25	20,70
25	0,00	3,45	13,80
26	0,00	13,80	0,00
27	6,90	3,45	3,40
28	0,00	0,00	0,00
29	3,45	3,45	10,35
			Continua...

Tabela 19 – Cargas ($\text{tg}(\phi)=0,4$). (continuação)

Barra	S_A [kVA]	S_B [kVA]	S_C [kVA]
30	0,00	0,00	13,80
31	0,00	6,90	0,00
32	0,00	3,45	3,45
33	0,00	0,00	3,45
Total:	101,20	103,50	103,50

Fonte – (VAZ, 2015).

B.6 GERAÇÃO DISTRIBUIDA COM CONEXÃO VIA CONVERSORES ESTÁTICOS

Diferentemente da Microrrede 1, a geração distribuída na Microrrede 2 possui somente IBDGs modeladas conforme o tipo IBDG Modelo 1 apresentado no Capítulo 4. As potências das IBDGs da Microrrede 2, por barra e por fase, são apresentadas na Tabela 20. A conexão do gerador à diesel não é representada nesta tabela.

Tabela 20 – Geração distribuída (somente IBDGs).

Barra	S_A [kVA]	S_B [kVA]	S_C [kVA]
1	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000
7	5,175	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000
9	3,450	1,725	1,725
10	1,725	6,900	0,000
11	1,725	0,000	3,450
12	0,000	0,000	0,000
13	3,450	1,725	1,725
14	0,000	0,000	0,000
			Continua...

Tabela 20 – Geração distribuída (somente IBDGs).

Barra	S_A [kVA]	S_B [kVA]	S_C [kVA]
15	0,000	0,000	0,000
16	0,000	3,450	0,000
17	3,900	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000
21	0,000	0,000	0,000
22	5,175	1,725	1,725
23	0,000	0,000	0,000
24	10,350	8,625	10,350
25	0,000	1,725	6,900
26	0,000	6,900	0,000
27	3,450	1,725	1,725
28	0,000	0,000	0,000
29	1,725	1,725	5,175
30	0,000	0,000	6,900
31	0,000	3,450	0,000
32	0,000	0,000	0,000
33	0,000	0,000	0,000
Soma:	40,125	39,675	39,675

Fonte – (VAZ, 2015).

B.7 GERADOR À DIESEL

Assim como para a Microrrede 1, a Microrrede 2 também teve a modelagem do gerador à diesel realizada como uma fonte ideal de tensão, em série com uma resistência e uma indutância. Os valores também foram calculados com base no catálogo de especificações técnicas da comercializadora de geradores e motores *Marelli Motori Group* (FKI, 2005). O modelo de gerador escolhido como base para a modelagem unidade geradora foi o *Three-phase Synchronous Generator 4 poles MJB 225 LA 4*, cu-

As especificações técnicas utilizadas na modelagem são apresentadas no Quadro 24. Esta unidade geradora está conectada à barra 4 da Microrrede 2, e é referida como DGEN no diagrama da Figura 24.

Quadro 24 – Dados gerador MJB 225 LA 4.

Ligação	Frequência [Hz]	Tensão nominal [V]	Potência aparente nominal [kVA]	Potência ativa nominal [kW]	Reatância subtransitória de eixo direto (X''_d)	Resistência por fase [$m\Omega$]
Estrela série	50	400	132	106	9,5	0,045

Fonte – FKI (2005), editado pelo autor.