

Fernando Bereta dos Reis

**SISTEMA MULTIAGENTE PARA PROTEÇÃO ADAPTATIVA
DE RETAGUARDA DE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO APLICADO
EM AMBIENTE DE MICRORREDES**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Professora, Jacqueline
Gisèle Rolim, Dra. Eng. - UFSC

Florianópolis
2016

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

Reis, Fernando Bereta dos

Sistema multiagente para proteção adaptativa de
retaguarda de linha de distribuição aplicado em ambiente de
microrredes / Fernando Bereta dos Reis ; orientadora,
Jacqueline Gisèle Rolim - Florianópolis, SC, 2016.
142 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistema multiagente. 3.
Proteção de microrredes. 4. Proteção de sobrecorrente
adaptativa. I. Rolim, Jacqueline Gisèle. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

Fernando Bereta dos Reis

**SISTEMA MULTIAGENTE PARA PROTEÇÃO ADAPTATIVA
DE RETAGUARDA DE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO APLICADO
EM AMBIENTE DE MICRORREDES**

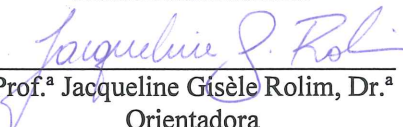
Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 3 de Junho de 2016.

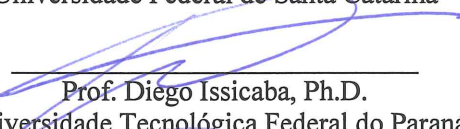


Prof. Carlos Galup Montoro, Dr.
Coordenador do Curso

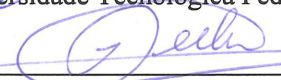
Banca Examinadora:



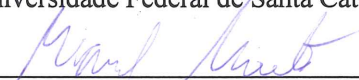
Prof.ª Jacqueline Gisèle Rolim, Dr.ª
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Diégo Issicaba, Ph.D.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Miguel Moreto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus
colegas, orientador e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à Deus pela vida e a minha família, Fernando Soares dos Reis (Pai), Ângela Maria Bereta dos Reis (Mãe), Fernanda Bereta dos Reis (Irmã) e Lívia Maria Bereta dos Reis (Irmã). Tive muito apoio de toda a minha grande família, avós, tios, tias, etc., nos momentos mais difíceis foram eles que me mantiveram firme, encorajando a ir em frente. A minha namorada Maria Vitoria Viera Capote Gonzaga ficou responsável pelo apoio presencial, muito obrigado.

À minha orientadora, Jacqueline Gisèle Rolim, por toda sua grande dedicação, atenção, compreensão, paciência, experiência, e colaboração para que a dissertação de mestrado fosse concluída de maneira satisfatória. Não tenho palavras para agradecer a professora Jacqueline, em todos os momentos me auxiliou muito mais do que jamais avia esperado, sempre fazendo seu máximo. Também ao professor Diego Issicaba que auxiliou no desenvolvimento da dissertação.

Agradecer aos professores do programa, pela dedicação ao ensino, Jacqueline Gisele Rolim, Roberto De Souza Salgado, Katia Campos De Almeida, Miguel Moreto, Antônio José Alves Simões Costa, Aguinaldo Silveira E Silva, Erlon Cristian Finardi, Patrick Kuo Peng, Nelson Sadowski, Geraldo Kindermann, Diego Issicaba e Mauro Augusto Da Rosa. Agradecimento em especial para Erlon Cristian Finardi, Patrick Kuo Peng, Diego Issicaba e Jacqueline Gisele Rolim.

Aos meus amigos e colegas de classe que fizeram parte desta trajetória e foram fundamentais para que eu pudesse concluir o curso, Bráulio Rangel, Daniel Tenfen, Edwin Giraldo, Fernando Correa, Guido Moraes, Gustavo Gutierrez, Jean Colombo, Júlia Kuhl, Kauana Palma, Karila Palma, Franciele Cicconet, Mariana Nau, Marco Zarzosa, João Yokoyama, Leandro De Marchi, Pablo Galvis, José Pinto, Paulo Sehn, Rafael Costa, Sara Einsfeld, Malinwo Estone Ayikpa, Camila Becker e Rodolfo Mussiato. Agradecimento em especial para José Pinto, Edwin Giraldo e Jean Colombo, pelo amparo indispensável que me proporcionaram ao longo do curso.

À Universidade Federal de Santa Catarina e a CAPES, por proporcionarem recursos e incentivo financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.

A satisfação do carpinteiro é ver que seu trabalho não está empenado, que as juntas estão bem alinhadas, que o plano de trabalho foi bem elaborado e tudo se encaixa, e que o acabamento não está limitado a algumas sessões. Isto é essencial.

(Miyamoto Musashi, 1645)

RESUMO

Este trabalho propõe um esquema de proteção de retaguarda de sobrecorrente direcional adaptativo para as linhas de uma microrrede baseado na utilização de Sistemas Multiagentes. Esta função de proteção foi escolhida devido a necessidade de proteção de retaguarda para as linhas da microrrede. A proteção primária da microrrede utiliza uma arquitetura multiagente hierárquica, que já havia sido proposta em trabalhos anteriores, e depende do sistema de comunicação para sua operação. Os geradores síncronos da microrrede possuem diversas proteções de retaguarda, que também já haviam sido propostas. A proteção adaptativa de retaguarda de linha, foco do trabalho, utiliza um agente extra, o qual é responsável pelo planejamento da coordenação das proteções de sobrecorrente e, caso necessário, o mesmo calcula novos ajustes de proteção. Todas as estratégias de proteção foram programadas em linguagem JAVA, utilizando os recursos oferecidos pelo framework JADE (Java Agent Development Framework). A validação do sistema de proteção multiagente adaptativo de retaguarda proposto é realizado através de simulações. Para a realização das simulações uma microrrede baseada em uma rede de distribuição real, que foi adaptada para apresentar possibilidade de operação, tanto ilhada quanto conectada à concessionária, foi escolhida como sistema teste. A microrrede do caso teste foi modelada no *software* PSCAD/EMTDC. No mesmo *software* diversas situações de falta foram realizadas para a validação do sistema de proteção proposto. Os resultados apresentados comprovam a eficácia do sistema multiagente de proteção proposto.

Palavras-chave: Sistema Multiagente, Proteção de Microrredes e Proteção de Sobrecorrente Adaptativa.

ABSTRACT

This dissertation proposes an adaptive directional overcurrent backup protection scheme for the lines of a microgrid, based on the use of Multi-Agent Systems. This protection function was chosen in order to supply the need for microgrid lines backup protection. The primary protection of the microgrid makes use of a hierarchical multi-agent architecture that had been proposed in previous works and its operation depends on the communication system. The synchronous generators of the microgrid have several backup protections functions, who have also been previously proposed. An adaptive line backup protection is the focus of the present work. It utilizes an additional agent, which is responsible for planning the coordination of overcurrent protections functions, and if necessary, it calculates new protection settings. All these protection strategies have been programmed in Java language, using the resources offered by the JADE framework (Java Agent Development Framework). The validation of the proposed backup adaptive multi-agent protection system is carried out by simulations. It was chosen a microgrid test system based on a real distribution network, which has been adapted to present possibility of operating both as islanded mode and connected to de main grid mode, to perform the simulations. The microrrede test case was modeled in PSCAD / EMTDC software. In the same software various faults situations were performed to validate the proposed protection system. The presented results demonstrate the effectiveness of the proposed multi-agent protection scheme.

Keywords: Multi-Agent Systems, Protection of Microgrids e Adaptive Overcurrent Protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Agente e seu ambiente	26
Figura 2.2 Arquitetura do robô	28
Figura 2.3 PRS (<i>Procedural Reasoning System</i>).....	30
Figura 2.4 Tipos de arquiteturas em camadas	31
Figura 2.5 Organização hierárquica	33
Figura 2.6 Sistema especialista básico	34
Figura 2.7 Sistema de comunicação	35
Figura 2.8 Protocolo requisição de interação	39
Figura 2.9 Cancelamento do protocolo de interação	40
Figura 2.10 Arquitetura JADE	41
Figura 3.1 Topologias de distribuição	44
Figura 3.2 Sistema porta fusível e cartucho	46
Figura 3.3 Curvas de atuação do relé de sobrecorrente.....	48
Figura 3.4 Coordenação de relés	50
Figura 3.5 Tipos de Proteção de Microrredes	51
Figura 3.6 Proteção diferencial, gerador síncrono.....	63
Figura 3.7 Curva de operação.....	63
Figura 3.8 Característica da proteção 51V	64
Figura 4.1 Arquitetura multiagente	67
Figura 4.2 Camadas horizontais do agente relé.....	68
Figura 4.3 Histórico da corrente de uma das fases vista por um relé, no início de um curto-circuito.	69
Figura 4.4 Comunicação, análise <i>on-line</i>	73
Figura 4.5 Exemplo de comunicação, análise <i>on-line</i>	74
Figura 4.6 Proteção direcional de sobrecorrente temporizado	77
Figura 4.7 Proteção de sobrecorrente temporizada	78
Figura 4.8 Atualização da corrente normal	80
Figura 4.9 Linhas em paralelo, perda de continuidade em uma.	81
Figura 4.10 Fluxograma geral do agente seletividade.....	82
Figura 4.11 Subprocesso 1	83
Figura 4.12 Subprocesso 4	84
Figura 4.13 Sistema exemplo	85
Figura 4.14 Coordenação, sentido horário	86
Figura 4.15 Coordenação, sentido anti-horário	86
Figura 4.16 Comunicação, agente seletividade	87
Figura 4.17 Mensagem M-5	88
Figura 4.18 Mensagem M-6	89
Figura 4.19 Comunicação, entre agentes relé.....	90
Figura 5.1 Micrrrede, sistema teste	94

Figura 5.2 Exemplos de elementos do PSCAD	96
Figura 5.3 Arquivo de configurações.....	98
Figura 5.4 Arquivo de saída.....	99
Figura 5.5 Arquivos de entrada e saída do interprete.....	100
Figura 5.6 Falta na barra 10, microrrede conectada a concessionária. 103	
Figura 5.7 Comunicação ao agente coordenador, falta na barra 10	106
Figura 5.8 Comunicação entre agentes, falta na barra 10	107
Figura 5.9 Falta na barra 10, microrrede ilhada.....	109
Figura 5.10 Falta na linha 4, microrrede conectada a concessionária. 112	
Figura 5.11 Comunicação entre agentes, falha na linha 4.....	113
Figura 5.12 Falta na linha 4, microrrede ilhada	115
Figura 5.13 Alteração de carga, microrrede ilhada	117
Figura 5.14 Comunicação análise <i>off-line</i>	118
Figura 5.15 Falta na linha 3, microrrede conectada a concessionária. 120	
Figura 5.16 Comunicação entre agentes, falha na linha 3.....	122
Figura 5.17 Comunicação, análise <i>off-line</i>	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Atos de Comunicação FIPA	36
Tabela 2.2 Parâmetros da mensagem ACL	37
Tabela 3.1 Nível de Sobretensão e tempo sem danos ao gerador.....	61
Tabela 5.1 Dados do sistema teste.....	94
Tabela 5.2 SMA análise <i>on-line</i> , falta na barra 10, microrrede conectada	105
Tabela 5.3 SMA análise <i>off-line</i> , falta na barra 10, microrrede conectada	108
Tabela 5.4 SMA análise <i>on-line</i> , falta na barra 10, microrrede ilhada	110
Tabela 5.5 SMA análise <i>off-line</i> , falta na barra 10, microrrede ilhada	111
Tabela 5.6 SMA análise <i>on-line</i> , falta na linha 4, microrrede conectada	112
Tabela 5.7 SMA análise <i>off-line</i> , falta na linha 4, microrrede conectada	114
Tabela 5.8 SMA análise <i>on-line</i> , falta na linha 4, microrrede ilhada..	114
Tabela 5.9 SMA análise <i>off-line</i> , falta na linha 4, microrrede ilhada..	116
Tabela 5.10 SMA análise <i>off-line</i> , falta na linha 5, microrrede ilhada	119
Tabela 5.11 SMA análise <i>off-line</i> , falta na linha 5, microrrede ilhada	119
Tabela 5.12 SMA análise <i>on-line</i> , falta na linha 3, microrrede conectada	121
Tabela 5.13 SMA análise <i>off-line</i> , falta na linha 3, microrrede conectada	123

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS.....	22
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	23
2	SISTEMAS MULTIAGENTES	25
2.1	CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES	25
2.1.1	Agente.....	26
2.1.2	Arquitetura	27
2.1.2.1	Base lógica (do inglês <i>logic-based</i> ou <i>symbolic</i>).....	27
2.1.2.2	Reativo ou não-deliberativas	28
2.1.2.3	BDI.....	29
2.1.2.4	Camadas	31
2.1.3	Evitando inconsistências em SMA	32
2.1.4	Sistema especialista	34
2.2	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO.....	35
2.2.1	FIPA-ACL.....	36
2.2.1.1	Protocolo de requisição de interação FIPA	38
2.3	JADE	40
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
3	MICRORREDES E SEUS SISTEMAS DE PROTEÇÃO	43
3.1	MICRORREDES	43
3.2	SISTEMAS DE PROTEÇÃO	45
3.3	PROTEÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	45
3.3.1	Sobrecorrente instantâneo 50 e 50N	47
3.3.2	Sobrecorrente temporizado 51 e 51N.....	47
3.3.2.1	Seletividade na proteção 51	49
3.4	PROTEÇÃO DE MICRORREDES REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	51
3.4.1	Proteção diferencial.....	52
3.4.2	Proteção de distância.....	53
3.4.3	Proteção baseada na tensão	53
3.4.4	Implantação de dispositivos externos.....	54
3.4.5	Proteção baseada na corrente e componentes de sequência	54
3.4.6	Proteção adaptativa.....	55
3.5	PROTEÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS	61
3.5.1	Sobretensão e Subtensão.....	61
3.5.1.1	Implementação da sobretensão instantânea 59I.....	62
3.5.1.2	Implementação da sobretensão instantânea 27I.....	62
3.5.1.3	Implementação da sobretensão/subtensão temporizada 59T 27T ...	62
3.5.2	Proteção diferencial percentual 87.....	62
3.5.3	Sobrecorrente temporizada com restrição de tensão 51V.....	64
3.5.4	Sobrecorrente temporizada de neutro 51G.....	65

3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
4	METODOLOGIA PROPOSTA.....	66
4.1	ARQUITETURA PROPOSTA PARA O SISTEMA	
MULTIAGENTE		66
4.1.1	Arquitetura do agente relé	67
4.1.2	Análise <i>on-line</i>	68
4.1.2.1	Agente relé (<i>on-line</i>)	69
4.1.2.2	Agente coordenador	70
4.1.2.3	Agente configurador.....	72
4.1.2.4	Fluxo de mensagens	72
4.1.3	Análise <i>off-line</i> (foco do trabalho).....	75
4.1.3.1	Agente relé (<i>off-line</i>)	76
4.1.3.2	Agente seletividade	81
4.1.3.3	Exemplo do algoritmo seletividade	84
4.1.3.4	Fluxo de mensagens	87
4.2	NOMENCLATURA DAS ANÁLISES	90
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5	SISTEMA TESTE, SIMULAÇÕES E RESULTADOS..	93
5.1	SISTEMA TESTE.....	93
5.1.1	Nomenclatura dos relés.....	95
5.2	ETAPAS PARA A SIMULAÇÃO	95
5.2.1	PSCAD	96
5.2.2	Arquivos de saída, PSCAD.....	98
5.2.3	Arquivo de entrada, análise <i>on-line</i>	101
5.2.4	Arquivo de entrada, análise <i>off-line</i>.....	101
5.2.5	Resultados	102
5.3	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	102
5.3.1	Falha na barra 10	103
5.3.1.1	Microrrede conectada à concessionária	103
5.3.1.2	Microrrede ilhada	108
5.3.2	Falta na linha 4, a 15% de distância da barra 6	111
5.3.2.1	Microrrede conectada à concessionária	111
5.3.2.2	Microrrede ilhada	114
5.3.3	Importância do agente seletividade	116
5.3.3.1	Presença do agente seletividade (<i>off-line</i>)	117
5.3.3.2	Sem o agente seletividade (<i>off-line</i>)	119
5.3.4	Falta nas linhas em paralelo	120
5.3.4.1	Microrrede conectada à concessionária	120
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
6	CONCLUSÕES	127
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	128
7	REFERÊNCIAS	129
APÊNDICE A	REGRAS DOS SISTEMAS ESPECIALISTA ..	139
ANEXO A	DADOS DO SUBSISTEMA REAL.....	141

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) têm se modificado consideravelmente nos últimos anos. O SEP ainda é fortemente caracterizado por estruturas centralizadas, possuindo (quase que exclusivamente) grandes centrais geradoras de energia elétrica, conectadas através de longas linhas de transmissão, com consideráveis perdas e impactos ambientais. O convencional SEP está se modificando devido às dificuldades de expansão ocasionadas pelo elevado investimento inicial necessário para financiar novas grandes usinas e para expandir a rede de transmissão (Barbosa Filho e De Azevedo, 2013). Por outro lado, as redes de distribuição que neste contexto eram passivas e a grande maioria possuía topologia radial, apresentando exclusivamente fluxo de potência unidirecional, da concessionária ao consumidor, se modificaram com a inserção de geração distribuída (GD).

Geração distribuída significa geração de energia elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores e é inserida de modo a evitar ou postergar grandes investimentos na geração. Devido à proximidade da GD ao consumidor as perdas de transmissão de energia são reduzidas. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), é definida microgeração distribuída quando a potência instalada igual ou inferior a 75 kW e minigeração distribuída para potência instalada acima de 75 kW e abaixo de 5 MW (3 MW para fonte hídrica). Algumas tecnologias de geração distribuída dificultam o cálculo de sua contribuição de corrente de curto-circuito durante faltas, tornando mais complexo o uso de sistemas de proteção baseados na corrente.

A presença de GD no sistema de distribuição pode ocasionar outras dificuldades técnicas: flutuação de tensão, fluxo de potência bidirecional e alteração dos valores nominais de correntes de curto-circuito (Barker e De Mello, 2000). GDs próximas à carga apresentam as vantagens de: reduzirem as perdas de transmissão de energia, incrementarem a utilização de fontes de energias alternativas e aumentarem a capacidade de geração de energia do sistema, podendo evitar ou postergar grandes investimentos no SEP. No Brasil as tendências de produtores independentes, autoprodutores e consumidores com geração já foram sinalizadas, por exemplo, pelo decreto Nº 2.003, de 10/09/1996 e pela Agência Nacional de Energia Elétrica, que através da resolução normativa 482, publicada em 17/04/12, regulamenta a micro e a mini produção de energia.

O surgimento de redes inteligentes (do inglês *smart grids*), busca alterar a característica passiva do consumidor, incluindo-o de forma inteligente na operação. Nas redes inteligentes o consumidor pode gerar e consumir energia, como também escolher o tipo de energia que deseja comprar (Farhangi, 2010). Ainda há muito a ser feito para alcançar todos os objetivos de redes inteligentes. São necessárias novas tecnologias para otimizar os recursos distribuídos e sistemas inteligentes de: monitoramento, controle, comunicação e proteção. Nessas profundas mudanças do SEP é essencial a realização de testes, de modo a superar os novos desafios buscando maximizar os benefícios. Um ambiente capaz de realizar os testes de futuras tecnologias, a serem vastamente implantadas no SEP são as microrredes.

Microrredes são sistemas que integram recursos de geração distribuída e unidades de armazenamento de energia localizados próximos às cargas, tendo a capacidade de fornecer diversos benefícios para seus proprietários, como elevar a confiabilidade e a qualidade da energia fornecida, considerando que os componentes da microrrede operem de maneira apropriada (Benjamin *et al.*, 2008). Essas redes podem atuar de maneira ilhada, desconectadas do sistema principal. Bakken (2014) considera microrredes como a evolução natural de redes de distribuição.

O sistema de distribuição tem sua proteção comumente dependente de funções de sobrecorrente de único ajuste, sem direção. Assim, não são capazes de lidar com o fluxo bidirecional e diferentes ajustes de proteção. O presente trabalho busca realizar a proteção autônoma de retaguarda adaptativa de sobrecorrente direcional de linha em uma microrrede, através de um sistema multiagente com comunicação. O sistema multiagente proposto utiliza a natural característica distribuída de sistemas de proteção, que utiliza relés em pontos estratégicos do sistema.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é investigar o aprimoramento da proteção de microrredes, através de estratégias adaptativas de modo a manter seletividade, sensibilidade e coordenação nas diferentes condições do sistema através de agentes. Para alcançar estas metas foi adicionada proteção de retaguarda às linhas de distribuição da microrrede, continuando o desenvolvimento de um SMA para a proteção de microrredes.

Para avaliar o sistema de proteção multiagente desenvolvido é utilizada a plataforma de sistemas de potência PSCAD (*Power System*

Computer Aided Design) para simular falhas no sistema teste, o qual é, baseado em um sistema de distribuição real, utilizado nos trabalhos (Maíola, 2014; Nascimento, 2014; Pinto, 2015). O trabalho de (Pinto, 2015) apresenta proteção primária para a microrrede e proteção para geradores síncronos. O presente trabalho busca complementar o trabalho desenvolvido acrescentando uma proteção de retaguarda temporizada de linha com ajustes adaptativos. Os dados de saída das simulações do PSCAD são carregados no sistema de proteção multiagente desenvolvido em Java com a plataforma JADE e as saídas são analisadas de modo a garantir a eficácia do sistema de proteção de retaguarda de linhas desenvolvido.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é dividido em 6 capítulos. O capítulo 2 apresenta os conceitos, definições e arquiteturas de sistemas multiagentes. Com seu ambiente de desenvolvimento JADE, sistema de comunicação e o protocolo de comunicação utilizado.

O capítulo 3 apresenta microrredes, sistemas de proteção em geral, proteção de redes de distribuição, proteção de geradores síncronos e a revisão bibliográfica de sistemas de proteção de microrredes. Assim, o capítulo apresenta as dificuldades de proteção de microrredes e como estas estão sendo superadas na literatura.

O capítulo 4 exhibe em detalhes a arquitetura multiagente proposta para a realização da proteção de microrredes, abordando todas as características da proposta do sistema multiagente desenvolvido.

O capítulo 5 descreve as etapas de simulação de faltas no PSCAD e o desempenho do sistema multiagente para diferentes faltas na microrrede. O capítulo busca apresentar de forma clara os resultados do sistema de proteção desenvolvido.

O capítulo 6 conclui a dissertação em sua totalidade. Assim, realizando o fechamento do trabalho desenvolvido e propondo trabalhos futuros.

2 SISTEMAS MULTIAGENTES

Sistemas multiagentes (SMA) são sistemas computacionais compostos por múltiplos agentes, possibilitando a solução de problemas complexos. Os SMA são utilizados quando um único agente implica em um alto custo, elevada complexidade, demandando tempo excessivo, podendo não ser capaz de solucionar um dado problema. A concepção dos sistemas multiagentes está fundamentada em sistemas naturalmente baseados em agentes, por exemplo, as relações humanas. Assim, um dos primeiros trabalhos publicados nesta área estuda a segregação no comportamento humano (Schelling, 1971).

Os sistemas multiagentes são utilizados em diversas áreas do conhecimento, tais como: ciência da computação, sociologia, economia, filosofia e outras (Weiss, 1999). Na literatura é possível encontrar trabalhos com aplicações de multiagentes na década de 1980, por exemplo, no trabalho (Bar-Noy *et al.*, 1988), que analisa a tomada de decisões de agentes na presença de defeitos, considerando agentes robôs autônomos em um ambiente industrial, para assim poder ilustrar suas hipóteses.

Este capítulo aborda as arquiteturas típicas de sistemas multiagentes, definições de sistema multiagente (SMA), comunicação, linguagem e o ambiente de desenvolvimento JADE *framework*. O capítulo é organizado conforme a seguir: Seção 2.1 aborda definições, conceitos básicos, arquiteturas e dificuldades em SMA; seção 2.2 conceitos básicos do sistema de comunicação, linguagem e protocolo; seção 2.3 apresenta a plataforma de desenvolvimento JADE; seção 2.4 a qual faz o fechamento do capítulo, apresentando as conclusões.

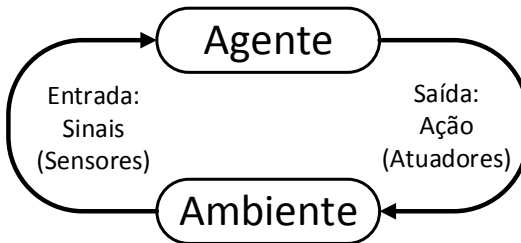
2.1 CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES

Sistemas multiagentes é uma área da inteligência artificial (IA). De acordo com Etzioni (1997) é 99% ciência da computação e 1% inteligência artificial. No decorrer do trabalho o conhecimento de alguns conceitos de SMA serão necessários. A subseção 2.1.1 aborda agentes. Subseção 2.1.2 ilustra as diferentes arquiteturas de agentes. Subseção 2.1.3 discute o problema de inconsistência de SMA e soluções dos problemas. Subseção 2.1.4 apresenta sistema especialista o qual é utilizado neste trabalho.

2.1.1 Agente

Apesar de ser uma nova área, o termo agente é utilizado em diversas áreas do conhecimento, sendo assim não há uma única definição para ela. Neste trabalho é considerada a definição a seguir: Um agente é uma entidade computacional como um programa ou robô posicionado em um ambiente, sendo capaz de perceber e atuar de forma autônoma ou parcialmente autônoma, as variações no seu ambiente (Wooldridge, 1997; Weiss, 1999). Agentes podem interagir indiretamente através do meio ou diretamente através de comunicação (Bellifemine *et al.*, 2007).

Figura 2.1 Agente e seu ambiente



Fonte: (Weiss, 1999), editado pelo autor.

A Figura 2.1 apresenta as capacidades básicas de um agente. Conforme apresentado, o agente é capaz de perceber alterações do seu ambiente através de sensores e efetuar ações no ambiente através de atuadores. Para exemplificar, vamos considerar um robô aspirador de pó de uso doméstico, o qual deve possuir a capacidade de se locomover e aspirar o pó, no entanto sem colidir com objetos, animais ou pessoas que estejam no ambiente a ser limpo. As colisões podem ser evitadas desde que o robô possua um sensor capaz de identificar esses obstáculos como, por exemplo, um sonar. O agente aspirador tem como função aspirar a casa, mas o mesmo funciona com bateria e precisa retornar a base de carga frequentemente. Resumindo, mesmo um simples agente terá que mapear o seu ambiente para estimar quando deve retornar a base de carga e lembrar quais áreas o mesmo já aspirou. Não será apresentado um exemplo completo com todas as funções necessárias para que um robô aspirador funcione, contudo é interessante ter em mente que as limitações do agente e as complexidades do ambiente devem ser enfrentadas para que um agente qualquer seja capaz de realizar uma ação de forma eficaz (Weiss, 1999).

2.1.2 Arquitetura

A arquitetura de agentes pode ser dividida em quatro grupos (Weiss, 1999; Bellifemine *et al.*, 2007): Base lógica (tomada de decisões realizada através de um sistema lógico e descrição simbólica), reativo ou não-deliberativas (hierarquia de ações), BDI (crença, desejo e intenção do inglês *belief, desire and intention*) e camadas (tomada de decisões que dependam da estrutura das camadas). As características das estruturas mencionadas são aprofundadas nas subseções 2.1.2.1 a 2.1.2.4, respectivamente.

2.1.2.1 Base lógica (do inglês *logic-based* ou *symbolic*)

A abordagem tradicional para implementar um sistema de inteligência artificial sugere que um comportamento inteligente pode ser gerado pela representação simbólica do ambiente e de desejado comportamento. A arquitetura embasada no conhecimento utiliza essa abordagem, sendo esta a arquitetura mais próxima de IA. Com a representação simbólica, o conhecimento do sistema é manipulando para a tomada de decisões de acordo com a situação atual.

De maneira simplificada, o programa do agente contém suas regras de dedução, banco de dados e sensores, de forma a ser capaz de obter o melhor comportamento para o agente. Assim, o desempenho do agente depende das regras de dedução, do banco de dados e dos sensores. Portanto, é relevante notar que mesmo com regras perfeitas de raciocínio dedutivo, o agente pode enfrentar problemas com um banco de dados desatualizado ou com informações errôneas ou falhas nos sensores em informar as condições do ambiente (Weiss, 1999).

Esta abordagem possui a vantagem de que o conhecimento humano é simbólico, sendo facilmente programado e a conclusão do programa pode ser vista como dedução, que é naturalmente compreendida por humanos.

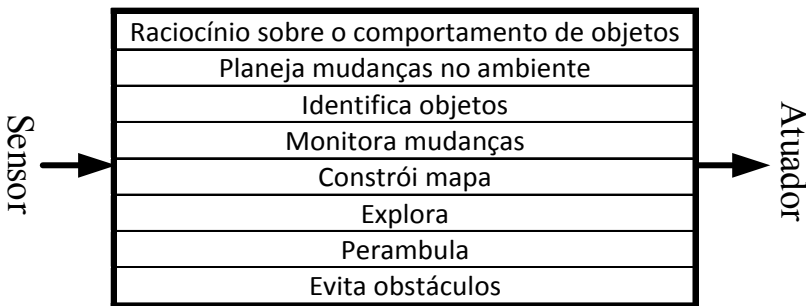
A principal desvantagem desta arquitetura reside no pesado esforço computacional exigido para caracterizar o mundo real (suas propriedades dinâmicas, por exemplo, decidir uma ação com base em uma informação temporal) de forma simbólica. Com as informações a priori fica a dúvida, se devido à complexidade e esforço computacional o agente seria capaz de operar de forma eficiente, em tempo real. De acordo com (Bellifemine *et al.*, 2007), comumente, o resultado do sistema baseado na lógica só estará disponível quando o mesmo não possuir mais utilidade.

2.1.2.2 Reativo ou não-deliberativas

Segundo Correa Filho (1994), em uma arquitetura reativa, o processo de tomada de decisão de um agente ocorre em tempo real, em resposta a estímulos do ambiente, captados por seus sensores, ou por mensagens enviadas por outro agente. Esta arquitetura surgiu ao longo da década de 1980 devido a descrença da arquitetura de base lógica, pois simplificações na estrutura simbólica não seriam suficientes para que os agentes fossem capazes de operar em tempo real (Weiss, 1999).

De acordo com (Weiss, 1999; Bellifemine *et al.*, 2007) as suposições realizadas por Rodney Brooks (Brooks, 1991) são as melhores para a arquitetura reativa de agentes, com isto em mente, as suposições do trabalho irão exemplificar a arquitetura reativa. Brooks (1991) propõe uma estrutura de uma máquina de estados finita, com camadas hierárquicas, nas quais uma ação de maior prioridade inibe as de menor prioridade. A prioridade da ação em cada camada é realizada pela sua posição, a camada da base é hierarquicamente superior a todas as demais, consequentemente, a camada do topo só poderá ser executada caso nenhuma outra camada esteja sendo executada. A Figura 2.2 apresenta a arquitetura de um agente robô explorador, tendo sensores do seu ambiente como entrada. A arquitetura reativa possui a simplicidade de situação \rightarrow ação, mas uma situação pode sugerir a tomada de mais de uma ação (camada), obrigando assim, a escolha de uma camada antes de sua execução. O objetivo da camada de maior importância é evitar obstáculos, como ilustrado na Figura 2.2, já que o agente robô seria incapaz de explorar seu ambiente caso esteja danificado. No caso de não haver risco eminente de colisão, a estrutura decide a ação a ser realizada; o agente pode executar outras camadas desde que obedeça a hierarquia.

Figura 2.2 Arquitetura do robô



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

A arquitetura do agente robô explorador, da Figura 2.2, apresenta oito camadas, que são descritas a seguir em ordem decrescente de prioridade. A primeira camada possui a função de evitar obstáculos e damos ao robô, assim permitindo que o mesmo continue em operação. Na segunda o robô perambula, deslocando-se pelo ambiente sem destino. Já na terceira camada o robô se desloca para locais do ambiente que não foram explorados. Na quarta camada o agente constrói o mapa do ambiente, catalogando os locais. Na quinta são catalogadas as alterações no ambiente. Na sexta camada o robô realiza a identificação dos objetos presentes em seu ambiente. Na sétima o agente planeja mudanças no seu mundo. Na última e de menor prioridade o agente raciocina sobre o comportamento dos objetos de seu ambiente.

Agentes reativos atuam, mas não planejam. Isso leva a pensar nas vantagens e desvantagens desta arquitetura, as características que mais se ressaltam são listadas a seguir:

Vantagens:

- Atuam melhor em ambientes dinâmicos.
- Comumente mais simples do que agentes de base lógica.
- Robusto contra falhas.

Desvantagens:

- Não possui a modelagem do ambiente onde está inserido, obrigando-o a tomar decisões baseado exclusivamente em seu banco de dados.
- Como possui poucos estados é quase impossível desenvolver agentes que aprendam por experiência.
- Caso um agente necessite de um grande número de camadas, a dinâmica do comportamento delas pode ser muito complexa, pois a ação de uma camada pode acionar outras.

2.1.2.3 BDI

O modelo de arquitetura BDI se originou da teoria de raciocínio prático humano, desenvolvido pelo filósofo Michael E. Bratman primeiramente no livro (Bratman, 1987). O raciocínio prático é fundamentado em dois princípios, no primeiro são escolhidos os objetivos a serem alcançados e o segundo estabelece como alcançar os objetivos.

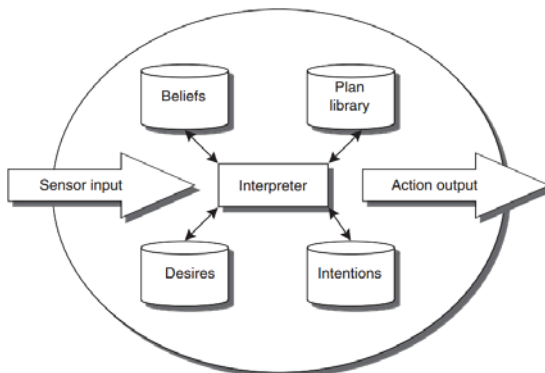
No raciocínio humano é esperado que antes da tomada de uma decisão, o protagonista conheça as opções disponíveis, as quais são geradas de acordo com o que se deseja, o que se acredita ser possível realizar baseado em crenças relativas ao ambiente e gerando intenções de

como os objetivos podem ser alcançados. A arquitetura BDI utiliza este princípio para emular o raciocínio prático, tendo no final de cada iteração do sistema as intenções, as quais são realimentadas com as atuais intenções, que levam as ações. Como evitar inconsistências ou erros no raciocínio? A solução é um filtro, um filtro bem específico que elimina ou não permite que um agente possua intenções antagônicas como, por exemplo, a intenção de subir e descer uma escadaria no mesmo instante. Também é esperado que um agente não deve permanecer com intenções que tenham sido consideradas inalcançáveis ou irracionais.

O problema mais significativo desta arquitetura é apresentado no trabalho de (Kinny e George, 1991) o qual analisa o desempenho de um agente em relação à perseverança de suas intenções. Kinny e George (1991) concluíram que em ambientes dinâmicos que não seguem tendências, o agente, de modo a aprimorar seu desempenho, deve reconsiderar suas intenções com maior frequência.

Como apresentado nesta subseção a arquitetura BDI possui uma programação diferenciada. O sistema PRS (*Procedural Reasoning System*) foi provavelmente a primeira arquitetura de agentes que verdadeiramente utilizou a teoria do BDI e é considerada a ferramenta mais durável em desenvolver agentes da arquitetura BDI (Bordini *et al.*, 2007). A Figura 2.3 apresenta a estrutura interna do PRS, a qual além das crenças, desejos e intenções possui uma biblioteca de planos e um intérprete. A biblioteca de planos necessita ser programada e inserida pelo programador do agente. O bloco do intérprete do PRS é responsável pelo filtro de inconsistências e pela escolha do plano a ser executado, tendo em vista a arquitetura teórica BDI.

Figura 2.3 PRS (*Procedural Reasoning System*)



Fonte: (Bordini *et al.*, 2007).

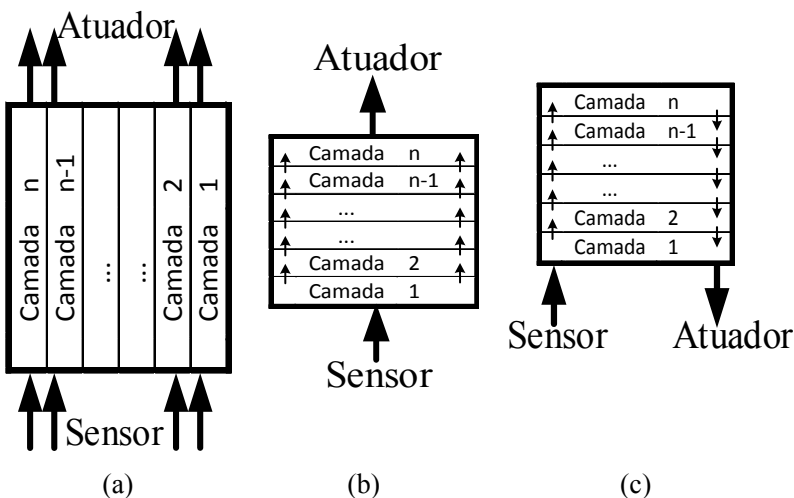
2.1.2.4 Camadas

A arquitetura em camadas pode ser subdividida em três, com suas devidas particularidades, estas são a horizontal, a vertical de uma passada do controle e a vertical de duas passadas de controle. Os três diferentes tipos de arquiteturas de camadas estão representados na Figura 2.4.

A arquitetura horizontal na qual os sensores estão diretamente conectados às camadas e aos atuadores (Ferguson, 1992; Müller *et al.*, 1995), tendo a facilidade de que cada camada é um agente, a Figura 2.4 (a) ilustra a mesma. A arquitetura horizontal sofre com a necessidade de um mediador ou intérprete de modo a evitar que uma camada desfaça ou torne inútil os esforços de outra, necessitando ser capaz de lidar com todas as possíveis possibilidades do agente. Então, considerando m saídas e n camadas teria de lidar com m^n possibilidades.

As estruturas verticais facilitam a implementação de um mediador, já que as possibilidades de interação entre camadas é reduzida (Müller *et al.*, 1995). As Figura 2.4 (b) e (c) ilustram estas arquiteturas. O número de possibilidades que a estrutura vertical deve lidar é, consideravelmente menor que na horizontal. A facilidade de reduzir o número de possibilidades provém da redução de flexibilidade. Inserir novas camadas não pode ser realizado sem considerar as já existentes.

Figura 2.4 Tipos de arquiteturas em camadas



Fonte: (Müller *et al.*, 1995), editado pelo autor.

2.1.3 Evitando inconsistências em SMA

Sistemas multiagentes como o nome já sugere, são formados por um conjunto de agentes que atuam em um mesmo meio, não sendo sistemas isolados, comumente estudados como membros de uma sociedade. Assim, habilidades sociais são essenciais para que um SMA apresente coordenação e cooperação entre agentes de modo a alcançar os benefícios de inteligência distribuída. Então os agentes devem apresentar coordenação para evitar ações conflitantes, fazer uso das diferentes capacidades e bases de conhecimento de outros agentes, para atingir objetivos com melhor desempenho. De acordo com Bellifemine *et al.* (2007) há três formas de evitar os problemas provenientes da ausência da coordenação que provêm de: Contratos, planejamento e negociação, organização estrutural. O trabalho desenvolvido faz uso de duas estratégias (com adaptações), para evitar inconsistências, através de uma estrutura organizacional e de um agente central de planejamento.

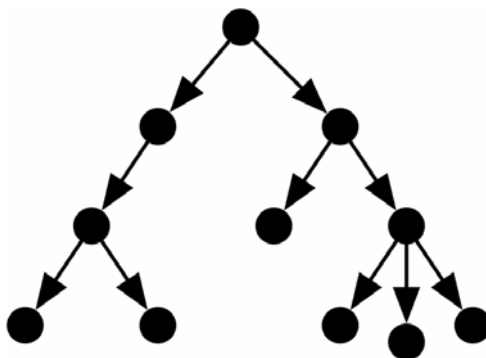
O trabalho de Smith (1980) apresenta um protocolo para contratos entre agentes baseado numa estrutura de mercado descentralizado, onde agentes podem assumir duas funções, gerente e empreiteiro. Assim, se um agente for incapaz de solucionar uma tarefa o mesmo pode delegar a mesma para outros, semelhante ao que um gerente faria buscando empreiteiros para uma obra, demais agentes, os que forem capazes de realizar a tarefa, devido as habilidades e experiências, retornam mensagem para o agente gerente.

Em (Georgeff, 1988) é apresentada uma estratégia centralizada de planejamento de SMA, a qual utiliza um agente para centralizar os planos dos demais. Então, com a informação dos planos dos demais agentes as inconsistências são removidas e devolvidas aos mesmos. A estratégia é extremamente dependente do agente centralizado de planejamento. Georgeff (1984) apresenta uma estrutura de planejamento descentralizada, na qual os agentes têm conhecimento do modelo dos demais agentes e utilizam comunicação para eliminar possíveis inconsistências.

A organização estrutural de agentes possui diversas possibilidades como apresentado no estudo de (Horling e Lesser, 2004), no qual apresentam e discutem dez tipos de estruturas organizacionais, a saber: organização composta, matricial, mercado, federações, sociedade, congregações, times, coalizões, hierarquia em grupos (do inglês *holarchies*) e hierárquica. Abordar todas estas organizações não pertence aos objetivos do trabalho, então se irá tratar unicamente da estrutura

organizacional utilizada no presente trabalho, isto é, a organização hierárquica.

Figura 2.5 Organização hierárquica



Fonte: (Horling e Lesser, 2004).

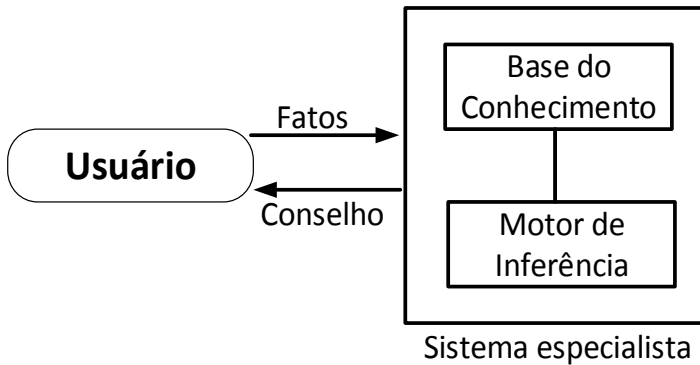
As organizações hierárquicas se baseiam na divisão de uma tarefa complexa em diversas tarefas de menor complexidade, dando origem assim às camadas hierárquicas. Portanto, múltiplos agentes são delegados com tarefas para atingir os objetivos em comum. Esta organização é comumente referida como do tipo “árvore” conforme se apresenta na Figura 2.5, os agentes da camada mais baixa só possuem informação local, a qual é processada e enviada de forma simplificada para as camadas superiores. Os agentes de camadas superiores concentram essas informações e as utilizam para tomar decisões, podendo enviar comandos para agentes de camadas inferiores que as obedeceriam para assim alcançar os objetivos do SMA.

Uma interessante característica desta organização é o reduzido número de possibilidades de interações entre agentes. Como ilustrado na Figura 2.5 a interação dos agentes é apenas entre camadas, um agente deve ser capaz de se comunicar com no máximo agentes de duas camadas, assim seu desenvolvimento é simplificado. De acordo com (Bellifemine *et al.*, 2007) a organização hierárquica é a técnica mais simples para garantir uma operação congruente de um SMA.

2.1.4 Sistema especialista

Sistemas especialistas (SE) e SMA são áreas de IA consideradas uma solução aproximada do clássico problema de IA para programar inteligência. Basicamente o sistema especialista emula a habilidade de um especialista humano na tomada de decisões. Um humano especialista é aquele que possui vasto conhecimento ou habilidade especial, que se destaca sobre a maioria, em uma determinada área do conhecimento (Joseph e Gary, 1998a). A Figura 2.6 ilustra o conceito básico de um SE. A base de conhecimento pode se originar de livros, revistas e pessoal especializado na área. O usuário insere fatos no sistema que retorna um conselho ao usuário, como o mesmo deve proceder considerando os fatos e a base de conhecimento. Internamente o SE possui um motor de inferência que utiliza os fatos e a base do conhecimento para gerar sua saída, conselho.

Figura 2.6 Sistema especialista básico



Fonte: (Joseph e Gary, 1998b), editado pelo autor.

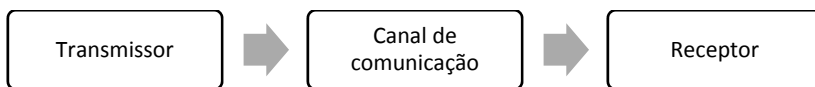
Sistemas especialistas apresentam características atrativas como rápida resposta, não serem influenciados por emoções na tomada de decisões, entre outras vantagens apresentadas em (Joseph e Gary, 1998b). Uma dificuldade presente é que a base de conhecimento pode não abranger um possível evento o qual o SE pode informar um conselho errôneo ao usuário.

2.2 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

Conforme apresentado na seção 2.1.1 um agente pode interagir indiretamente ou diretamente através de comunicação. O SMA desenvolvido possui sistema de comunicação. Todo sistema de comunicação pode ser basicamente subdividido em três partes (Therrien e Tummala, 2012), conforme apresentado na Figura 2.7.

Na Figura 2.7 os blocos do transmissor e receptor contemplam a modulação e a demodulação da mensagem a ser transmitida respectivamente. O tempo necessário no processo de comunicação enfrenta muitas variáveis: tamanho da mensagem, tempo no transmissor e no receptor, disponibilidade do canal de comunicação, pois o mesmo pode, no limite, vir a estar congestionado; existem diversos programas de simulação para o estudo de seu desempenho, como: OPNET e o *Network Simulator 2* (NS-2). Devido à complexidade do sistema de comunicação, o mesmo não será aprofundado neste trabalho. Entretanto, os atrasos de comunicação não podem ser desconsiderados, assim são adotadas as mesmas considerações apresentadas em (Chen e Kong, 2007), segundo os quais foi considerado um canal de fibra ótica de 19200 bit/s em um sistema de distribuição. É considerado que uma mensagem necessita de 10 ms para concluir todo o processo de comunicação.

Figura 2.7 Sistema de comunicação



Fonte: (Therrien e Tummala, 2012), editado pelo autor.

A linguagem de comunicação utilizada pelos agentes desenvolvidos é a FIPA-ACL (*Foundation for Intelligent Physical Agents – Agent Communication Language*) desenvolvida pela FIPA, a qual é um instituto fundado em 1996 para promover padrões na tecnologia SMA e faz parte do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) *Standards Committee*. O aprofundamento desta linguagem de comunicação é apresentado na subseção 2.2.1.

2.2.1 FIPA-ACL

A linguagem de comunicação entre agentes mais utilizada é a FIPA-ACL (Bellifemine *et al.*, 2007), a qual é baseada na teoria de atos de comunicação. A Tabela 2.1 apresenta os atos de comunicação possíveis. Os atos de comunicação como o protocolo na seção 2.2.1.1, utilizados neste trabalho serão referidos repetidamente na etapa de resultados.

Tabela 2.1 Atos de Comunicação 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>Disconfirm</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 macro para o agente para informar o destinatário se a afirmação é verdadeira ou não
<i>Inform Ref</i>	Uma ação macro para o agente para informar o destinatário de algum objeto que corresponda a uma descrição específica
<i>Not Understood</i>	O remetente informa ao destinatário que não entendeu a mensagem enviada ou ação executada pelo destinatário
<i>Propagate</i>	O remetente deseja que o agente mande as mensagens diretamente para os destinatários, e quer que os mesmos identifiquem os agentes pelas descrições dadas e propague a mensagem recebida novamente para eles
<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 sobre o 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>	O 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: (Bellifemine *et al.*, 2007), editado em (Pinto, 2015).

A mensagem pode apresentar treze parâmetros, mas o único parâmetro obrigatório de uma mensagem é o *performative*. Contudo, é esperado que uma mensagem apresente remetente (*sender*) e destinatário (*receiver*) (Bellifemine *et al.*, 2007). Os outros parâmetros de mensagem são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Parâmetros da mensagem ACL

Parâmetro	Descrição
<i>Performative</i>	Tipo de ato comunicativo da mensagem
<i>Sender</i>	Identidade do emitente da mensagem
<i>Receiver</i>	Identidade do destinatário da mensagem
<i>Reply-to</i>	A qual agentes serão direcionadas as mensagens subsequentes dentro de uma conversação
<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 conversação
<i>Conversation-id</i>	Identificador único de uma conversação
<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: (Bellifemine *et al.*, 2007), editado em (Pinto, 2015).

Existem diversos protocolos FIPA (Fipa, 2002), como:

- Requisição de interação: Permite que um agente requisite a outro a realização de uma ação;

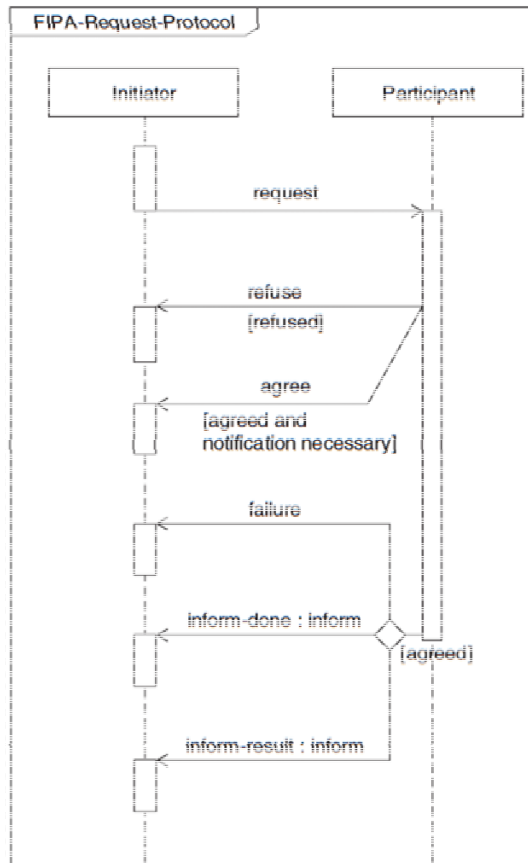
- *Query Interaction Protocol Specification*: Agente solicita realizar uma ação em outro agente;
- *Request When Interaction Protocol Specification*: Permite um agente requerer uma ação de outro no tempo que uma pré-condição seja verdade;
- *Contract Net Interaction Protocol Specification*: O agente que inicia a comunicação assume a posição de gerente que deseja que uma ação seja realizada por um ou mais agentes, os participantes, e também deseja otimizar a ação;
- *Iterated Contract Net Interaction Protocol Specification*: É uma extensão no qual permite múltiplas licitações no processo interativo;
- *Brokering Interaction Protocol Specification*: Utiliza um agente facilitador, o qual facilita uma série de serviços como ser responsável por encontrar os agentes capazes de realizar uma ação e delegar os mesmos a atuarem, permitindo que o sistema seja robusto em situações dinâmicas;
- *Recruiting Interaction Protocol Specification*: Semelhante ao *Brokering Interaction Protocol Specification*, mas o resultado de uma facilitação vai diretamente para o remetente ou para um designado remetente;
- *Subscribe Interaction Protocol Specification*: Permite um agente requerer uma ação em outro por meio de subscrição e subsequentemente quando um referido objeto sofrer alteração;
- *Propose Interaction Protocol Specification*: Permite que um agente proponha uma ação a outro que pode aceitar ou recusar;

Neste trabalho foi utilizada a requisição de interação, pois supre a necessidade de comunicação do trabalho e pela sua simplicidade, maiores especificações são apresentadas na seção 2.2.1.1.

2.2.1.1 Protocolo de requisição de interação FIPA

Como pode ser observado na Figura 2.8 o protocolo de comunicação apresentado faz uso dos atos de comunicação apresentados na seção 2.2.1. Inicia o processo através de uma *request* que pode ser aceita ou recusada e no final do processo é informado ao agente remetente as seguintes três possibilidades: falha, informação de conclusão e informação de resultado.

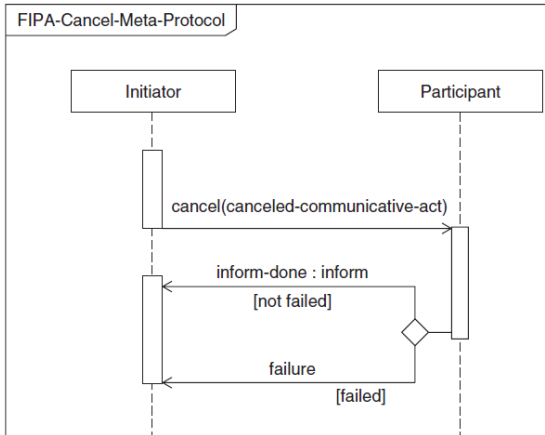
Figura 2.8 Protocolo requisição de interação



Fonte: (Bellifemine *et al.*, 2007).

Entretanto o protocolo também contempla o cancelamento de uma requisição, conforme apresentado na Figura 2.9, o qual só pode ser inicializado pelo agente que iniciou o protocolo. Conforme apresentado, o protocolo é iniciado por uma mensagem de cancelamento e termina com o informe do agente que foi requisitado.

Figura 2.9 Cancelamento do protocolo de interação



Fonte: (Bellifemine *et al.*, 2007).

2.3 JADE

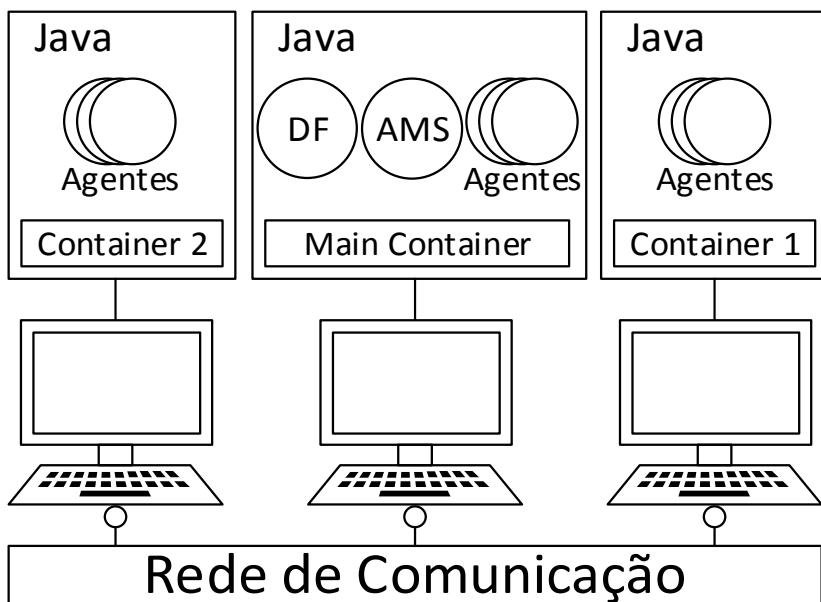
No final do ano de 1998 um programa que viria a se tornar a plataforma JADE (*Java Agent Development Framework*) começou a ser desenvolvido devido a necessidade de validar as especificações da linguagem FIPA (Bellifemine *et al.*, 2007). A plataforma foi inteiramente desenvolvida em Java o que implica que os agentes desenvolvidos neste trabalho utilizam essa mesma linguagem de programação. A plataforma de desenvolvimento de agentes apresenta diversas funcionalidades que são apresentadas a seguir:

- Completamente em conformidade com as especificações FIPA;
- Cada agente possui seu próprio encadeamento de execução (do inglês *thread*) independente podendo estar em diferentes máquinas com a infraestrutura de comunicação;
- A estrutura de comunicação é transparente ao usuário, permitindo prático desenvolvimento;
- Possui uma interface gráfica que permite a análise da troca de mensagens e também permite criar, suspender, travar, migrar, clonar e eliminar agentes;
- Suporta mobilidade de agentes, o que permite que um agente migre para outra máquina sem perda de mensagens;

- Permite controlar uma aplicação através de uma aplicação externa;

A plataforma possui a arquitetura apresentada na Figura 2.10 a qual apresenta *containers*, o (*main*) *container* principal é necessário em todo o SMA, podendo ser único, os demais *containers* recebem automaticamente o nome e número em ordem, como ilustrado: *container 1* e *container 2*. Os *containers* hospedam os agentes que podem mudar para outro *container*, de acordo com o desejado, com comunicação entre agentes do mesmo *container* e de outros *containers*. Contudo a uma grande diferença do *main* *container* aos demais, como pode se observar Figura 2.10, é que o mesmo hospeda os agentes DF (*Directory Facilitator*) e AMS (*Agent Manager System*).

Figura 2.10 Arquitetura JADE



Fonte: (Bellifemine *et al.*, 2007), editada pelo autor.

O agente AMS é o agente supervisor de toda a plataforma. Opera como ponto de contato para todos os agentes que desejam interagir de modo a acessar as páginas brancas, o qual pode se consultar os agentes ativos da plataforma. Todo o agente necessita se registrar no AMS de modo a obter um identificador de agente. Importante ressaltar que o AMS

é o único agente capaz de realizar o gerenciamento da plataforma, como fechar a plataforma, criar e eliminar agentes e fechar um container.

O agente DF implementa as páginas amarelas na qual registra os serviços oferecidos pelos agentes. Desta forma um agente pode cadastrar um serviço ou buscar um serviço. O DF também permite que um agente solicite notificações em mudanças nas páginas amarelas seguindo algum critério. Múltiplas DFs podem ser utilizadas para distribuir o serviço de páginas amarelas para vários domínios.

Atualmente existem outras plataformas para o desenvolvimento de agentes, cada uma com suas vantagens e desvantagens; uma análise comparativa pode ser encontrada no trabalho (Issicaba, 2013). Contudo, a plataforma JADE apresentou resultados satisfatórios dentro do escopo deste trabalho.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os sistemas multiagentes, algumas definições básicas incluindo noções de sua arquitetura, a existência de diversas formas para garantir que o SMA opere sem premissas contraditórias foi destacada, foram mostrados conceitos básicos de sistemas de telecomunicação, a linguagem de comunicação entre agentes, fazendo uma breve explicação do protocolo de comunicação FIPA que será utilizado entre os agentes no âmbito deste trabalho e finalmente a plataforma JADE é apresentada, pois é neste ambiente que todo o sistema é desenvolvido e testado. Sistemas multiagentes vêm sendo aplicados em sistemas de potência nas áreas de proteção (Abedini *et al.*, 2013), restauração do sistema (Solanki *et al.*, 2007), monitoramento e diagnósticos (Davidson *et al.*, 2006), simulações do mercado (Widergren *et al.*, 2004), automação (Buse *et al.*, 2003) e controle distribuído (Dimeas e Hatziargyriou, 2005).

As informações apresentadas neste capítulo buscam preparar o leitor para os sistemas multiagentes. Universo no qual todos os autores estão inseridos no mesmo meio ao mesmo instante, onde cada agente possui seu próprio *thread*, ou seja, o desempenho dos programas será fruto do: desempenho individual, da interação direta (troca de mensagens dos agentes envolvidos em um determinado evento) e da interação indireta (alterações no ambiente, o qual é comum a todos os agentes). Concluindo o capítulo apresenta o SMA, suas capacidades e características e busca familiarizar o leitor com a estrutura do sistema.

3 MICRORREDES E SEUS SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Este capítulo foca nos sistemas de proteção de microrredes, e na arquitetura de sistema multiagente (SMA) proposta neste trabalho. A seção 3.1 descreve algumas características de microrredes; a seção 3.2 apresenta as necessidades que o sistema de proteção deve suprir de modo geral; a seção 3.3 apresenta a proteção convencional de sistema de distribuição e a função de proteção de sobrecorrente temporizada que será utilizada, a fim de ilustrar as distinções da mesma com os sistemas de proteção de microrredes, apresentados na seção 3.4; e em 3.5 é apresentada as funções de proteção dos geradores síncronos, incorporadas no SMA proposto.

3.1 MICRORREDES

Microrredes são sistemas que integram recursos de energia distribuída, incluindo geração distribuída (GD) e unidades de armazenamento de energia localizados próximos às cargas, tendo a capacidade de fornecer diversos benefícios para seus proprietários, tais como, elevar a confiabilidade e a qualidade da energia fornecida, considerando que os componentes da microrrede operam de maneira apropriada (Benjamin *et al.*, 2008).

As tradicionais topologias de sistemas de distribuição estão ilustradas na Figura 3.1. Tais topologias são também utilizadas em microrredes, as quais possuem a capacidade de operar conectadas à rede principal da concessionária ou isoladas (Bakken, 2014).

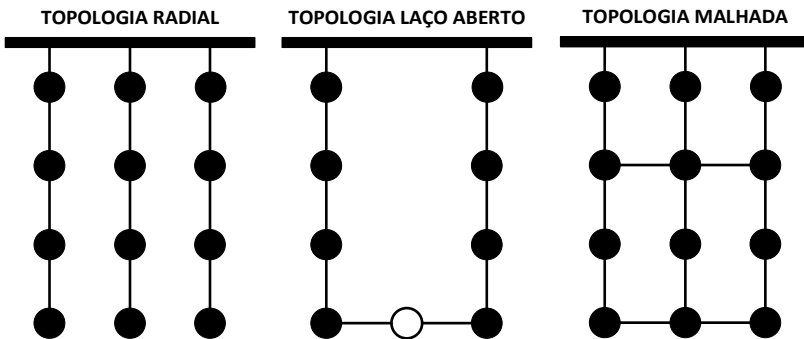
Destaca-se que a maioria dos sistemas de distribuição opera em topologia radial. Na topologia de laço aberto a estrutura radial é preservada, pois o dispositivo seccionador normalmente aberto só é fechado caso outro seja previamente aberto (Kamel *et al.*, 2011). De modo que, na ocorrência de uma abertura para isolar uma falha ou isolar uma região para a realização de manutenção, a área afetada pelo desligamento pode ser reduzida com o fechamento do dispositivo seccionador normalmente aberto. Consequentemente o sistema de proteção de distribuição na topologia radial considera apenas fluxo de potência unidirecional e não são eficazes para microrredes e sistemas de distribuição com GD.

Na topologia malhada, não existe estrutura radial, implicando que a contribuição de corrente para uma falha provenha de distintos caminhos. Assim, exigindo um sistema de proteção de maior complexidade, capaz

de proteger o sistema de topologia malhada, uma das possíveis abordagens é inserir direção à proteção.

Os trabalhos (Tavares, 2003; Bittencourt, 2011) exploram os impactos de GD, abordando as modificações nos níveis de curto-circuito, redistribuição de fluxos de potência, elevações nos perfis de tensão, carregamento dos alimentadores e outros.

Figura 3.1 Topologias de distribuição



Fonte: (Bakken, 2014) editada pelo autor.

O sistema de proteção de uma microrrede também enfrenta a dificuldade da redução da corrente de curto-circuito no modo de operação ilhada, devido à ausência da contribuição de corrente de curto-circuito da rede da concessionária. Simultaneamente, as unidades geradoras conectadas à rede podem ser de distintas tecnologias como: microturbinas a gás, pequenas centrais hidroelétricas, geradores eólicos, módulos fotovoltaicos, células combustível e outros. Algumas das tecnologias utilizadas nos geradores citados anteriormente apresentam conexão à rede através de eletrônica de potência, por exemplo, inversores, apresentando capacidade de contribuição de corrente de curto-circuito normalmente inferior ao dobro da corrente nominal da unidade geradora (Tumilty *et al.*, 2006). A tecnologia das unidades geradoras conectadas à microrrede impacta diretamente na proteção da mesma.

Considerando-se a proteção baseada na função de sobrecorrente, deve-se ressaltar que a sensibilidade dos relés é afetada se um ajuste único é empregado. Se o relé é ajustado considerando altas correntes de curto-circuito na microrrede operando conectada ao sistema da concessionária, quando a microrrede estiver operando ilhada a atuação do relé pode ser lenta ou ele pode simplesmente não ser sensibilizado. Assim, as proteções

convencionais de redes de distribuição não são adequadas às microrredes. As características de um sistema de proteção são apresentadas na seção 3.2.

3.2 SISTEMAS DE PROTEÇÃO

O sistema de energia elétrica deve manter o fornecimento de energia. Contudo, o sistema está sujeito a falhas e perturbações de diferentes naturezas como: fenômenos naturais, falha em equipamentos, falha humana e outras que afetam o fornecimento de energia. Com isso em mente, percebe-se a grande importância do sistema de proteção, de modo a minimizar o número de consumidores afetados e os danos causados a equipamentos, principalmente os de grande porte, como geradores e transformadores. Com isso o sistema de proteção busca obedecer três quesitos:

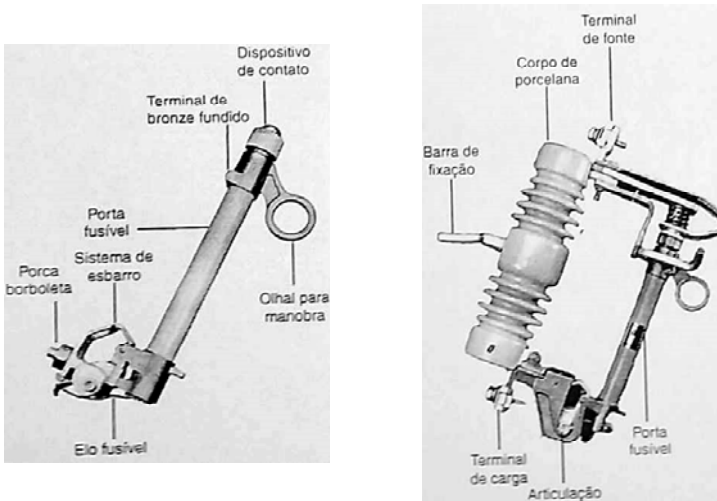
- Seletividade, somente o elemento de proteção mais próximo do defeito deve atuar de modo a desconectar a seção do sistema em falta.
- Velocidade, o tempo em que o sistema está em falta deve ser o menor possível para (Mamede Filho e Mamede, 2011):
 - Reduzir os danos ao sistema protegido.
 - Reduzir a queda de tensão durante as ocorrências.
 - Permitir a ressincronização de motores.
- Confiabilidade, capacidade do sistema de proteção cumprir suas devidas funções com segurança e exatidão.

3.3 PROTEÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A presente seção busca ilustrar a tradicional proteção de sistema de distribuição, de forma a realçar as mudanças requeridas pelo paradigma das microrredes. A proteção de um sistema de distribuição é composta comumente por:

- Chave fusível, apresentada na Figura 3.2, comumente utilizada no lado primário de transformadores de distribuição, início de ramais e outros. Seu fusível apresenta curva característica (I versus t) permitindo coordenação, podendo ser posicionados em série, reduzindo a área afetada para faltas no final de ramais de distribuição.

Figura 3.2 Sistema porta fusível e cartucho



(a) Porta fusível

(b) Chave fusível unipolar

Fonte: (Mamede Filho e Mamede, 2011), editada pelo autor.

- Religador, posicionado comumente no início do alimentador, permite a diferenciação de faltas transitórias para faltas temporárias, assim reduzindo a necessidade de uma equipe de manutenção para a troca de um elemento queimado. Caso uma falha transitória ocorra num ramal o mesmo abre seus contatos rapidamente e após um dado tempo os fecha sem que a chave fusível ao longo do ramal tenha rompido. O religador é programável permitindo escolha da maneira na qual o religamento irá ocorrer e o número de vezes.
- Seccionadora ou chave seccionadora, instalada a jusante do religador atuando em conjunto com o mesmo para aprimorar a seletividade. O elemento não é capaz de interromper a corrente de defeito, mas possui a vantagem de simples coordenação pois atua de modo a contar as atuações do religador.
- Disjuntor, comumente instalado na saída da subestação. Possui a capacidade de interromper correntes de falta, a operação do disjuntor, é realizada pelas funções de proteção

do relé. As principais funções de proteção de relés utilizadas em sistemas de distribuição são (Mamede Filho e Mamede, 2011): proteção instantânea de fase (50), proteção temporizada de fase (51), proteção instantânea de neutro (50N), proteção temporizada de neutro (51N), proteção de sobretensão (59) e proteção de subtensão (27).

Observa-se que as proteções descritas acima não apresentam direção ou sentido. A seguir são descritas as funções do relé mencionadas acima, com a exceção da proteção 59 e 27 as quais são abordadas na seção 3.5.

3.3.1 Sobrecorrente instantâneo 50 e 50N

A função de proteção de sobrecorrente instantânea atua instantaneamente para qualquer corrente acima de seu ajuste. Não apresentando nenhuma característica temporizada, busca bloquear o fluxo de corrente o mais rápido possível.

Quando utilizada em proteção de linhas, (Kindermann, 2012a) recomenda-se utilizar ajuste da função 50 igual a corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha. Analogamente, o relé 50N deve ser ajustado para a maior corrente de curto-circuito assimétrico a 85% da linha, curto-circuito monofásico ou bifásico.

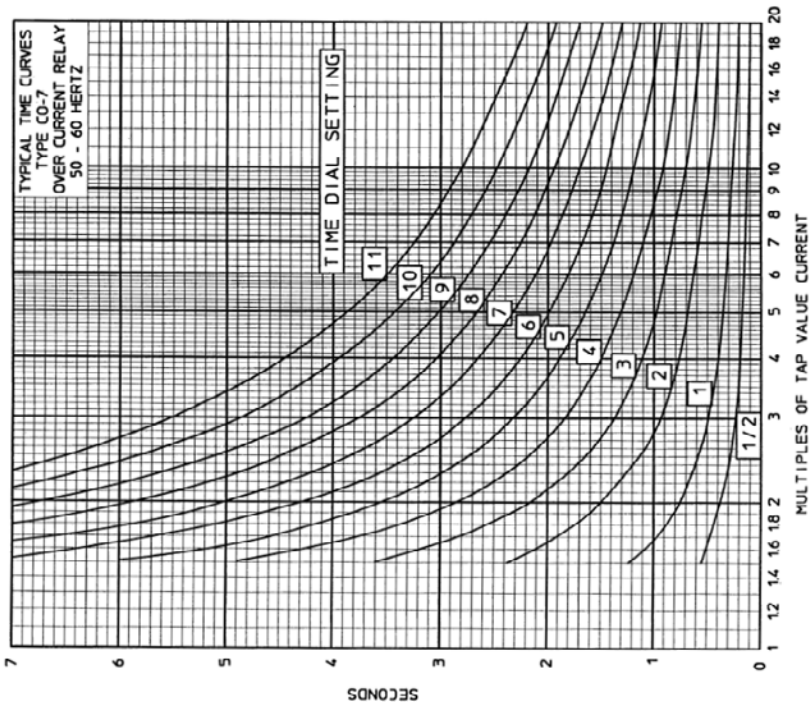
3.3.2 Sobrecorrente temporizado 51 e 51N

O relé de proteção de sobrecorrente temporizado possui curva de atuação, a qual define seu comportamento. Dessa forma, quanto maior a intensidade de corrente menor o tempo de atuação, semelhante à curva da chave fusível. A Figura 3.3 ilustra curvas de atuação de um relé de sobrecorrente temporizado eletromecânico da ABB (ABB, 1998), o qual possui basicamente dois ajustes, a corrente de ajuste do relé (do inglês *pick up*) e a curva de tempo (do inglês *time dial*). Relés digitais permitem também o ajuste do tipo de curva (curva inversa, moderadamente inversa, muito inversa e extremamente inversa).

A corrente de ajuste da função de sobrecorrente é o menor valor de corrente capaz de iniciar a contagem de tempo para a operação do relé. No eixo horizontal da Figura 3.3 são apresentados os múltiplos da corrente, significando o número de vezes que a corrente é superior a corrente de ajuste. Quanto maior a corrente em relação ao ajuste, menor

será o tempo de atuação da proteção, como observado no gráfico. O ajuste da curva de tempo ou *time dial* é escolhido para alcançar a coordenação entre a proteção primária e de retaguarda. Assim, garantindo seletividade no desligamento do sistema em falta, buscando minimizar a área afetada pela falta. Como se pode observar na Figura 3.3 o tempo de atuação da proteção pode ser ajustado através deste parâmetro. O *time dial* é ajustado de acordo com a temporização requerida entre a atuação da proteção primária e de retaguarda. O tempo de coordenação, representado pela variável Δt , é necessário para a seletividade da operação da proteção é apresentado em detalhe na subseção 3.3.2.1. Uma das dificuldades na proteção de sistemas elétricos é garantir a coordenação, pois mudanças no sistema podem afetar a coordenação, necessitando ser conferidas.

Figura 3.3 Curvas de atuação do relé de sobrecorrente



Fonte: (ABB, 1998).

Como o presente trabalho se baseia na utilização de relés digitais, diversas curvas podem ser aplicadas. Entretanto, foram utilizadas curvas descritas na IEC, conforme (3.1), uma vez que a mesma possui apenas

três parâmetros de curva e pela necessidade de padronizar a curva de proteção utilizada, de modo a facilitar a verificação da coordenação, como ilustrado na Figura 3.4. Além disso, é importante lembrar que os valores do *time dial* não são tabelados, podendo ser escolhidos unicamente por conveniência, sem aproximações para um valor próximo disponível que garanta a coordenação, como no caso do apresentado na Figura 3.3 que possui apenas treze possíveis valores de *time dial*.

$$tempo = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_{pk}}\right)^{\alpha} - 1} \times \frac{TD}{\beta} \quad (3.1)$$

TD = curvas de tempo (do inglês *time dial*)

$tempo$ = tempo de atuação

k , α e β = parâmetros da curva

I = corrente eficaz

I_{pk} = corrente de ajuste do relé (do inglês *pick up*)

3.3.2.1 Seletividade na proteção 51

O sistema de proteção busca a seletividade, assim, apenas o elemento de proteção mais próximo da falha deve atuar. Caso o mesmo não opere corretamente, então a proteção de retaguarda deve atuar. Dessa forma, a proteção de retaguarda só deve atuar em caso de falha da proteção primária. Para garantir que o sistema de proteção opere conforme o desejado é necessário que os relés apresentem um tempo de coordenação Δt , o qual é dado pela mínima diferença de tempo que deve existir entre a proteção primária e retaguarda, com o fim de garantir a coordenação e buscando a seletividade. Para haver coordenação a proteção deve respeitar a inequação (Kindermann, 2012a).

$$t_{relé \text{ a montante}} - t_{relé \text{ a jusante}} \geq \Delta t \quad (3.2)$$

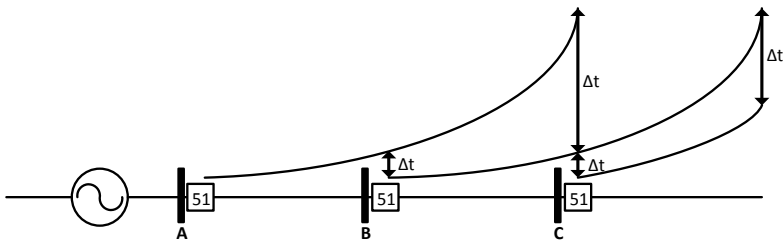
O tempo de coordenação Δt contempla o tempo do mecanismo de abertura do disjuntor, tempo de extinção do arco elétrico do disjuntor primário e tempo de segurança. Assim, evitando a atuação indevida do relé de retaguarda, evita-se a abertura indevida de disjuntor. Os tempos

mínimos usuais de coordenação são apresentados abaixo (Kindermann, 2012a).

$$\Delta t = \begin{cases} 0,4 \text{ a } 0,5 \text{ s} & \rightarrow \text{ relés eletromecânicos} \\ 0,3 \text{ a } 0,35 \text{ s} & \rightarrow \text{ relés eletrônicos} \\ 0,25 \text{ a } 0,3 \text{ s} & \rightarrow \text{ relés digitais} \end{cases} \quad (3.3)$$

A Figura 3.4 apresenta as curvas de atuação da função de proteção 51 em conjunto com o diagrama unifilar de um sistema de topologia radial sem a presença de GD, fluxo unidirecional. Os relés estão juntos às barras, representados por quadrados com o número 51 no centro, e visão a proteção das linhas a jusante. Quando as curvas de atuação da função 51 são iguais, com a exceção ou não dos parâmetros I_{pk} e TD a coordenação pode ser verificada por respeitar a inequação (3.2) em dois pontos extremos do intervalo considerado (Kindermann, 2012a). Os pontos escolhidos para verificar a coordenação são: logo após o relé primário e ao fim da linha de proteção do relé primário. A Figura 3.4 ilustra os pontos onde são calculados os tempos de atuação da proteção primária, retaguarda e posteriormente o cálculo do tempo de coordenação Δt .

Figura 3.4 Coordenação de relés



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que a proteção de sobrecorrente temporizada (51) instalada por fase tem seu I_{pk} ajustando acima da corrente nominal da fase, considerando-se uma folga para eventuais sobrecargas. A proteção de sobrecorrente de neutro é instalada uma por circuito trifásico e seu I_{pk} é escolhido para satisfazer a inequação (3.4) para relé digital. As porcentagens de 10% a 45% fazem referência à corrente de circulação esperada no neutro devido a cargas desequilibradas (Kindermann, 2012a).

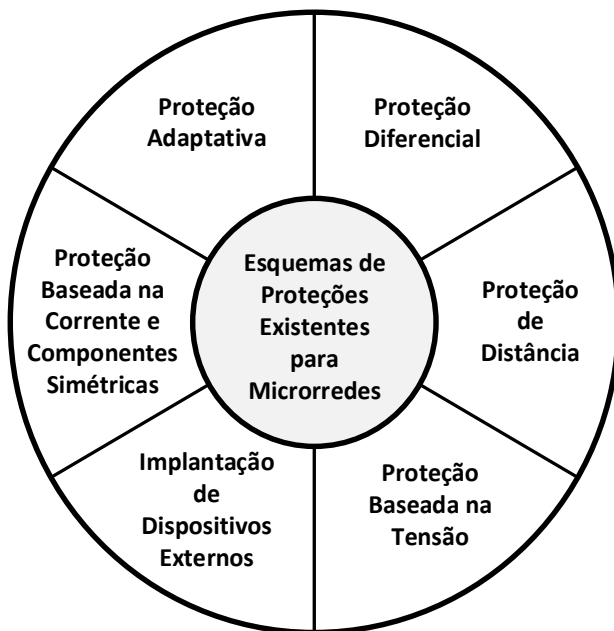
$$(10 \text{ a } 45\%)I_{nominal} \leq I_{pk \text{ do relé de neutro}} \leq \frac{I_{CC1\phi-terra \text{ mínimo}}}{1,1} \quad (3.4)$$

3.4 PROTEÇÃO DE MICRORREDES REVISÃO

BIBLIOGRÁFICA

As estratégias utilizadas na proteção de microrredes podem ser classificadas em seis tipos, como ilustrado na Figura 3.5 (Mirsaeidi *et al.*, 2014). Como é observado, são mais complexas que as utilizadas em sistemas de proteção de sistemas de distribuição radiais sem GD, algumas exigindo: sistemas de comunicação (monitoramento, troca de dados, envio de comandos e etc.); relés digitais (para alterar a configuração das proteções, filtros de sequência, realizar transformadas, comunicação e etc.); dispositivos externos (para elevar ou reduzir as correntes de curto-circuito); com outras diversas alterações, necessárias para buscar, atender as exigências de um sistema de proteção.

Figura 3.5 Tipos de Proteção de Microrredes



Fonte: (Mirsaeidi *et al.*, 2014), editada pelo autor.

Para evitar a redundância, sempre que a estratégia de proteção utilizar um controlador central, esta característica implica na existência de uma rede de comunicação, assim concentrando as informações da microrrede para tomar uma decisão. As subseções de 3.4.1 a 3.4.6, abordam os diferentes esquemas de proteção de microrredes, apresentados na Figura 3.5.

3.4.1 Proteção diferencial

Proteção diferencial: compara as correntes de entrada e saída de uma determinada zona. Caso a diferença entre as mesmas seja superior ao seu ajuste, a proteção deve operar. Assim, a proteção diferencial não é sensível ao modo de operação da microrrede, nem a alterações das correntes de curto-circuito. Entretanto, enfrenta os seguintes desafios: necessita de proteção secundária que não seja dependente do sistema de comunicação (já que o mesmo pode falhar, removendo a proteção primária e de retaguarda da microrrede), quando aplicado as linhas da microrrede, dificuldades com sistema ou cargas desbalanceadas e conexão ou desconexão de geradores (Kindermann, 2014b).

Em (Louw *et al.*, 2014) é apresentada uma proposta de proteção diferencial não usual para microrredes com geração distribuída conectada por inversores de frequência. A microrrede foi modelado em Matlab, apresentando variações de cinquenta vezes nas correntes de curto-circuito, do modo de operação ilhada para o modo de operação conectada. Apresenta a peculiaridade das correntes serem comparadas unicamente em módulo, não sendo capaz de identificar faltas que ocorram na zona de proteção que possuam contribuições semelhantes nas extremidades. Pois o trabalho sugere a alteração da proteção diferencial usual, assim compara unicamente o módulo das correntes nas extremidades do elemento protegido.

Alguns autores sugerem proteção de retaguarda baseada na tensão. Dewadasa *et al.* (2011) também apresenta a proteção diferencial, mas na presença de uma estratégia de proteção de retaguarda baseada em tensão, sendo que a mesma só é habilitada no caso do relé perceber falha na comunicação. A detecção de falha de comunicação não é explorada nem as dificuldades na medição, tendo simulações integradas no PSCAD e Matlab. Sortomme *et al.* (2010) apresentam a utilização de medidores fasoriais, assim podendo comparar as correntes nas extremidades tanto em módulo como em fase, sendo capaz de detectar todos os tipos de falta, incluindo faltas de alta impedância. Relevante ter em mente que devido às distâncias envolvidas, essa estratégia é dependente do sistema de

comunicação. Prasai *et al.* (2010) propõem a comunicação via rede elétrica (PLC do inglês *Power Line Communication*) com múltiplos níveis de proteção, de modo a satisfazer a necessidades da microrrede.

3.4.2 Proteção de distância

A proteção de distância utiliza a impedância das linhas para realizar a proteção, caso a impedância vista pelo relé seja inferior ao seu ajuste, a proteção deve operar. Entretanto, apresenta o problema na precisão para extrair as componentes fundamentais dos sinais de corrente e tensão, dificuldade em medir a impedância de linha de distribuição e a precisão do método é influenciada pela resistência de arco, resistência do solo, oscilação de potência e outras (Kindermann, 2012a; Mirsaiedi *et al.*, 2014).

Em (Dewadasa *et al.*, 2008) é utilizada a proteção de distância convencional, do tipo relé de admitância também conhecido como MHO, sendo que a primeira zona de proteção utiliza a impedância de 80% da linha e a de segunda zona 100% da linha acrescentado a 50% da linha adjacente, se enquadrando o sugerido por (Kindermann, 2012a) mas sem terceira zona. O trabalho concluiu que o método apresenta descoordenação e operação indevida em alguns casos. Por esse motivo, o estudo da proteção distância foi aprofundado em (Dewadasa *et al.*, 2009; Dewadasa, 2010), nos quais é proposta a medição da impedância da linha para configuração da proteção primária e secundária. Busca-se evitar os problemas de precisão do método de proteção através de curvas inversas de atuação. Assim, o método evita operações indevidas por utilizar curvas inversas de temporização para a atuação da proteção, semelhantes às curvas inversas utilizadas na proteção de sobrecorrente.

3.4.3 Proteção baseada na tensão

A proteção baseada em tensão foi introduzida utilizando a transformada da tensão na saída das unidades geradoras para os eixos de referência dq0 (transformada de Park), sendo capaz de identificar faltas dentro e fora de zonas de atuação (Al-Nasseri *et al.*, 2006). A operação indevida da proteção pode resultar na queda de tensão na microrrede. Xiao-Ping *et al.* (2011) utilizam um controlador central de proteção, o qual monitora a direção da potência e os componentes da transformada de Park na tensão, sendo que os mesmos apresentam grandes variações na ocorrência de falta. O trabalho também desenvolveu o relé de proteção em *hardware* através de um computador industrial.

Observa-se que esses sistemas de proteção são incapazes de identificar faltas de alta impedância e possuem baixa sensibilidade quando opera conectado à concessionária. As técnicas elaboradas foram desenvolvidas e testadas em microrredes específicas, sendo fortemente dependentes de sua estrutura e escolha de zonas de operação.

3.4.4 Implantação de dispositivos externos

Através da implantação de dispositivos externos, são inseridos dispositivos que busquem evitar as variações das características de uma microrrede sob falta, em seus distintos modos de operação. Há duas classes de dispositivos externos que podem ser adicionados à microrrede, elementos que elevam as correntes de curto-circuito ou a limitam. A implantação de dispositivos externos resulta em investimento significativo nos equipamentos, dependência da estratégia de ilhamento e desafios em seu dimensionamento.

Um modo de manter a corrente de curto-circuito elevada nos dois modos de operação é inserindo unidades de armazenamento de energia capazes de contribuir com as correntes de curto-circuito. Abdel-Khalik *et al.* (2013) aborda as características de contribuição de corrente a faltas em GD conectada através de eletrônica de potência, e a utilização de volantes de inércia (do inglês *flywheels*) para providenciar a corrente necessária de operação das proteções no modo de operação ilhado da microrrede.

Em (Monteiro, 2005), estuda-se o impacto de limitadores de corrente enquanto em (Ustun *et al.*, 2011) utiliza-se dos mesmos princípios em conjunto com a aplicação de um controlador central de proteção. Utilizando os limitadores de corrente para permitir a antecipação das correntes de falta, principalmente em GD conectada através de eletrônica de potência, para realizar os ajustes da proteção. Em (Wang, 2009; Shahriari *et al.*, 2010), propõe-se utilizar limitadores de corrente de curto-circuito, chegando ao ponto mencionar os mesmos como método de eliminar os impactos negativos de geração distribuída.

3.4.5 Proteção baseada na corrente e componentes de sequência

A proteção baseada na corrente e nas componentes de sequência da mesma, pode ser utilizada para identificar o tipo de falta e também o modo de operação da microrrede, na presença de um sistema de comunicação ou não. Dang *et al.* (2011) apresentam um sistema que identifica o modo de operação da microrrede através do ângulo de sequência zero (unicamente para faltas desbalanceadas), devido a

configuração dos transformadores da microrrede. A detecção da falha é realizada através da tensão fazendo uso da transformada de Park.

3.4.6 Proteção adaptativa

A proteção adaptativa foi proposta na década de 80, a qual alterava o tradicional esquema de proteção onde o relé possui apenas um ajuste, sendo incapaz de manter a velocidade, seletividade e sensibilidade para distintas condições de operação de um sistema de potência. Uma das primeiras propostas de proteção adaptativa é apresentada em (Rockefeller *et al.*, 1988). Muitos métodos e arquiteturas computacionais foram desenvolvidos nesta área ao longo dos anos.

Baran e El-Markabi (2004) estudaram os problemas de relés de sobrecorrente na presença de geração distribuída. Assim, propuseram a alteração da corrente de ajuste com o fim de manter a sensibilidade do relé. Não há preocupação, entretanto, em manter a coordenação e seletividade. As simulações foram desenvolvidas em Matlab e demonstram a necessidade de alterar ajustes de proteção para manter um nível mínimo de sensibilização do relé na ocorrência de uma falta. Alterar a corrente de ajuste, na proteção de sobrecorrente, para manter a proteção sensível à falta, foi uma estratégia implementada no presente trabalho, conforme apresentado na seção 4.1.

As propostas de trabalho de sistema de proteção de microrrede que apresentam configurações distintas para os diferentes modos de operação são exploradas em (Mahat *et al.*, 2011; Khederzadeh, 2012; Laaksonen *et al.*, 2014; Louw *et al.*, 2014; Nascimento, 2014). Dentre os trabalhos citados apenas em (Mahat *et al.*, 2011) é assumindo a inexistência de sistemas de comunicação. No trabalho de (Mahat *et al.*, 2011) é apresentada uma proteção adaptativa unicamente para falhas trifásicas. Assim, o relé deve identificar as alterações de modo de operação unicamente com as informações locais, associando o estado que considera estar a um conjunto de ajustes pré-definidos. Sugere-se, para detectar o modo de operação, a utilização de técnicas que monitoram a oscilação de frequência e variação na tensão. Embora a abordagem não tenha como requisito os sistemas da comunicação, faz-se necessário que os relés conheçam o estado inicial e que os mesmos não errem em detectar o modo de operação. Caso contrário, a microrrede pode ficar desprotegida nas zonas em que esses relés sejam responsáveis pela proteção. As simulações foram desenvolvidas em DIGSILENT.

No trabalho de (Bittencourt, 2011) é proposta uma proteção adaptativa para o alimentador da rede de distribuição, na presença de GD.

Possuindo dois grupos de ajustes, previamente definidos, para realizar a proteção do sistema quando a GD está conectada e quando esta desconectada. É utilizada a função de proteção de sobrecorrente temporizada e proposta a alteração automática de grupo de ajuste do relé do alimentador através do monitoramento da corrente demandada pelo sistema. A subestação recebe a informação do estado do disjuntor da GD, via comunicação. Em (Khederzadeh, 2012) é apresentada uma proteção adaptativa para microrredes, na presença de comunicação, considerando relés de sobrecorrente direcionais e não direcionais. Os relés possuem duas diferentes configurações definidas previamente para quando a microrrede está conectada à concessionária ou ilhada. Na alteração do modo de operação, a comunicação informa os relés a alterarem seus ajustes, de acordo com o estado do disjuntor de conexão à concessionária, referido como “*main circuit breaker*”. De modo similar, o trabalho de (Laaksonen *et al.*, 2014) realiza a proteção adaptativa da ilha Hailuoto, a qual possui geradores diesel, eólicos, sistema de comunicação e central de controle. A proteção é realizada através de proteções diferenciais, de distância e tensão. A central de controle, envia os novos ajustes das proteções, através de ajustes previamente definidos. No mesmo trabalho, foram propostos cinco grupos de ajustes da proteção. Dois grupos de ajustes para a microrrede conectada à rede principal, na presença de GD e na ausência de GD. E três grupos de ajustes para o modo ilhado de operação da microrrede: ilhamento intencional, não intencional (devido a uma falta externa) e estável (acionado após a estabilização da microrrede no modo de operação ilhada).

No trabalho de (Louw *et al.*, 2014) é estudado o impacto de microrredes com geração unicamente através de painéis solares. Fontes de energia conectadas à rede através de inversores de frequência não contribuem para as correntes de curto-circuito como outras fontes, a não ser que projetados para realizá-lo. A magnitude das correntes de curto-circuito, nos modos de operação da microrrede estudada, são 50 vezes maiores quando esta é conectada à concessionária. Propõem-se ajustes pré-definidos para os relés nos modos de operação da microrrede e proteção baseada na tensão como retaguarda.

Destaca-se que na área de proteção adaptativa de microrredes que a maioria dos trabalhos utiliza sistemas de comunicação. Mas alguns estão claramente focados na taxa de falha do sistema de comunicação ou na sua presença ou ausência, como em (Ustun *et al.*, 2013; Ustun e Khan, 2015). Em (Ustun *et al.*, 2013) através do controlador central da microrrede e sistema de comunicação, realiza-se a proteção adaptativa por sobrecorrente. O controlador central calcula a contribuição dos curtos-

circuitos, e atualiza os parâmetros dos relés, mas não são informados quais parâmetros são alterados, nem quais são as funções de proteção. O trabalho foca sua análise no sistema de comunicação, o qual é simulada em OPNET 16.0. O autor dá continuidade ao trabalho em (Ustun e Khan, 2015), propondo um esquema de proteção adaptativa, baseado em rede de comunicação sem fio. A microrrede é protegida pela proteção diferencial e pela proteção adaptativa desenvolvida, sendo que ambas necessitam de sistema de comunicação. A proteção diferencial possui maior exatidão, mas requer um contínuo e considerável tráfego de dados no sistema de comunicação. Caso erros na comunicação ultrapassarem um limiar, a proteção adaptativa é acionada. O controlador central da microrrede é acionado pelo limiar de comunicação e alterações na microrrede. O mesmo calcula as correntes de curto-circuito da microrrede e envia as novas configurações aos relés que podem operar por sobrecorrente.

A seguir são apresentados trabalhos que focam primordialmente na proteção adaptativa, através do conhecimento ou cálculo de corrente de curto-circuito (Oudalov e Fidigatti, 2009; Ma *et al.*, 2012; Sung *et al.*, 2013). Assim, sendo capaz de gerar ajustes de proteção em diferentes situações. Em (Ma *et al.*, 2012), encontra-se uma proteção adaptativa de um sistema de distribuição, na presença de geração distribuída, baseado na intensidade de corrente. Utiliza-se o método da superposição para o cálculo das correntes de curto-circuito, considerando que todas as fontes são lineares. A central da microrrede seria responsável por atualizar os parâmetros de proteção e não se especificam como as simulações foram realizadas. (Sung *et al.*, 2013), de maneira semelhante, descreve a proteção adaptativa de relé de sobrecorrente em redes radiais com geração distribuída. Permite-se no trabalho alterar a corrente de ajuste de acordo com as conexões e desconexões de GDs, buscando manter os tempos de atuação constantes para que as proteções se mantenham coordenadas, dando considerável autonomia aos relés. Assim, o método utiliza uma simples equação para o cálculo da nova curva de tempo, obtendo os novos parâmetros da proteção de forma rápida, uma característica de extrema relevância. As simulações foram desenvolvidas unicamente no PSCAD, mas apenas consideram fluxo unidirecional. Essa proposta talvez possa ser aplicada às microrredes, desde que sejam estabelecidos ajustes pré-definidos iniciais para os modos de operação.

Em (Oudalov e Fidigatti, 2009) é apresentada uma proteção adaptativa para microrredes centralizada, utilizando uma análise *on-line*, intertravamento direcional (*directional interlock*) e uma análise *off-line*. Essa nomenclatura é utilizada na descrição do sistema de proteção desenvolvido neste trabalho. A análise *on-line* monitora o estado da

microrrede, sendo acionada periodicamente ou na presença de um evento. O monitoramento acessa as informações individuais de cada relé de sobrecorrente direcional, analisa estes dados com o banco de dados central. Posteriormente é realizada a análise das informações, caso a central caracterize o estado atual como um evento, é acionando ou não uma ação. Não é informado o que caracteriza um evento ou como o controlador central define as ações de proteção. O intertravamento direcional utiliza a rede de comunicação para a troca de dados direta entre dois relés. Caso um relé opere o seu respectivo disjuntor, o mesmo envia uma mensagem para seu relé de retaguarda direcional, assim o mesmo necessita contar um tempo de coordenação para se tornar ativo novamente. Através do intertravamento direcional a coordenação é garantida, mesmo quando a diferença de correntes vistas pelos relés é pequena. A análise *off-line* possui um vasto banco de dados, possuindo o estado de todos os disjuntores da microrrede atualizados e a corrente vista por cada relé em curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos em pontos estratégicos da microrrede para uma considerável variedade de combinações das posições dos disjuntores. Através destas informações é realizado um ajuste para os relés direcionais de sobrecorrente nos diferentes estados de funcionamento da microrrede de modo a garantir a coordenação da proteção da microrrede. O trabalho apresenta as dificuldades de proteção na presença de geração distribuída, com unidades conectadas através de eletrônica de potência, mas não informa como são realizados os novos ajustes ditos automáticos de relés de sobrecorrente direcionais, não especificando diversas etapas de seu sistema de proteção proposto.

Em Liang *et al.* (2014) uma proteção adaptativa de quatro níveis é apresentada, tendo grandes alterações com as demais estratégias de proteção de microrrede, na bibliografia atual. Utiliza como sistema teste uma microrrede real, a saber, no Illinois Institute of Technology, o qual possui proteção de sobrecorrente, nos níveis da subestação, gerador síncrono térmico e alimentadores em malha. A proteção de sobrecorrente não direcional é aplicada nos níveis da subestação, gerador síncrono térmico e nas conexões dos anéis de distribuição, as subestações. A proteção diferencial é utilizada no nível dos sete anéis de distribuição e a proteção de sobrecorrente direcional no nível dos ramais de carga ou carga e GD. Os níveis apresentados possuem característica hierárquica, um realizando retaguarda ao outro, na ordem apresentada. Através dessa topologia, que utiliza comunicação entre os relés, nos modos de operação da microrrede e diferentes ajustes nos mesmos, foi capaz de atender todos os requisitos de um sistema de proteção, apresentados na seção 3.2.

Mesmo com o conjunto de distintas proteções e sistemas de retaguarda, dificuldades na comunicação, podem levar a microrrede a ficar desprotegida. Simulações de falta realizadas no programa PSCAD.

No contexto de proteção adaptativa se encontram esquemas que utilizam estratégias de sistemas multiagentes (SMA), para realizar a mesma, (Wan *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2009; Abedini *et al.*, 2013; Maiola, 2014; Nascimento, 2014; Pinto, 2015). Essa abordagem é apresentada nos trabalhos a seguir, sendo o caminho que o presente trabalho dá continuidade. Em (Wan *et al.*, 2008) é proposto o uso de proteção adaptativa em um sistema de distribuição tendo em cada subestação um aglomerado de agentes com funções específicas e todos com comunicação, realizando a coordenação da proteção através de dois esquemas de comando remoto para a abertura de disjuntores (do inglês *inter-trip*). Em (Zhu *et al.*, 2009) é descrita uma estrutura de multiagente na qual se destaca um agente responsável pelo monitoramento da rede de comunicação, essencial para o sistema de proteção, uma central com múltiplos agentes responsáveis por atualizar os parâmetros dos relés, através de cálculos de correntes de curto-circuito. Considera que cada relé é um agente capaz de informar alterações no sistema de potência.

Em (Abedini *et al.*, 2013) é apresentado um sistema multiagente (SMA) para redes inteligentes e microrredes, possuindo um SMA para o mercado de energia, banco de dados, e outro SMA para a coordenação da proteção. O SMA da coordenação da proteção, é composto por quatro distintos agentes que monitoram a microrrede. Quando um destes agentes nota uma alteração na microrrede informa para o agente central da microrrede. Assim, realiza a análise de correntes de curto-circuito e fluxo de potência, através do sistema de banco de dados, para executar o cálculo dos novos parâmetros da proteção, e os distribui aos seus respectivos relés. O agente central da microrrede, também é capaz de se comunicar com agentes centrais de outras microrredes, agente de dados e agente de mercado. O método de cálculo utilizado para gerar os novos ajustes das proteções é semelhante ao SMA desenvolvido em (Lim *et al.*, 2007) para a proteção adaptativa de alimentadores de distribuição, proteção de sobrecorrente.

A linha de pesquisa de proteção adaptativa através da arquitetura multiagente vem sendo explorada no laboratório de sistemas de potência pela professora orientadora Jacqueline Rolim, que já orientou nesta área três dissertações de mestrado (Maiola, 2014; Nascimento, 2014; Pinto, 2015), as quais são continuadas neste trabalho. Maiola (2014) propôs uma estrutura multiagente organizada em três camadas hierárquicas: a primeira e de menor prioridade é composta por agentes relés; segunda

composta pelo agente coordenador; terceira e de maior prioridade é composta pelo agente configurador. Os agentes relé possuem função de proteção semelhante a de sobrecorrente instantânea, mas quando o limiar é ultrapassado os relés não abrem o disjuntor e sim enviam mensagens ao agente coordenador, com a informação da magnitude da corrente. O agente configurador localiza a falta e informa o agente configurador, o qual, seleciona os relés que devem operar seus disjuntores. O agente coordenador e configurador apresentam programação de sistema especialista e o fluxo de mensagens entre os agentes segue a hierarquia das camadas.

Nascimento (2014) propôs duas análises adaptativas, a *on-line* e a *off-line*. A análise *on-line* é semelhante a apresentada em (Maiola, 2014), possuindo a mesma estrutura organizacional hierárquica e consequentemente semelhante fluxo de mensagens. Contudo apresenta três consideráveis diferenças: o SMA de proteção foi desenvolvido para uma microrrede, sendo capaz de realizar a proteção da microrrede na topologia ilhada e conectada à concessionária; os agentes relés identificam uma possível falta por perceber uma elevação na corrente superior a 20%, ao invés de possuir um limiar; a simulação do sistema teste foi realizada em PSCAD, o qual é capaz de simular os transitórios do sistema, no lugar de alterações diretas para estados estáveis (do inglês *steady state*). A análise *off-line* ou proteção adaptativa de sobrecorrente direcional instantânea e temporizada de fase e de neutro, desenvolvida no PSCAD, é baseada em grupos de ajustes que são alterados para algumas condições de operação simuladas previamente, não abrangendo todas as condições de operação da microrrede e necessitando um estudo dedicado para cada microrrede que venha a utilizar esta estratégia.

Pinto (2015) adicionou agentes relé de geradores, com várias funções de proteção, todas implementadas em JAVA e que são abordadas na seção 3.5. A proteção, através de ajustes pré-definidos de (Nascimento, 2014) foi removida. A análise *on-line* utilizada foi semelhante a utilizada em (Maiola, 2014; Nascimento, 2014), mas com diversas alterações, por exemplo: adicionar as mensagens dos agentes relé de geradores, proteção de barra, proteção na conexão da geração distribuída (GD) e etc. Assim, o sistema possui proteção de retaguarda apenas nos geradores, todos os demais elementos possuem sua proteção completamente dependente do sistema de comunicação.

3.5 PROTEÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

Na proteção de geradores síncronos de médio porte, acima de 1 MVA e no máximo de 12,5 MVA, o IEEE (IEEE Standards Association, 2001) faz as recomendações básicas das proteções: sobrecorrente temporizada com restrição de tensão 51V; sobrecorrente temporizado de terra 51G; proteção diferencial percentual 87; proteção direcional de potência 32; proteção contra perda de excitação 40; relé de sobrecorrente de sequência negativa 46; relé de proteção de terra do circuito de excitação 64F. Uma ampla revisão bibliográfica da proteção de geradores síncronos é apresentada no trabalho de (Pinto, 2015).

A proteção de geradores é utilizada na arquitetura proposta, como será visto na seção 4.1. A seguir são apresentadas as funções de proteção adicionais implementadas nos agentes relé dos geradores síncronos, conforme (Pinto, 2015). Da subseção 3.5.1 a 3.5.4: Sobretensão instantâneo 59I; Subtensão instantâneo 27I; Sobretensão temporizado 59T; Subtensão temporizado 27T; Proteção diferencial percentual 87; Sobrecorrente temporizado com restrição de tensão 51V; Sobrecorrente temporizado de neutro 51G.

3.5.1 Sobretensão e Subtensão

A sobretensão em geradores síncronos provoca grandes esforços no isolamento da máquina (Kindermann, 2014a). A Tabela 3.1 apresenta a capacidade de um gerador, suportar sobretensão, sem sofrer danos. Assim, esta proteção deve possuir dois ajustes, um instantâneo, para valores elevados de sobretensão, e outro temporizado, para não ultrapassar os limites da máquina. O aumento no nível de tensão nos terminais, podem ser causado por descargas atmosféricas, perda súbita de carga, falha no regulador de tensão, entre outros.

Tabela 3.1 Nível de Sobretensão e tempo sem danos ao gerador

Tensão	Tempo
105%	Continuamente
110%	30 min
115%	5 min
125%	2 min

Fonte: (Blackburn e Domin, 2014)

A subtensão apresenta os seguintes malefícios: reduz o limite de estabilidade, excessiva absorção de reativo e mau funcionamento de equipamentos que possuem seu desempenho baseado na medição de tensão (IEEE Standards Association, 2001; IEEE Power System Relaying Committee, 2013; Kindermann, 2014a). Os geradores síncronos são projetados para suportar continuamente uma subtensão de 95% da tensão nominal.

3.5.1.1 Implementação da sobretensão instantânea 59I

Caso a sobretensão atinja 140% da tensão nominal do gerador (Kindermann, 2014a), a proteção automaticamente envia comando de abertura de disjuntor, não necessitando do sistema de comunicação para atuar.

3.5.1.2 Implementação da sobretensão instantânea 27I

Quando o nível de tensão, vai a 40% da tensão nominal do gerador síncrono, em um intervalo de tempo de 2 ciclos, a proteção 27I opera. Esta proteção não é capaz de abrir o disjuntor, ela informa o evento ao agente coordenador. Essa informação de evento auxilia o agente coordenador a localizar a falta como será explorado na subseção 4.1.2.

3.5.1.3 Implementação da sobretensão/subtensão temporizada 59T

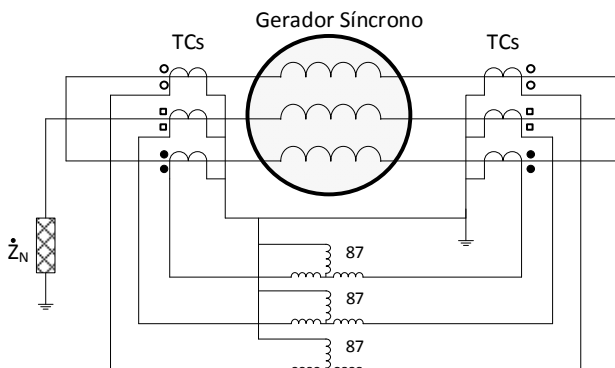
27T

As proteções temporizadas de sobretensão e subtensão foram utilizadas de acordo com as equações apresentadas em (Kindermann, 2014a). Esta proteção busca eliminar sobretensões e subtensões, que não são capazes de acionar as proteções 59I ou 27I.

3.5.2 Proteção diferencial percentual 87

A proteção diferencial percentual compara as correntes de entrada e saída, em uma zona de proteção definida entre os transformadores de corrente (TC). Necessitando, no mínimo, de seis TCs, um por fase e um em cada extremidade, como se pode observar na Figura 3.6.

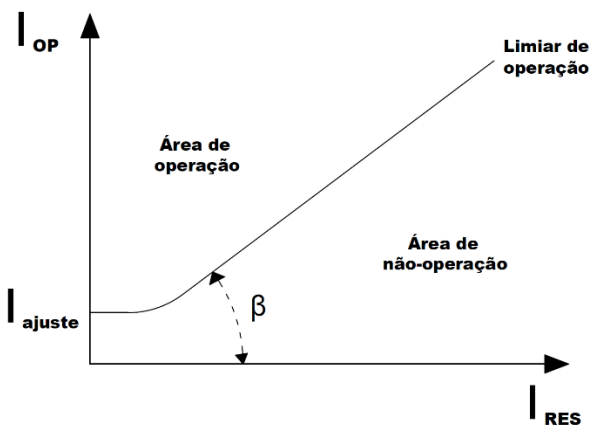
Figura 3.6 Proteção diferencial, gerador síncrono



Fonte: (Kindermann, 2008), editada pelo autor.

A Figura 3.7 apresenta graficamente como a proteção 87 classifica a ocorrência de uma falta na região de proteção. O símbolo β representa a inclinação da reta e junto com a configuração de I_{ajuste} , buscam evitar atuação indevida, podendo ser causada por erros da classe de exatidão, dos TCs por exemplo. O relé necessita calcular I_{RES} (corrente de restrição) e I_{OP} (corrente de operação), através do conjunto de equações (3.5), para relés digitais (Schweitzer Engineering Laboratories, 2013), para cada uma das fases. Após realizar o cálculo, é necessário verificar se o ponto faz parte da zona de operação ou não.

Figura 3.7 Curva de operação



Fonte:(Pinto, 2015).

$$\begin{cases} I_{RES} = |\dot{I}_1| + |\dot{I}_2| \\ I_{OP} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2| \end{cases} \quad (3.5)$$

\dot{I}_1 = Corrente em um dos extremos.

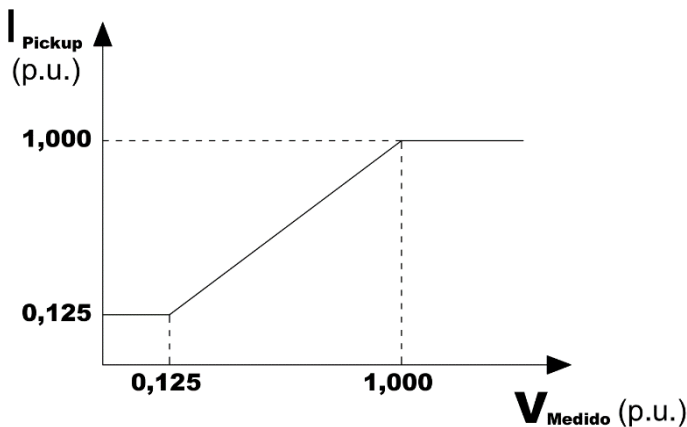
\dot{I}_2 = Corrente no extremo oposto a \dot{I}_1 .

O ajuste da proteção 87 foi realizada neste trabalho conforme (IEEE Power System Relaying Committee, 1995; Kindermann, 2014a). Inclinação da reta de 20% e I_{ajuste} igual a 20% da corrente nominal do gerador.

3.5.3 Sobrecorrente temporizada com restrição de tensão 51V

A proteção de sobrecorrente temporizada com restrição de tensão (51V), altera a corrente de ajuste (*pickup*), com base na tensão. Esse princípio é observado na Figura 3.8, quanto menor a tensão medida, menor será o ajuste da proteção 51. Assim, acelerando a atuação da proteção.

Figura 3.8 Característica da proteção 51V



Fonte: (IEEE Power System Relaying Committee, 1995), editada por (Pinto, 2015).

Configurado para 150% da corrente nominal com o gerador a tensão nominal (Dudor e Padden, 1995). A temporização realizada pela

curva moderadamente inversa IEEE, conforme apresentado em (IEEE Power System Relaying Committee, 1997; Kindermann, 2012b). Não necessitando do sistema de comunicação para abrir o disjuntor do gerador síncrono.

3.5.4 Sobrecorrente temporizada de neutro 51G

A proteção de sobrecorrente temporizada de neutro de gerador monitora a corrente que circula no neutro do gerador. A corrente de ajuste dessa proteção deve ser feita acima da corrente desbalanceada considerada normal e abaixo da corrente que passa pelo neutro do gerador na ocorrência de uma falta monofásica à terra (IEEE Power System Relaying Committee, 2013).

Na implementação a corrente de ajustada utilizada, foi de 10% da corrente nominal, como sugerido em (Kindermann, 2012b). A proteção também é capaz de abrir o disjuntor da máquina diretamente.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo expõe as características de microrredes e sistemas de proteção, explorando a proteção de redes de distribuição, proteção de geradores síncronos e uma ampla revisão bibliográfica de sistemas de proteção para microrredes. São informadas as dificuldades e desafios que os sistemas de proteção de microrredes buscam superar, em conjunto com as diferentes estratégias de proteção de microrredes existentes e suas respectivas limitações.

As proteções de geradores síncronos aqui apresentadas estão implementadas para a proteção de retaguarda, essa e as demais informações apresentadas neste capítulo buscam preparar o leitor para o capítulo 4, no qual será apresentada a metodologia proposta, evidenciando a arquitetura multiagente utilizada. Desta forma o capítulo retrata diferentes sistemas de proteções de microrredes, buscando familiarizar o leitor com a proposta a ser apresentada posteriormente.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é abordada a arquitetura proposta para o sistema multiagente proposto para a proteção de microrredes, apresentada na seção 4.1; seguido das considerações finais do capítulo na seção 4.3.

4.1 ARQUITETURA PROPOSTA PARA O SISTEMA

MULTIAGENTE

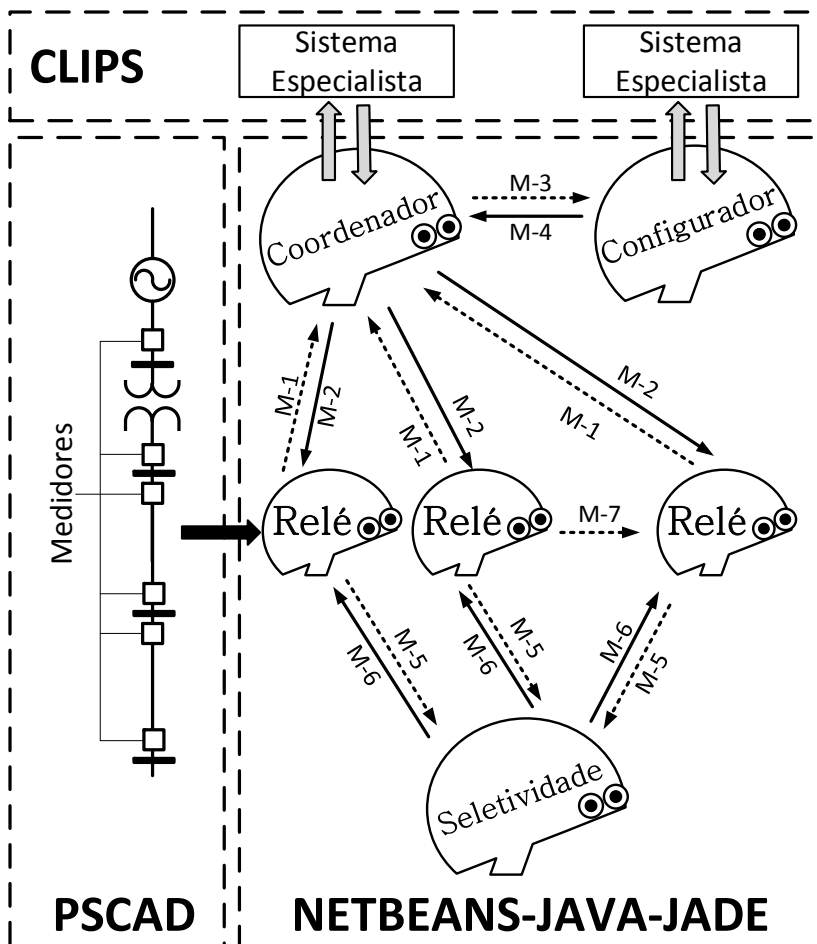
A arquitetura multiagente proposta, ilustrada na Figura 4.1, utiliza dois métodos para evitar inconsistências: estrutura hierárquica composta pelos agentes relés, coordenador e configurador, responsáveis pela análise *on-line*; e central de planejamento realizada no agente seletividade, que em conjunto com os agentes relé, compõem a análise *off-line*.

A Figura 4.1 apresenta também os programas utilizados para realizar a simulação da arquitetura proposta. O NETBENS-JAVA-JADE representa o programa utilizado para implementar os agentes em JAVA, através da biblioteca JADE. Netbens é uma plataforma de desenvolvimento integrada. CLIPS foi utilizado para os sistemas especialistas, do agente coordenador e configurador. As setas em destaque grifadas em cinza implicam na troca de dados durante a simulação do SMA em JAVA com os sistemas especialistas do agente coordenador e configurador em CLIPS. A seta em destaque grifada em preto indica o envio de dados da simulação da microrrede em PSCAD aos agentes relé em JAVA, este envio de dados ocorre previamente a simulação do SMA. As etapas necessárias para realizar as simulações são apresentadas em detalhes na seção 5.2.

As análises *on-line* e *off-line* são abordadas nas subseções 4.1.2 e 4.1.3, respectivamente. Como o agente relé é utilizado em ambas as estratégias, suas particularidades são abordadas na subseção 4.1.1, previamente às subseções das análises. Nas subseções de análise, descreve-se o papel específico do agente relé tanto na análise *on-line* quanto na *off-line*.

No desenvolvimento dos agentes foi utilizada a combinação de comportamentos cíclicos, máquina de estados finitos, e paralelo, comumente nas ações de troca de mensagens (comunicação entre agentes). Os comportamentos utilizados no desenvolvimento dos agentes, são disponibilizados no *framework* JADE.

Figura 4.1 Arquitetura multiagente



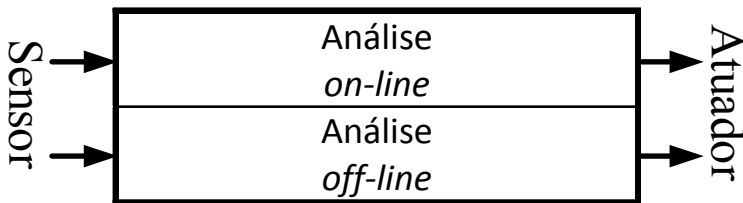
Fonte: Próprio autor.

4.1.1 Arquitetura do agente relé

O agente relé apresenta a arquitetura em camadas horizontais, na qual cada camada está conectada diretamente aos sensores e atuadores, conforme explorado na subseção 2.1.2.4. Sendo dividido em duas camadas, como apresentado na Figura 4.2, é necessário para as análises

on-line e *off-line*. Devido às características desejadas do sistema de proteção multiagente, não é necessário a existência de um mediador, pois as estratégias são projetadas para operarem a proteção da microrrede sem a interferência de uma estratégia na outra.

Figura 4.2 Camadas horizontais do agente relé



Fonte: Próprio autor.

As estratégias de proteção não possuem a capacidade de bloquear a outra, assim evitando que um erro cometido em uma seja capaz de se propagar ou interferir de qualquer maneira na outra. De modo que, devido as características deste agente e para simplificar sua operação, o mesmo é visto como dois agentes independentes (ambas as camadas têm a autonomia de realizar ações, assim como é considerado que existem recursos suficientes para ambas as camadas em todos os instantes), sendo abordado desta maneira nas subseções 4.1.2.1 e 4.1.3.1. Tendo em mente que ambos possuem os mesmos sensores de entrada (mesmo arquivo de dados de entrada) e possuem a capacidade de abrir o mesmo disjuntor (arquivo de saída, o qual concentra as informações das proteções de todo o sistema multiagente).

4.1.2 Análise *on-line*

A análise *on-line* utiliza um SMA de estrutura hierárquica, com um conjunto de sistemas especialistas, para realizar a proteção principal da microrrede. A mesma é dependente do sistema de comunicação, implicando que na ocorrência de falhas no mesmo a microrrede estaria desprotegida. Assim, esta análise exige a existência de uma proteção de retaguarda, proporcionada pela análise *off-line*.

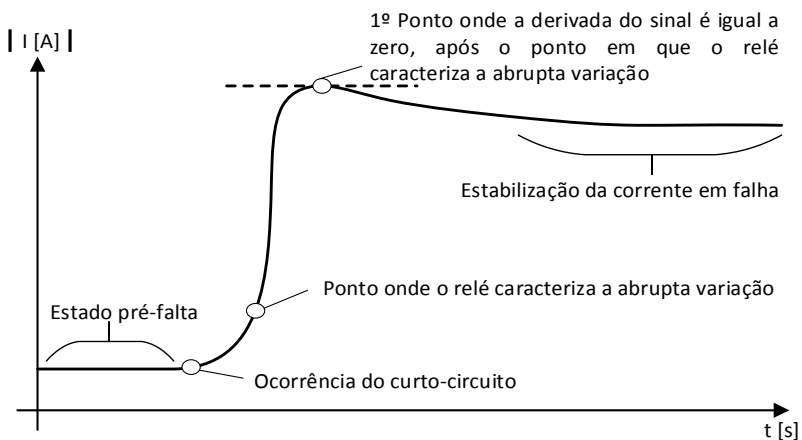
O funcionamento da análise *on-line* se torna claro, após a apresentação da função de cada agente envolvido: relé (*on-line*) na

subseção 4.1.2.1; em 4.1.2.2 coordenador; 4.1.2.3 configurador. A troca de mensagens do SMA da análise *on-line* é explorada na subseção 4.1.2.4.

4.1.2.1 Agente relé (*on-line*)

Na análise *on-line* os relés enviam mensagem ao agente coordenador quando consideram que o sistema esteja sob falta. Basicamente os agentes relés necessitam caracterizar uma possível falta e enviar informações úteis ao agente coordenador. Assim, o mesmo será capaz de localizar a falta, caso a microrrede esteja sob falta e identificar os disjuntores que devem operar.

Figura 4.3 Histórico da corrente de uma das fases vista por um relé, no início de um curto-circuito.



Fonte: Próprio autor.

O histórico da corrente eficaz vista em uma das fases por um relé, desde o estado anterior ao curto-circuito até a estabilização da corrente após o início do mesmo, está ilustrado na Figura 4.3. Na ocorrência de um curto-circuito a corrente da fase envolvida ou das fases envolvidas aumentam consideravelmente, em relação ao estado pré-falta. Esta abrupta variação é utilizada no mecanismo de proteção dos agentes relé. A abrupta variação é utilizada para caracterizar um possível curto-circuito na microrrede, ponto indicado na Figura 4.3

A caracterização do ponto foi configurada em todos os agentes relé para uma elevação em módulo de cinquenta por cento no valor da corrente, comparando com o valor a três ciclos do valor atual, esta escolha foi tomada de forma empírica, através de diversas simulações, para

assegurar que grande parte dos agentes fosse sensibilizado, nos modos de operação da microrrede.

É desejado que o agente configurador seja capaz de identificar o local da ocorrência do curto-circuito na microrrede, para isso são necessárias informações úteis. Não é interessante informar:

- A detecção de uma abrupta variação, pois esta mensagem seria enviada por diversos relés e o sistema não seria capaz de identificar com seletividade o elemento ou zona em falta.
- Caso seja identificada a estabilização da corrente após a abrupta variação, a rotina de caracterização de estabilidade seria sensível a variações, podendo levar longos períodos de tempo para informar o agente configurador. Desejável que seja o mais rápido possível.
- Um tempo definido após a detecção da abrupta variação, pois a fixação do tempo seria comumente antes da estabilização ou depois. Haveria dificuldade escolher um apropriado ajuste do tempo definido, sendo dependente do estado da microrrede, para ser próximo do ponto ideal.

Como apresentado nos itens acima, há muitas maneiras de definir a informação da mensagem. A forma escolhida faz uso da detecção do primeiro ponto onde a derivada da corrente é igual a zero, conforme apresentado na Figura 4.3. Este método possui as seguintes vantagens:

- Todos os relés informam o valor de maior amplitude da corrente após a detecção da abrupta variação.
- A detecção da derivada igual a zero é independente de qualquer alteração na microrrede.
- Velocidade, o agente terá todas as informações necessárias para enviar a mensagem, sem a necessidade da definição ou presença de um tempo destinado para aguardar a estabilização da corrente de curto-circuito.

O agente relé informa o coordenador na ocorrência de uma abrupta variação na corrente. Nessa mensagem está contido o valor em módulo da máxima corrente detectada após a abrupta variação. Todos os agentes relé possuem essa capacidade.

4.1.2.2 Agente coordenador

O agente coordenador, como ilustrado na Figura 4.1, centraliza as informações dos agentes relé. Possui a autoridade de comandar abertura de disjuntores, através dos agentes relé e informar o agente configurador

o local da falta; assim o mesmo pode retornar a informação sobre quais disjuntores devem ser abertos.

A principal função do agente coordenador é realizar a localização da falta, utilizando as informações proveniente dos agentes relé, através das mensagens M-1, em seu sistema especialista. Assim, o mesmo analisa as mensagens para definir a localização da seção em falta (linha de distribuição, barra, transformador ou gerador) ou a ausência da mesma. Contudo, a ocorrência de um evento na microrrede não ocasionará alterações instantâneas, nem sincronizadas. Resumindo, os relés irão detectar possíveis faltas em momentos distintos, e só então informarão ao agente coordenador. O sistema especialista do agente coordenador necessita das informações da microrrede como um todo, apenas uma não permitiria nenhum tipo de análise. Para solucionar o problema descrito, foi definida uma janela de tempo para as mensagens. Assim, após o recebimento da primeira mensagem de possível falta, o agente coordenador aguarda um ciclo da rede, pelas demais mensagens, após este tempo as informações contidas nas mensagens recebidas nesta janela de tempo serão utilizadas no sistema especialista. O tempo de um ciclo foi ajustado empiricamente, tendo em vista, os tempos de resposta a eventos da microrrede. Necessário estabelecer tempo de reabertura da caixa de entrada, para que o SMA da análise *on-line* se mantenha operante após um evento de possível falha. O tempo de reabertura da caixa do agente coordenador é igual a três ciclos da rede, contados a partir do recebimento da primeira mensagem de possível evento. Desta forma as mensagens, provenientes de agentes relé, a respeito de possível falta na microrrede, fora do intervalo da janela, e antes do tempo de reabertura da caixa de entrada de mensagens, são descartadas. Assim, após a ocorrência de um evento na microrrede o agente coordenador estaria apto a lidar com outro, desde que haja um tempo superior ou igual a três ciclos entre os eventos.

Conforme descrito anteriormente, o agente coordenador identifica a existência ou não de falta, e em caso de falta a localiza. Para cumprir com estas funções o mesmo utiliza um sistema especialista. Concluído o tempo da janela, recebidas as mensagens do evento, o agente coordenador organiza as informações recebidas de modo a poder inserir o conhecimento individual de cada relé, como um todo ao sistema especialista. As informações são inseridas como fatos, os quais são processados pela base de conhecimento do sistema especialista, retornando suas conclusões. O sistema especialista, é similar ao descrito em (Pinto, 2015). Suas regras são apresentadas no Apêndice A.

4.1.2.3 Agente configurador

Diferente do agente coordenador, o agente configurador recebe unicamente mensagens do coordenador. Ao receber uma mensagem do tipo M-3, com a informação do local da falta na microrrede o agente configurador inicializa o seu sistema especialista. Com os resultados de saída do sistema especialista, disjuntores a serem abertos, o agente envia estas mensagens para o agente coordenador através de mensagens do tipo M-5. O sistema especialista, é similar ao descrito em (Pinto, 2015) e suas regras são exploradas no Apêndice A. O sistema especialista do configurador também serve para definir os disjuntores de retaguarda em caso de falha de disjuntor. Caso seja constatado falha de disjuntor o agente configurador define os disjuntores de retaguarda, a determinação de falha disjuntor é proporcionada pelo Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados, como em (Pinto, 2015).

4.1.2.4 Fluxo de mensagens

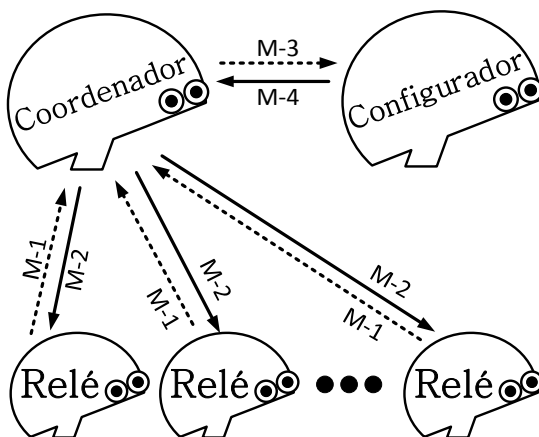
Nesta subseção são abordadas as mensagens trocadas na análise *on-line*. Existe unicamente um tipo de comunicação, o qual obedece a estrutura hierárquica da análise *on-line*. Assim, apresentando agente relé, agente coordenador e agente configurador, em ordem hierárquica crescente.

Conforme abordado na subseção 2.2.1.1, este trabalho utiliza o protocolo de requisição de interação. Considerando que todas as requisições (*requests*) serão aceitas (*agree*) e posteriormente os agentes que receberam a *request* informam a realização da tarefa (*inform-done*), é aceitável focar a atenção nos *requests*. Assim, as setas que representam troca de mensagem na Figura 4.4, por M-1, M-2, M-3 e M-4 fazem referência a mensagens do tipo, *request*.

Todos os agentes relé têm capacidade de comunicação unicamente com o agente coordenador, sendo capazes de iniciar comunicação através de mensagens do tipo M-1. A mensagem M-1 pode conter três tipos de informações: possível falta na rede, falha na abertura do disjuntor e alteração na microrrede. O agente coordenador ao receber uma mensagem do tipo M-1, pode aguardar outras mensagens, para então rodar seu sistema especialista para localizar a falta, e enviar o resultado através de M-3. Através de seu sistema especialista do agente configurador define os disjuntores a serem abertos. Assim, ao receber uma mensagem do tipo M-3, o configurador, envia uma mensagem do tipo M-4 com o resultado do sistema especialista, ao agente coordenador. O agente coordenador ao

receber M-4 envia mensagens de abertura de disjuntor aos agentes relés apropriados. Sempre que um agente relé recebe uma mensagem do tipo M-2 é devido ao recebimento de comando de abertura de disjuntor.

Figura 4.4 Comunicação, análise *on-line*



Fonte: Próprio autor.

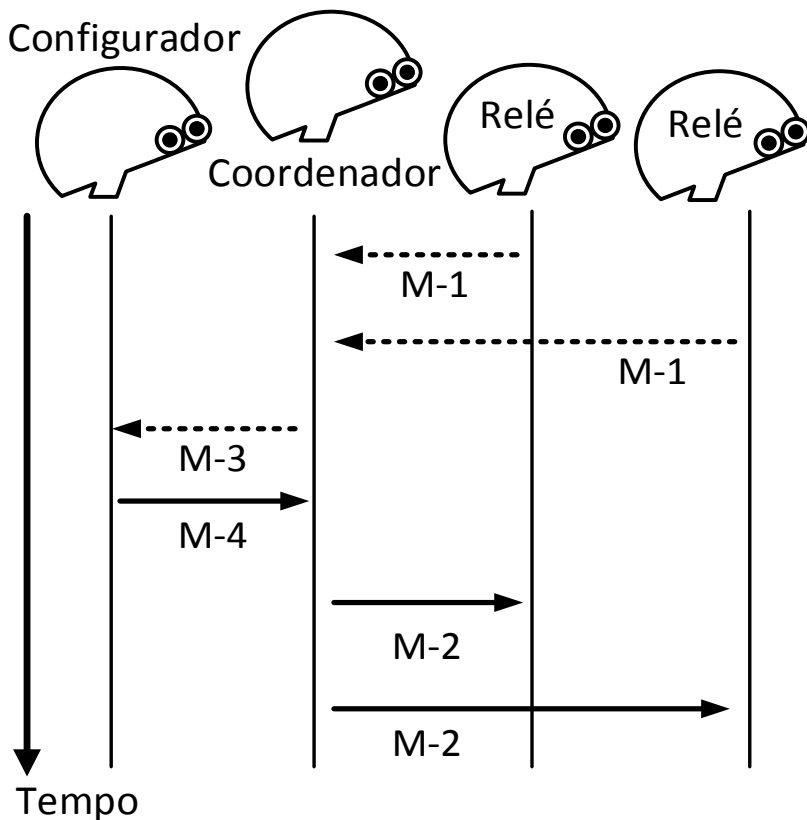
A comunicação presente na análise *on-line* está ilustrada na Figura 4.4. Há possibilidade de diferentes informações, contidas nas mensagens de tipo M-1, o que dificulta os possíveis fluxos de mensagens. De modo a facilitar a compreensão, a seguir é apresentado um resumo do fluxo de mensagens da análise *on-line*, com uma breve descrição do que está ocorrendo nos agentes envolvidos, considerando uma falha no interior da microrrede, que não seja interna a algum gerador, apresentada na Figura 4.5. Assim, temos a seguinte ordem de acontecimentos e mensagens:

- I. M-1, o agente relé informa ao agente coordenador uma possível falta. A mensagem informando o valor de pico de corrente registrada e a função de proteção que atuou, levando o agente relé a enviar a mensagem do tipo M-1.
- II. O agente coordenador aguarda uma janela de tempo, após ter recebido uma mensagem do tipo M-1. Utilizando as mensagens recebidas, na janela de tempo, o mesmo inicializa o sistema especialista que localiza a falta na microrrede. Conhecendo o local de falta o mesmo envia uma mensagem do tipo M-3, com esta informação ao agente configurador.
- III. Recebendo a mensagem M-3, o agente configurador inicializa seu sistema especialista, o qual terá como saída os disjuntores

que devem atuar. O agente configurador envia uma mensagem, do tipo M-4, ao agente coordenador, com o resultado do sistema especialista.

- IV. O agente coordenador, de posse das informações da mensagem M-4, envia mensagens para o relé ou relés específicos abrirem seus disjuntores, através de M-2. A mensagem do tipo M-2 é um comando direto, os relés ao receber M-2 buscam abrir o seu respectivo disjuntor, instantaneamente.

Figura 4.5 Exemplo de comunicação, análise *on-line*



Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Análise *off-line* (foco do trabalho)

A análise *off-line* foi desenvolvida para a proteção de retaguarda da microrrede. Devido a necessidade de proteção de retaguarda da análise *on-line*, a qual é completamente dependente do sistema de comunicação. Os agentes relé de geradores possuem diversas funções de proteção, como apresentado na seção 3.5. A análise *off-line* de relé de linha visa primordialmente três características, a saber: proteção de retaguarda dos relés de linha através da proteção sobrecorrente direcional temporizada (67), proporcionar uma maior autonomia para os agentes relé e manter a seletividade entre os agentes relé de linha. Para alcançar estes objetivos faz-se necessário:

- Implementar a função de sobrecorrente direcional 67. O relé tem a informação do sentido do fluxo de potência. No caso de fluxo de potência para sentido reverso, a função 67 não contará tempo para a abertura de seu disjuntor, assim bloqueando a proteção 67. Os agentes relé de linha possuem diferentes configurações iniciais nos dois modos de operação da microrrede.
- Permitir que o agente relé de linha altere a corrente de ajuste (do inglês *pick up*) independente dos demais agentes, desta forma mantendo o relé sensível a faltas.
- Criação de um novo agente que busque manter a seletividade, o qual é capaz de localizar erros na seletividade e calcular novos parâmetros. Assim, o mesmo necessita de informações da microrrede, como a matriz de incidência e as correntes de curto-circuito trifásico em diferentes pontos estratégicos da microrrede, nos seus distintos modos de operação.
- Implementar lógica específica nos relés responsáveis por proteção de linhas em paralelo.

A forma na qual a análise *off-line* funciona ficará mais clara com o estudo do fluxo de mensagem 4.1.3.4 e do algoritmo do agente seletividade 4.1.3.2. Relevante ter em mente que a atuação dos relés é independente do sistema de comunicação, a troca de mensagem ocorre para manter a seletividade dos relés de linha na existência de alterações topológicas e de carregamento. Assim, o sistema de proteção sempre está sensível a falhas, mas necessita do sistema de comunicação, anteriormente a ocorrência da falta, para garantir a coordenação da proteção dos agentes relé de linha.

4.1.3.1 Agente relé (*off-line*)

Como descrito na subseção 4.1.1, o agente relé pode ser visto como dois agentes independentes, nesta subseção é discutido o desempenho do agente relé na análise *off-line*. Os agentes relé de gerador possuem suas funções de proteção apresentadas na seção 3.5, possuindo autonomia para abrir seu disjuntor. Maiores informações da proteção dos geradores síncronos podem ser encontradas em (IEEE Power System Relaying Committee, 1995; Dudor e Padden, 1995; IEEE Power System Relaying Committee, 1997; IEEE Standards Association, 2001; Kindermann, 2012b; IEEE Power System Relaying Committee, 2013; Blackburn e Domin, 2014; Kindermann, 2014a; Pinto, 2015). O restante desta subseção foca nos agentes relé de linha.

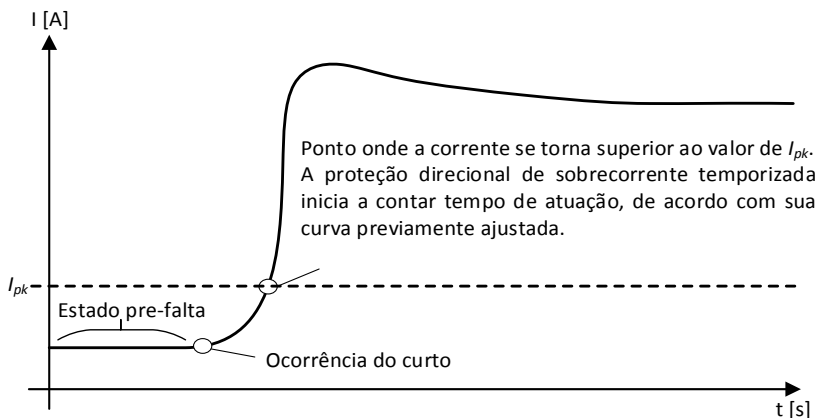
Nesta análise os relés de linha possuem a capacidade de abrir diretamente o disjuntor através da proteção direcional de sobrecorrente temporizada. O agente relé de linha possui a capacidade de comunicação, podendo trocar mensagens com o agente seletividade ou, no caso de linhas de distribuição em paralelo, manter a proteção coordenada e evitar operação indevida, respectivamente.

O agente relé necessita de uma configuração inicial. Na etapa de inicialização do agente relé, o mesmo realiza a leitura de um arquivo de texto (.txt) com os dados da proteção, com a nomenclatura “Dados_LT_Ag_Rele_X_X_X” ou “Dados_Gerador_Ag_Rele_X_0_X” os caracteres “X” são identificadores específicos do relé, a nomenclatura específica dos relés é apresentada na subseção 5.1.1.

Em um sistema real de distribuição da Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), este mesmo sistema teste, foi utilizado nos trabalhos de (Maiola, 2014; Nascimento, 2014; Pinto, 2015). O sistema possui quatro pequenas usinas hídrelétricas, dois geradores eólicos, cinco linhas de distribuição e duas cargas.

A Figura 4.6 ilustra o histórico do valor da corrente eficaz vista em uma das fases por um relé, desde o estado anterior ao curto-circuito até a estabilização da corrente após o início da falta. Diferente do apresentado na Figura 4.3, este apresenta sinal, o qual indica a direção da corrente. A proteção direcional sobrecorrente temporizada atua unicamente quando diretamente polarizada, convencionado o sinal positivo.

Figura 4.6 Proteção direcional de sobrecorrente temporizado



Fonte: Próprio autor.

Como se pode notar a equação do cálculo de tempo apresentada na subseção 3.3.2 não podem ser utilizadas diretamente, pois a equação (3.1) exige valor constante da corrente. Conforme apresentado na Figura 4.6 o valor da corrente não é constante. Em (IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, 1997) são apresentados os padrões das características de curvas inversas, para proteção de sobrecorrente. Conforme o padrão do IEEE a equação que caracteriza a operação da proteção, quando a corrente é superior a corrente de ajuste (I_{pk}) é (4.1) e a equação que descreve $t(I)$ é apresentada em (4.2).

$$\int_0^{T_0} \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (4.1)$$

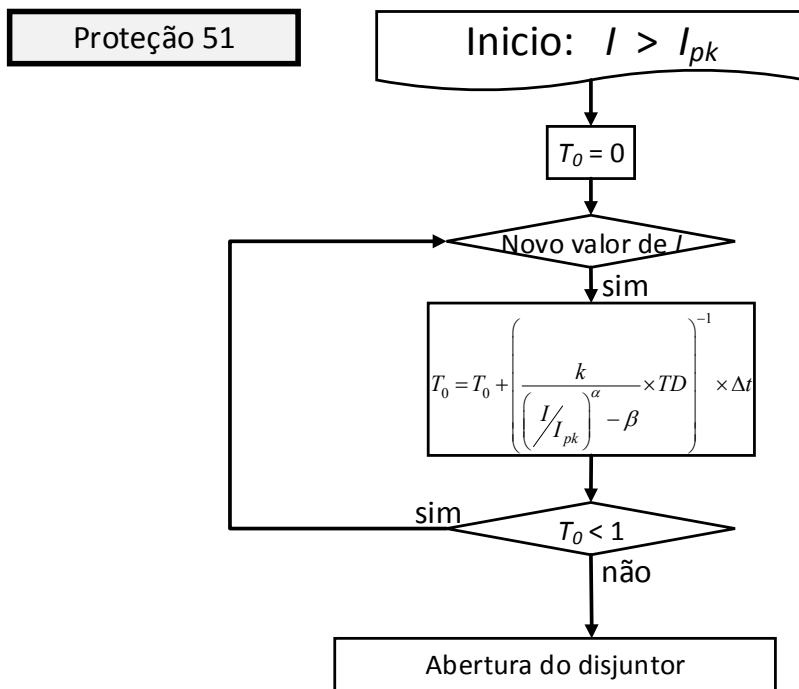
T_0 = Tempo de operação.

$$t(I) = TD \times \frac{k}{\left(\frac{I}{I_{pk}} \right)^\alpha - \beta} \quad (4.2)$$

Como descrito na equação (4.1), o tempo de operação do relé é definido através da resolução da integral. O fluxograma, o qual descreve a implementação das equações, de modo a realizar a proteção no agente relé, programado em Java, é apresentado na Figura 4.7. O fluxograma não

contempla a possibilidade da I ser inferior a I_{pk} após o início de incrementar T_0 , caso isso ocorra o relé considera que o curto-circuito foi eliminado e reinicia a proteção de sobrecorrente. Após a eliminação do curto-circuito o relé pode reiniciar do zero a contagem de tempo, pode esperar um tempo definido para realizar a reinicialização e zerar a contagem através de uma curva temporizada (Schweitzer Engineering Laboratories, 2013), foi escolhido a reinicialização instantânea devido a sua simplicidade. Relembrando que I apresenta sinal, permitindo o incremento de T_0 unicamente quando polarizada diretamente (convencionado sinal positivo).

Figura 4.7 Proteção de sobrecorrente temporizada



Fonte: Próprio autor.

Δt = passo de tempo, dos dados de saída do PSCAD.

Cada fase possui sua própria proteção direcional de sobrecorrente temporizado, podendo apresentar T_0 diferentes, mas com os mesmos parâmetros de atuação. Relevante ter em mente que toda a abertura de

disjuntor é tripolar, assim que uma das fases apresentar $T_0 = 1$ é comandada a abertura do disjuntor.

O agente relé possui a autonomia de alterar sua corrente de ajuste (I_{pk}). Assim, o relé busca manter-se sensível a faltas, mesmo na ocorrência de alteração na microrrede. O I_{pk} foi ajustado conforme apresentado na equação (4.3). Para evitar que a corrente considerada normal pelo relé ($I_{atual\ estável}$) seja constantemente alterada, a variável possui uma faixa de tolerância considerada normal. As tolerâncias superior e inferior estão descritas na equação (4.4).

$$I_{pk} = I_{atual\ estável} \times 1,5 \quad (4.3)$$

$I_{atual\ estável}$ = Corrente considerada normal, pelo agente relé.

$$I_{tol+} = I_{atual\ estável} \times 1,1 \quad (4.4)$$

$$I_{tol-} = I_{atual\ estável} \times 0,1$$

I_{tol+} = Tolerância superior.

I_{tol-} = Tolerância inferior.

A Figura 4.8 apresenta o histórico de uma suave elevação na corrente vista nas fases do relé, causada por exemplo: um acréscimo na carga a montante, perda de uma unidade geradora, perda de uma linha e outras. Para que o agente relé altere seu $I_{atual\ estável}$, algumas condições devem ser satisfeitas:

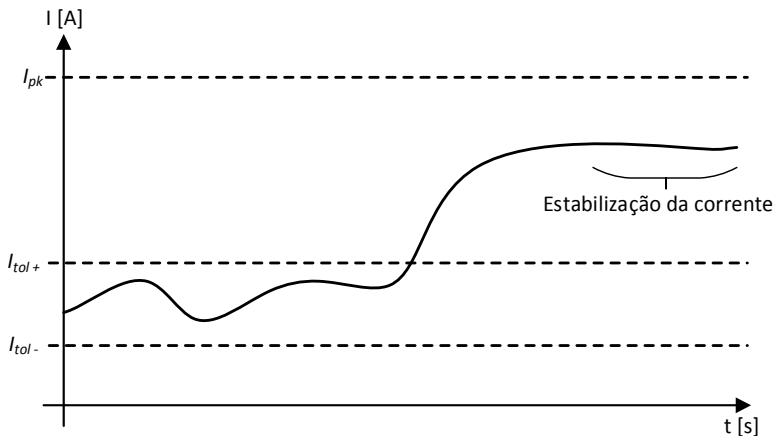
- A corrente nas fases não pode apresentar desequilíbrio superior a 10%. Já que desequilíbrios superiores a 10% são caracterizados como possível falha.
- A variável T_0 é obrigatoriamente igual a zero em todas as fases. Impedindo que a atualização do $I_{atual\ estável}$ afete a proteção.
- O novo valor de $I_{atual\ estável}$ deve ser superior ou igual a 30 amperes. Valores abaixo do estabelecido, acabam por apresentar dificuldades em manter a coordenação, pois a atuação ocorre rapidamente exigindo valores demasiadamente elevados de TD (curvas de tempo da proteção 51). Valores baixos de $I_{atual\ estável}$ também possuiriam uma estreita faixa de tolerância, podendo realizar alterações frequentemente. O valor de 30 amperes foi escolhido empiricamente, sendo adequado para a microrrede do sistema teste.

Atendendo às condições acima o agente relé pode alterar seu $I_{atual\ estável}$, o que, conseqüentemente altera os valores de I_{pk} , I_{tol-} e I_{tol+} .

Para evitar constantes alterações é exigida uma estabilidade, permanência do valor de corrente com oscilação máxima de 1% ao longo de quarenta ciclos. Se a corrente estabilizar, conforme ilustrado na Figura 4.8, é realizada as alterações nas variáveis: $I_{atual\ estável}$, I_{pk} , I_{tol-} e I_{tol+} .

Com a alteração da variável I_{pk} , o agente relé envia uma mensagem para o agente seletividade, com as informações do relé e alterações realizadas. Assim, o mesmo pode verificar e buscar manter a coordenação das proteções direcionais de sobrecorrente.

Figura 4.8 Atualização da corrente normal



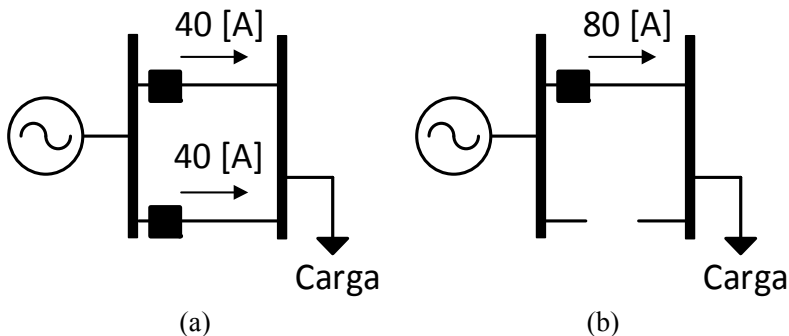
Fonte: Próprio autor.

Agentes relé, que realizam proteção em linha em paralelo possuem a habilidade de trocar mensagens com os agentes relé localizados na mesma barra. A habilidade incorporada considera a possibilidade de perder uma das linhas de modo intencional ou não, podendo chegar a dobrar quase que instantaneamente a corrente na linha adjacente. Para ilustrar essa característica a Figura 4.9 (a) apresenta linhas em paralelo suprindo uma carga de corrente constante, por algum motivo houve a abertura indevida do disjuntor, ilustrada na Figura 4.9 (b), a corrente na linha remanente dobra.

De modo a evitar a atuação indevida da proteção, o relé ao analisar a corrente observada ir a zero envia uma mensagem ao relé da linha em paralelo. Para que o mesmo dobre sua corrente de estado normal, consequentemente I_{pk} , I_{tol-} e I_{tol+} . Assim, sem a existência de comunicação entre relés de linhas em paralelo, a linha restante atuaria por

sobrecorrente, de forma indevida, pois a corrente seria superior à corrente de ajuste.

Figura 4.9 Linhas em paralelo, perda de continuidade em uma.



Fonte: Próprio autor.

4.1.3.2 Agente seletividade

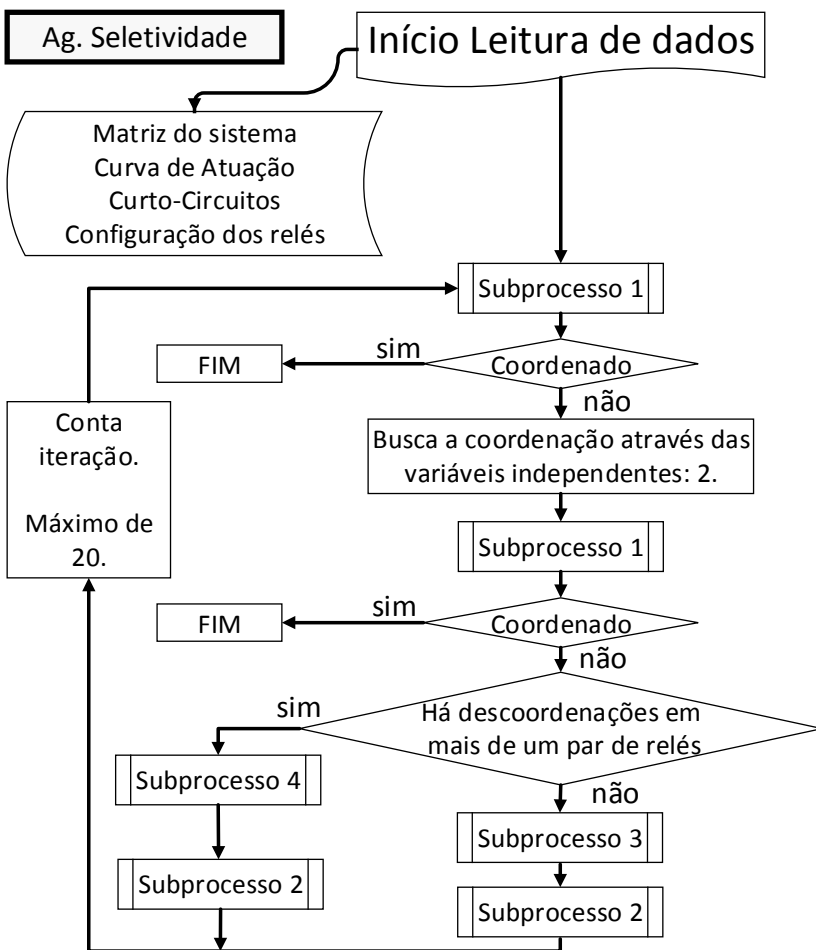
Na maior parte do tempo o agente seletividade fica aguardando mensagens dos relés de linha, e na presença de alterações executa seu algoritmo. Uma alteração no sistema pode ocasionar na sensibilização de um agente relé ou diversos que notificam o agente seletividade. Para evitar modificações desnecessárias, o agente seletividade possui um tempo de espera por possíveis mensagens de outros agentes relés, diferente da janela utilizada na análise *on-line* que elimina mensagens fora de um janela de tempo. Assim, alterações nos relés não são perdidas independente do momento em que as mensagens são recebidas.

O algoritmo do agente seletividade é explicado no fluxograma da Figura 4.10, o qual apresenta a estratégia utilizada para verificar a coordenação da função de sobrecorrente direcional dos relés de linha, no agente seletividade. O fluxograma utiliza o termo variável independente para os agentes relés que se encontram nos extremos do sentido horário e anti-horário de coordenação Figura 5.1, não apresentando linha a jusante ou a montante do relé. Assim, a alteração do tempo (TD) do relé de sobrecorrente temporizado pode ser realizada considerando apenas uma interdependência, sendo facilmente calculado.

Na etapa de inicialização é lido um arquivo Excel (.xlsx) que possui a matriz de incidência, configuração dos relés nos dois modos de operação, as correntes de curto-circuito nos diferentes modos de operação

e os parâmetros da curva de atuação da proteção de sobrecorrente direcional temporizada. Além da etapa de inicialização o algoritmo é subdividido em outros subprocessos numerados que são abordados a seguir.

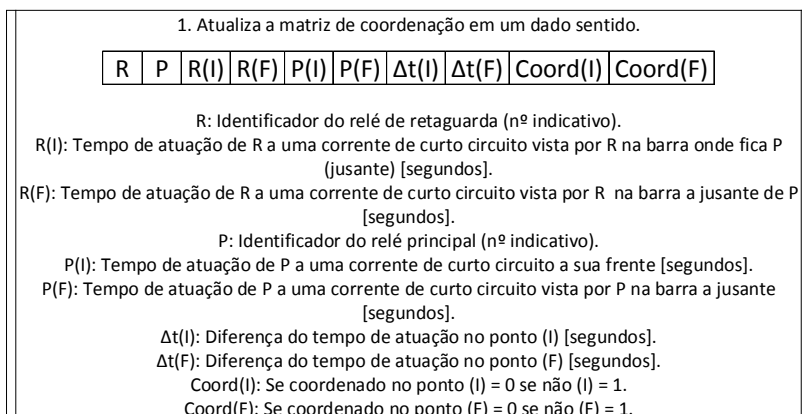
Figura 4.10 Fluxograma geral do agente seletividade



Fonte: Próprio autor.

O subprocesso 1 apresentado na Figura 4.11 organiza um dado sentido em uma matriz, calculando o tempo de atuação do relé principal e de retaguarda em cada uma das possibilidades, informando o tempo de coordenação existente, tanto no início como no fim da linha, e um indicador de falta de coordenação. O tempo de coordenação mínimo escolhido foi 0,3 s. Devido a característica direcional da proteção, a coordenação é separada em sentidos, no convencionado horário e anti-horário. A subseção 4.1.3.3 apresenta um exemplo das convenções do sentido, juntamente com ilustrações das coordenações de um sistema exemplo.

Figura 4.11 Subprocesso 1



$$tempo = \frac{k}{\left(\frac{I}{Ipk}\right)^\alpha - 1} \times \frac{TD}{\beta}$$

Fonte: Próprio autor.

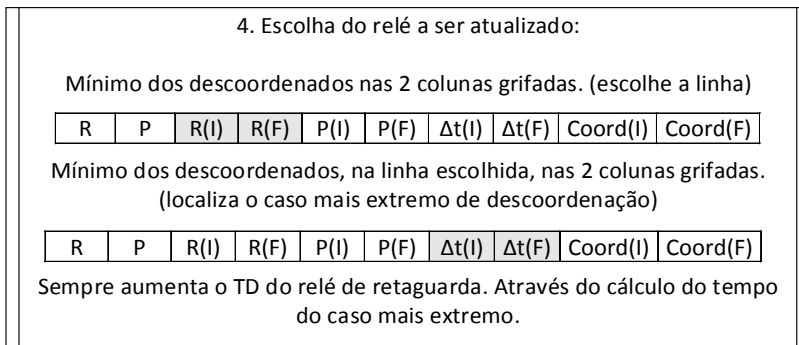
O subprocesso 2 é utilizado nas variáveis independentes. Calculando diretamente o TD desejado através da equação (4.5), caso o mesmo esteja afetando a coordenação do sistema. A faixa de valores aceitáveis para todas as variáveis TD em todo o sistema é limitado a valores de um décimo a três.

$$TD = \frac{\left(\frac{I}{I_{pk}}\right)^{\alpha} - 1}{k} \times \beta \times tempo \quad (4.5)$$

No subprocesso 3, na ocorrência exclusiva de uma das linhas da matriz de coordenação, a qual é ilustrada na Figura 4.11, estar indicando descoordenação, é analisada a possibilidade de aumentar ou reduzir o *TD* de um dos relés, através dos tempos de atuação. Subsequentemente a decisão tomada acima, é localizado o tempo mais extremo e calculado o novo valor para o relé através de (4.5).

O subprocesso 4 na Figura 4.12 é utilizado na presença de mais de uma descoordenação. Seleciona a linha da matriz de coordenação que apresente o menor tempo de coordenação e aumenta o TD do relé de retaguarda para o caso mais extremo através da equação (4.5). Deste modo fica clara a utilização do subprocesso 2 antes de recalculer a matriz de coordenação do subprocesso 1, evitando que a simples descoordenação de variáveis independentes consuma o número de iterações.

Figura 4.12 Subprocesso 4



Fonte: Próprio autor.

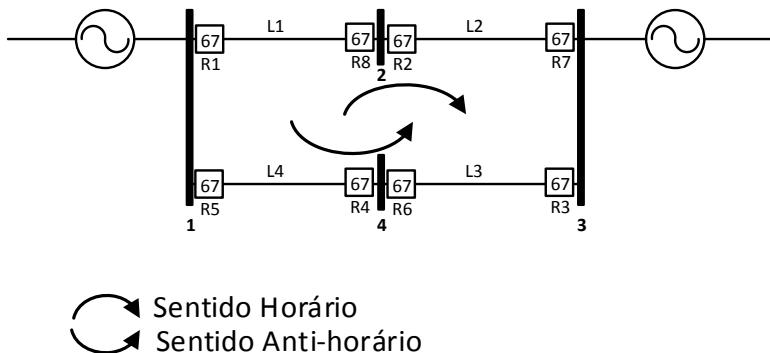
4.1.3.3 Exemplo do algoritmo seletividade

Para melhor esclarecer o algoritmo do agente seletividade, esta subseção contém um exemplo de seu funcionamento. A Figura 4.13 ilustra o sistema exemplo, contendo quatro linhas de distribuição e geradores síncronos na barra 1 e na barra 3. O sistema exemplo possui contribuição para as correntes de curto-circuito de ambos geradores, em

um possível evento de falta nas linhas. A proteção do sistema exemplo utiliza proteção de sobrecorrente temporizada direcional (67), as setas indicam o sentido da proteção, como apresentado na legenda da Figura 4.13.

O sistema teste utiliza o algoritmo do agente seletividade para garantir a coordenação das proteções. Assim, unicamente os elementos de proteção mais próximos a falta devem operar. No caso de ocorrer falha na atuação da proteção primária, a proteção de retaguarda deve atuar. O agente seletividade necessita verificar a coordenação das proteções em ambas as direções, horária e anti-horária.

Figura 4.13 Sistema exemplo

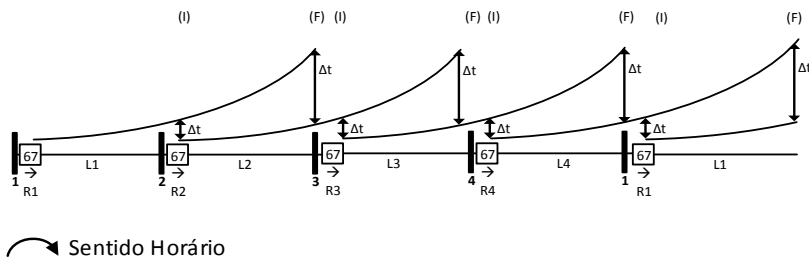


Fonte: Próprio autor.

Na verificação das proteções no sentido horário o agente seletividade calcula a matriz de coordenação, subprocesso 1. Para gerar a matriz de coordenação é necessário calcular o tempo de atuação das proteções primária e retaguarda de linha. O cálculo é realizado no ponto logo à frente do relé primário (I) e no final da linha da proteção do relé primário (F), como ilustrado na Figura 4.14. Para que o sistema de proteção no sentido horário esteja coordenado todas os Δt ilustrados na Figura 4.14 devem possuir valor superior ou igual a tempo de coordenação desejado. O tempo de coordenação escolhido neste trabalho é de 300 ms. Note que na Figura 4.14 e Figura 4.15 a linha onde se padronizou o início do sentido horário e anti-horário se repete. Isto é necessário devido ao sistema do exemplo ser uma malha, não existindo variáveis independentes, a alteração do ajuste da curva de tempo (TD)

sempre altera os tempos de atuação para dois outros relés. Como apresentado, a presença de malhas eleva a dificuldade da coordenação. Alterar um único ajuste de relé pode afetar sua coordenação com vários outros, dependendo de quantas malhas o sistema possui e para quantas linhas um relé dá retaguarda, assim como a presença de linhas curtas e longas.

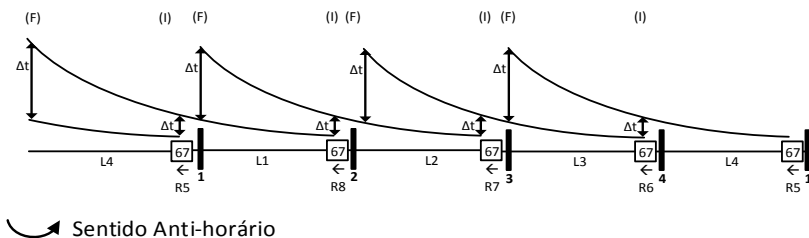
Figura 4.14 Coordenação, sentido horário



Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado na subseção 4.1.3.2 o agente seletividade necessita coordenar as proteções direcionais 67 nos dois possíveis sentidos. De maneira semelhante ao realizado para Figura 4.14, sentido horário, o sentido anti-horário é apresentado na Figura 4.15.

Figura 4.15 Coordenação, sentido anti-horário



Fonte: Próprio autor.

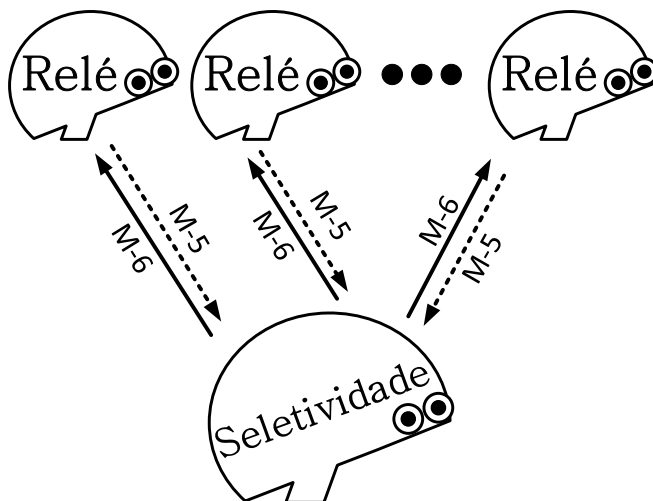
Caso o agente seletividade encontre algum erro de coordenação, sendo no sentido horário ou anti-horário, o algoritmo apresentado na Figura 4.10 é executado em sua totalidade. O agente seletividade realiza alterações nas curvas de tempo (TD) nos relés com erro de coordenação. As alterações de TD são realizadas nos relés necessários para que o sistema de proteção de sobrecorrente direcional se mantenha coordenado. Assim, garantindo a seletividade do sistema de proteção das linhas de distribuição da microrrede.

4.1.3.4 Fluxo de mensagens

Nesta subseção são abordadas as comunicações geradas pela análise *off-line*. Existem dois tipos de comunicação, a envolvendo agentes relé e o agente de planejamento da coordenação, agente seletividade.

Conforme abordado na subseção 2.2.1.1, o trabalho utiliza o protocolo de requisição de interação. Considerando que todas as requisições (*requests*) serão aceitos (*agree*) e posteriormente os agentes que receberam o *request* informam a realização da tarefa (*inform-done*), é aceitável focar a atenção nos *requests*. Assim, as setas que representam troca de mensagem na Figura 4.16 e Figura 4.19, por M-5, M-6 e M-7 fazem referência a mensagem do tipo *request*.

Figura 4.16 Comunicação, agente seletividade



Fonte: Próprio autor.

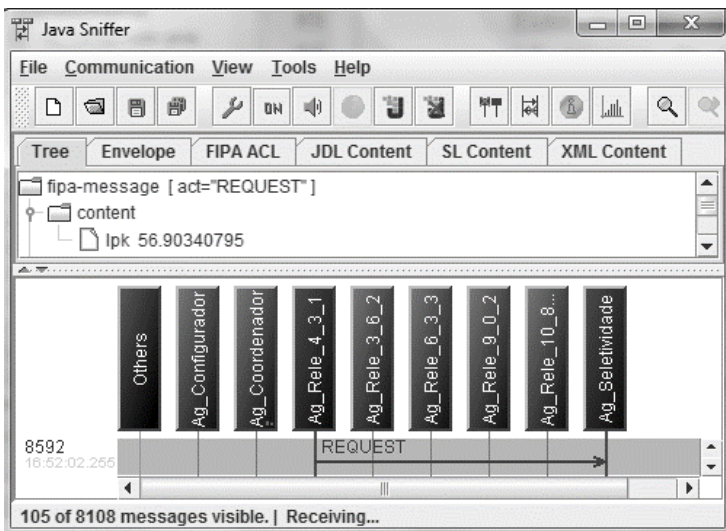
Todos os agentes relé de linha possuem a capacidade de comunicação direta com o agente seletividade, sendo capazes de iniciar comunicação através da mensagens do tipo M-5, conforme ilustrado na Figura 4.16. A mensagem do tipo M-5 é gerada na ocorrência de uma alteração da corrente de ajuste do agente relé, conforme descrito na subseção 4.1.3.1. O agente seletividade aguarda três ciclos, pela mensagem de outros agentes e inicia a verificação de coordenação e posteriormente os ajustes para alcançá-la, se necessário, conforme descrito na subseção 4.1.3.2. Caso cheguem mensagens após o início da

etapa de verificação, ou outra etapa, no final da mesma são adicionadas as informações das mensagens M-5 e reiniciado o processo. Caso seja necessário alterar o valor de tempo de coordenação (TD) nos relés, o agente seletividade envia mensagens M-6, com o valor do novo ajuste de curva de tempo (TD).

A seguir são apresentadas duas figuras adquiridas através do programa Java Sniffer, a saber: Figura 4.17 e Figura 4.18. Estas figuras permitem a análise da troca de mensagens, através de uma interface gráfica. O conteúdo da mensagem M-5, pode ser observado na Figura 4.17, a qual contém o novo valor da corrente de ajuste (I_{pk}). As letras do início do conteúdo da mensagem “Ipk” indicam ao agente seletividade, que o remetente da mensagem alterou sua corrente de ajuste; o número informado após “Ipk” informa na nova corrente de ajuste em amperes, no caso da Figura 4.17 é igual a 56,09.

A mensagem possui outras informações, além do conteúdo ou *content* (apresentado na Figura 4.17), como o protocolo de comunicação utilizado, nome do agente emissor, nome do agente destinatário, endereços numéricos dos agentes envolvidos e outras, em grande maioria com os dados da máquina que hospeda um ou múltiplos agentes.

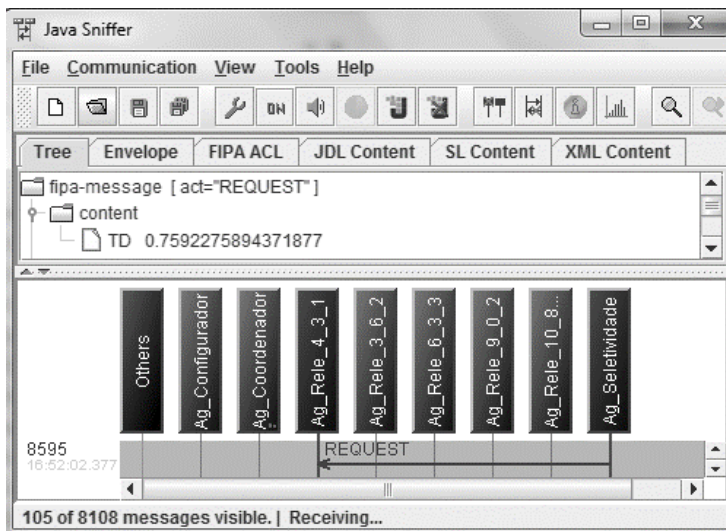
Figura 4.17 Mensagem M-5



Fonte: Próprio autor.

Os agentes relé que receberam mensagens do tipo M-6, não são necessariamente os que enviaram mensagens do tipo M-5. Apenas os agentes relé que necessitam alterar o parâmetro da curva de tempo, da proteção direcional de sobrecorrente, receberam a mensagem M-6. A Figura 4.18 ilustra a mensagem M-6, cujo conteúdo informa a um agente relé específico seu novo valor de curva de tempo (TD).

Figura 4.18 Mensagem M-6



Fonte: Próprio autor.

Resumindo, o fluxo de mensagens do tipo M-5 e M-6, segue a ordem descrita abaixo:

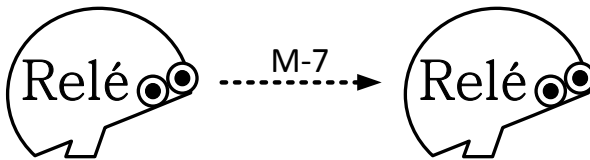
- I. Alteração do valor de I_{pk} em um ou múltiplos relés. Relés enviam mensagens M-5.
- II. Agente seletividade verifica coordenação, e também altera os ajustes da curva de tempo (TD), quando necessário.
- III. Caso seja necessário realizar um ou mais ajustes, o agente seletividade envia mensagens do tipo M-6 a todos os relés necessários.

O segundo tipo de comunicação da análise *off-line* está ilustrado na Figura 4.19. A mensagem M-7 pode ser enviada, unicamente, por relés conectados na mesma barra, realizando proteção de linhas em paralelo.

Para que a mesma seja enviada é necessário que sejam satisfeitas duas condições:

- O agente relé remetente da mensagem M-7, deveria estar polarizado diretamente, previamente a corrente tornar-se igual ou muito próxima de zero. Não seria interessante dobrar a corrente de ajuste de um relé, que apresenta fluxo reverso, pois a mesma seria dobrada e posteriormente reduzida ao valor mínimo, de corrente de ajuste, pelo próprio relé destinatário da mensagem M-7.
- O agente relé remetente da mensagem M-7, deve ter sua corrente igual a zero. Assim, caracterizando a descontinuidade da linha protegida, como ilustrado na Figura 4.9.

Figura 4.19 Comunicação, entre agentes relé



Fonte: Próprio autor.

4.2 NOMENCLATURA DAS ANÁLISES

O trabalho apresenta duas análises, a *on-line* e a *off-line*. Diferente das definições realizadas nos trabalhos antecessores (Maiola, 2014; Nascimento, 2014; Pinto, 2015).

Ao longo da subseção 4.1.2 é apresentado a análise *on-line*, a qual faz uso de uma estrutura organizacional hierárquica. Através da centralização de informações chave de eventos na microrrede, é localizado o elemento em falta e enviado comando de abertura dos respectivos disjuntores. Assim, a análise *on-line* realiza a proteção primária dos elementos da microrrede.

Na subseção 4.1.3 é descrita a análise *off-line*, a qual possui um agente central responsável pelo planejamento da coordenação. O agente de planejamento da seletividade das proteções de sobrecorrente direcional das linhas de distribuição da microrrede é responsável por manter as proteções temporizadas de linha coordenadas. A análise *off-line* possui

três características de maior autonomia aos relés: Primeiro, permitindo que os próprios relés operem seus disjuntores através das funções de proteções 87, 27I, 59I, 51V, 51G, 27T, 59T e 67, conforme habilitadas para o relé; Segunda, capacidade de alterar a corrente de ajuste da proteção 67; Terceira, habilidade de comunicação direta ao relé que realize proteção de elemento em paralelo, unicamente nos que possuem proteção 67. Assim, a análise *off-line* realiza a proteção de retaguarda local e remota da microrrede.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram descritas em detalhes as características da arquitetura do sistema multiagente proposto para realizar a proteção de microrredes. Além da arquitetura proposta, é detalhado o comportamento de cada agente, de forma individual e as interações via mensagens dos mesmos. É importante ressaltar que:

- A rápida detecção de falta é dependente da comunicação, fazendo uso da estrutura hierárquica de agentes para centralizar as informações de um evento e atuar em caso de falta;
- O sistema proporciona proteção de retaguarda para gerador síncrono e
- Proteção de retaguarda de linha, a qual necessita de comunicação unicamente para garantir a seletividade, minimizando assim, a dependência da comunicação no sistema de proteção.

5 SISTEMA TESTE, SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta o sistema teste na seção 5.1; seguido das etapas necessárias para a realização das simulações do SMA para a proteção de microrredes, na seção 5.2. Os resultados da simulação são apresentados na seção 5.3; seguidos das considerações finais do capítulo em 5.4.

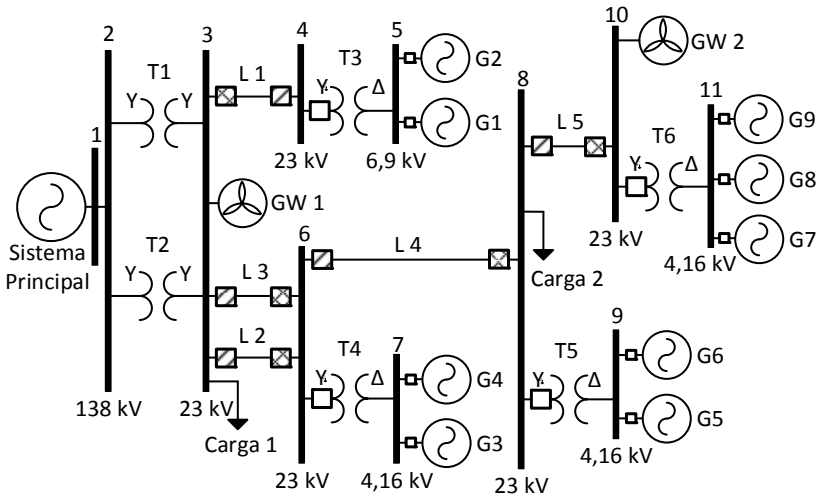
5.1 SISTEMA TESTE

O sistema teste utilizado neste trabalho foi baseado em um sistema real, da rede de distribuição da Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC). Este mesmo sistema teste foi utilizado nos trabalhos de (Maiola, 2014; Nascimento, 2014; Pinto, 2015). O sistema original não possui todas as características necessárias para caracterizá-lo como uma microrrede, necessitando ser adaptado, tanto de modo a representar uma microrrede como para possibilitar a proteção. As adaptações utilizadas foram um conjunto das propostas por (Nascimento, 2014) e (Pinto, 2015), conforme apresentadas a seguir:

- Elementos inseridos no sistema:
 - Dois geradores eólicos, idênticos.
 - Duas cargas, comum e prioritária.
 - Disjuntores.
- Alteração da configuração de todos os transformadores conectados à geração distribuída.

A microrrede utilizada neste trabalho utiliza as modelagens realizadas por (Nascimento, 2014) e (Pinto, 2015), com algumas alterações na geração eólica. O sistema teste está ilustrado na Figura 5.1 na topologia conectada, a topologia ilhada não contempla as barras um e dois. Como se pode observar na Figura 5.1 o sistema teste possui onze fontes de geração, duas cargas, seis transformadores, cinco linhas e onze barras. Nove dos geradores hidrelétricos são distribuídos em quatro grupos de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e duas fontes de geração eólica de imãs permanentes conectadas através de conversores *back-to-back*.

Figura 5.1 Micrrrede, sistema teste



- Disjuntor → Relé Direcional → Horário
- Disjuntor → Relé Direcional → Anti-horário
- Disjuntor

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 5.1 apresenta a potência nominal dos geradores, transformadores e cargas. Mais informações a respeito do caso teste podem ser encontradas em (Nascimento, 2014) e no ANEXO A, onde foram modelados os elementos e o sistema no *software* de simulação PSCAD/EMTDC.

Tabela 5.1 Dados do sistema teste

	Pot.Nom. [MVA]		Pot.Nom. [MVA]		Pot.Nom. [MVA]
G1	3,75	G8	1,20	T6	4,00
G2	3,75	G9	1,20	GW1	3,00
G3	1,66	T1	28,53	GW2	3,00
G4	1,66	T2	26,77	Carga 1	15,21
G5	1,66	T3	8,00		
G6	1,66	T4	3,35	Carga 2	5,26
G7	1,20	T5	3,35		

5.1.1 Nomenclatura dos relés

A programação dos agentes foi desenvolvida de forma genérica, de modo que os relés apresentam o mesmo código base, no qual são habilitadas as funções de proteção. Eles foram implementados dessa maneira para serem utilizados em outros sistemas, na continuidade deste trabalho. Sendo assim o único diferencial, no programa em JAVA é o nome identificador individual do agente e a maioria dos agentes relé necessita ler dados de configuração.

Foi necessário padronizar a nomenclatura dos relés, devido ao considerável número de agentes, facilitando a compreensão e o desenvolvimento das simulações; as quais foram elaboradas utilizando diferentes programas. Assim, foi estabelecido um padrão na nomenclatura, que leva em consideração o sistema físico da microrrede, ilustrado na Figura 5.1. Baseada na numeração das barras do sistema teste e nos números identificadores. Há três tipos de nomenclatura de agente relé, as quais dependem do elemento protegido, como apresentado a seguir:

- I. A nomenclatura de relés de linhas possui a estrutura “Ag_Rele_x_y_z”, onde x é o número da barra mais próxima a este relé, y é o número da barra do outro lado da linha, e z é o número identificador da linha;
- II. A nomenclatura de relés de transformadores segue a mesma lógica da regra anterior, porém neste caso, ao invés do número identificador de linha tem-se o número identificador do transformador;
- III. A nomenclatura de relés de geradores possui a estrutura “Ag_Rele_x_0_z”, onde x é o número da barra em que o gerador está conectado e z é o número identificador do gerador. O algarismo “0” indica que é agente relé de gerador.

5.2 ETAPAS PARA A SIMULAÇÃO

A simulação do sistema multiagente é realizada em cinco etapas, numeradas a seguir, em ordem temporal:

- I. PSCAD, simula faltas na microrrede, tema explorado na subseção 5.2.1.

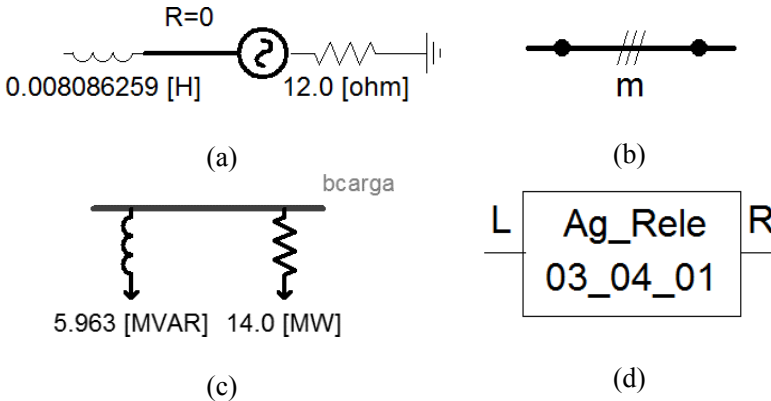
- II. A rotina intérprete, código implementado em Matlab para simplificar a saída de dados do PSCAD. Apresentado na subseção 5.2.2.
- III. Os arquivos de saída do PSCAD após a utilização do intérprete, com a adição dos arquivos necessários na análise *on-line* (5.2.3) e *off-line* (5.2.4), que totalizam em 46 arquivos adicionais aos desenvolvidos em JAVA.
- IV. Executar código em JAVA, com a arquitetura multiagente desenvolvida neste trabalho.
- V. Análise de resultados através de dois métodos descritos na subseção 5.2.5.

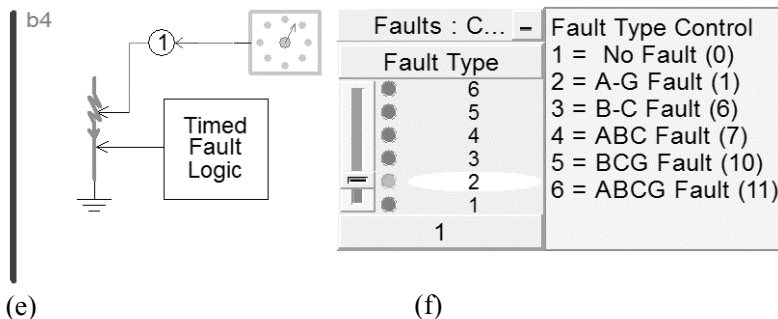
As primeiras três etapas listadas acima necessita ser realizada para a simulação de cada caso, acarretando, num tempo considerável na preparação dos arquivos, para então realizar a execução do SMA.

5.2.1 PSCAD

O *software* PSCAD (*Power System Computer Aided Design*) é uma interface gráfica, que busca facilitar a criação de arquivos de entrada do *software* EMTDC. O mesmo simula transitórios eletromagnéticos e está em evolução desde a década de 70, permitindo realizações das análises de contingência necessárias para o trabalho. O PSCAD suporta redes de corrente alternada, trifásicas ou não; geradores, motores, transformadores, linhas, fontes de energia renovável, conversores de potência e outros.

Figura 5.2 Exemplos de elementos do PSCAD





Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.2 ilustra alguns dos elementos utilizados, tanto para modelar o sistema teste, como para organizar a saída de dados do *software* PSCAD, a qual é fornecida caso o usuário queira realizar análises gráficas em outro programa. A Figura 5.2 (a) representa graficamente a geração hídrica, uma fonte ideal com a impedância da mesma posicionada a frente e com uma pequena resistência de aterramento. A Figura 5.2 (b) representa uma linha de transmissão/distribuição. Através das configurações internas o bloco linha pode representar diversas características. A Figura 5.2 (c) ilustra a carga não prioritária do sistema, composição de carga puramente resistiva e puramente indutiva, a barra de carga representada serve apenas para facilitar o posicionamento. A Figura 5.2 (d) apresenta sub-blocos do PSCAD, neles foram organizados os dados de saída para análise externa, o nome dos mesmos segue a subseção 5.1.1, assim facilitando a etapa apresentada na subseção 5.2.2. A Figura 5.2 (e) ilustra as barras do sistema, inseridas principalmente para facilitar a localização com o sistema teste. A Figura 5.2 (f) apresenta o bloco de configuração de curto-circuito. No bloco curto-circuito são definidos os tempos, de início e fim do curto-circuito, como também o tipo: monofásico, trifásico e bifásico com contato a terra ou não. No modelo da microrrede, esse e outros blocos foram utilizados.

Detalhes da modelagem do sistema teste no PSCAD são encontrados em (Nascimento, 2014). Para a realização do presente trabalho foram necessárias as seguintes alterações:

- Completa alteração dos sub-blocos dos agentes relé, Figura 5.2 (d). Foram removidas as proteções do PSCAD da versão anterior e organizada a saída de sinais para as proteções implementadas em JAVA na nova versão.
- O modelo de geração eólica implementado inicialmente no PSCAD exigia longos tempos de simulação para alcançar a

estabilidade, por este motivo a geração eólica foi substituída por fontes de corrente trifásicas. Através da comparação dos dados, esta alteração não acarretou em significativas alterações do seu comportamento.

- As alterações acima, exigiram outras alterações de menor relevância. Contudo os modelos dos elementos da microrrede foram mantidos.

5.2.2 Arquivos de saída, PSCAD

Com o sistema teste modelado através dos blocos do PSCAD os dados da simulação têm de ser passados para os agentes relés, para que os mesmos possam monitorar os sinais da microrrede e tomar decisões. O *software* PSCAD possui saída de dados para análise gráfica de sinais previamente configurados, essa saída é explorada. Assim sendo, a simulação do sistema em PSCAD não é alterada diretamente pelos agentes, as simulações ocorrem de maneira isolada, em tempos diferentes.

Figura 5.3 Arquivo de configurações

```

resultado.inf - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
PGB (1)      Output  Desc="Vc_i"  Group="Ag_Rele_03_04_01"
PGB (2)      Output  Desc="Vb_i"  Group="Ag_Rele_03_04_01"
PGB (3)      Output  Desc="Va_i"  Group="Ag_Rele_03_04_01"
PGB (4)      Output  Desc="In_i"  Group="Ag_Rele_03_04_01"
PGB (5)      Output  Desc="Ic_i"  Group="Ag_Rele_03_04_01"
PGB (6)      Output  Desc="Ib_i"  Group="Ag_Rele_03_04_01"
PGB (7)      Output  Desc="Ia_i"  Group="Ag_Rele_03_04_01"
PGB (8)      Output  Desc="Vc_i"  Group="Ag_Rele_04_03_01"
PGB (9)      Output  Desc="Vb_i"  Group="Ag_Rele_04_03_01"
PGB (10)     Output  Desc="Va_i"  Group="Ag_Rele_04_03_01"
PGB (11)     Output  Desc="In_i"  Group="Ag_Rele_04_03_01"
PGB (12)     Output  Desc="Ic_i"  Group="Ag_Rele_04_03_01"
PGB (13)     Output  Desc="Ib_i"  Group="Ag_Rele_04_03_01"
PGB (14)     Output  Desc="Ia_i"  Group="Ag_Rele_04_03_01"
PGB (15)     Output  Desc="Vc_i"  Group="Ag_Rele_04_05_06"
PGB (16)     Output  Desc="Vb_i"  Group="Ag_Rele_04_05_06"
PGB (17)     Output  Desc="Va_i"  Group="Ag_Rele_04_05_06"
PGB (18)     Output  Desc="In_i"  Group="Ag_Rele_04_05_06"
PGB (19)     Output  Desc="Ic_i"  Group="Ag_Rele_04_05_06"
PGB (20)     Output  Desc="Ib_i"  Group="Ag_Rele_04_05_06"
PGB (21)     Output  Desc="Ia_i"  Group="Ag_Rele_04_05_06"
Ln 31, Col 17

```

Fonte: Próprio autor.

Os arquivos de saída são de dois formatos, arquivo de configurações (.inf) e arquivo de saída (.out). O arquivo de configurações

(.inf) está ilustrado na Figura 5.3, mostra quatro colunas de um arquivo de 7: a primeira coluna é o número identificador da ordem em que os sinais são agrupados no arquivo de saída (.out); a segunda coluna indica o tipo de sinal do PSCAD (no caso todos os sinais são de saída “Output”); a terceira o rótulo do sinal definido pelo usuário; a quarta o nome do sub-bloco de origem do sinal (o nome do relé); as colunas restantes contém informações auxiliares para programas que gerem imagens a partir dos dados (não sendo relevantes para a aplicação atual). As colunas destacadas por retângulos tracejados na Figura 5.3 contém as informações necessárias para o programa intérprete. Os agentes relé dos geradores possuem dois nomes nos dados, pois são necessários os sinais de corrente em ambas as extremidades do gerador (por exemplo, na proteção diferencial).

Figura 5.4 Arquivo de saída

0.4520000000000000	0.40439418826052E-12	172.3048	172.3048
0.4530000000000000	0.39452895095338E-12	172.3048	172.3048
0.4540000000000000	0.39168177387080E-12	172.3048	172.3048
0.4550000000000000	0.39305709223164E-12	172.3048	172.3048
0.4560000000000000	0.39804503077541E-12	172.3046	172.3046
0.4570000000000000	0.40482349419872E-12	172.3045	172.3045
0.4580000000000000	0.40703880010560E-12	172.3050	172.3050
0.4590000000000000	0.41470787031013E-12	172.3046	172.3046
0.4600000000000000	0.42543671964096E-12	172.3048	172.3048
0.4610000000000000	0.43940145061792E-12	172.3048	172.3048
0.4620000000000000	0.44723220817653E-12	172.3048	172.3048
0.4630000000000000	0.44832867536526E-12	172.3047	172.3047
0.4640000000000000	0.44298309796831E-12	172.3052	172.3052
0.4650000000000000	0.43368302919515E-12	172.3045	172.3045
0.4660000000000000	0.41879168865337E-12	172.3048	172.3048
0.4670000000000000	0.40668184161632E-12	172.3044	172.3044
0.4680000000000000	0.39657345235341E-12	172.3046	172.3046
0.4690000000000000	0.38843700850789E-12	172.3045	172.3045
0.4700000000000000	0.38307332221162E-12	172.3045	172.3045
0.4710000000000000	0.38379395232244E-12	172.3044	172.3044
0.4720000000000000	0.39052869344917E-12	172.3044	172.3044

Fonte: Próprio autor.

Diferente do arquivo de configuração, os arquivos de saída são muitos, no sistema teste utilizado são vinte e dois arquivos, devido ao grande número de sinais de saída. Como são solicitados mais de 210 saís de saída e menos de 220, são necessários 22 arquivos de saída, pois cada arquivo comporta um máximo de 10 sinais exclusivos. Um dos arquivos de saída está ilustrado na Figura 5.4, o qual apresenta onze colunas. A coluna da extrema esquerda, destacada por um retângulo tracejado sempre

apresenta o tempo da simulação, assim cada arquivo de saída possui dez sinais exclusivos, totalizando onze colunas. Os sinais de saída são os valores eficazes do sinal (módulo) adicionado sinal para indicar o sentido da corrente, positivo para o sentido em que o relé está polarizado para atuar e negativo para o sentido reverso. O sinal foi acrescentado nos sub-blocos do PSCAD.

Para facilitar a leitura dos dados foi desenvolvido um programa intérprete, em Matlab. O intérprete utiliza unicamente o arquivo de configurações (.inf) e os arquivos de saída (.out) para gerar arquivos exclusivos para cada agente relé. É necessário unificar as informações dos agentes relé de geradores. Foi convencionado um arquivo de texto com o nome completo do agente relé, tendo os sinais também separados por colunas. A organização das colunas apresenta a seguinte ordem: Tempo de simulação, corrente na fase A (ampere), corrente na fase B (ampere), corrente na fase C (ampere), corrente no neutro (ampere), tensão na fase A (volts), tensão na fase B (volts), tensão na fase C (volts), corrente na fase A (ampere) no início do enrolamento do gerador, corrente na fase B (ampere) no início do enrolamento do gerador e corrente na fase C (ampere) no início do enrolamento do gerador. Caso o agente relé não possua um ou alguns dos sinais mencionados a coluna correspondente é preenchida com zeros.

Figura 5.5 Arquivos de entrada e saída do interprete



Fonte: Próprio autor.

Através da leitura dos arquivos da Figura 5.5 (a) (saída do PSCAD) o programa intérprete gera os arquivos na Figura 5.5 (b), os quais serão

lidos exclusivamente pelo seu devido agente relé. Assim, o sistema multiagente desenvolvido em JAVA pode facilmente realizar a leitura dos dados de simulação de forma prática, sem a preocupação de realizar a leitura em diferentes arquivos para um mesmo agente.

5.2.3 Arquivo de entrada, análise *on-line*

Além dos arquivos ilustrados na Figura 5.5 (b), a análise *on-line* requer outros arquivos, para os agentes coordenador e configurador. Os agentes coordenador e configurador necessitam de três arquivos extras, um com as conexões da microrrede, estados dos disjuntores e local dos geradores. Assim, os mesmos são capazes de utilizar seus sistemas especialistas.

Todos os arquivos extras da análise *on-line* são de texto (.txt).

5.2.4 Arquivo de entrada, análise *off-line*

De maneira semelhante à análise *on-line*, a análise *off-line* também necessita de arquivos extras de configuração, para os agentes relé de geradores, agente seletividade e agentes do tipo relé de linha. Os agentes relé de proteção de geradores necessitam de suas respectivas configurações, as quais não variam com o estado da microrrede, sendo unicamente dependentes do gerador. Por este motivo são necessários nove arquivos para a configuração dos agentes relé de proteção de geradores. O agente seletividade possui como entrada um planilha do *software* Excel (.xlsx), com seis páginas:

- Conexões do sistema.
- Configuração das proteções de linha na presença da concessionária.
- Configuração das proteções de linha com a microrrede desconectada da concessionária.
- Correntes de curto-circuito circuito em distintos pontos da microrrede, vistas em diferentes relés com a concessionária conectada.
- Correntes de curto-circuito circuito em distintos pontos da microrrede, vistas em diferentes relés sem a concessionária.
- Curva de atuação da proteção de sobrecorrente direcional temporizada.

Como a configuração da proteção das linhas da microrrede, necessita levar em conta o despacho do sistema, os arquivos individuais

dos agentes relé de proteção de linha e do agente seletividade, são obrigatoriamente gerados para cada despacho. Para evitar erros com a confusão de arquivos dos relés de linha, uma rotina em Matlab foi desenvolvida. Assim, é realizada a leitura do arquivo do agente seletividade, e gerado automaticamente os arquivos de texto (.txt) dos agentes relé de linha, dez arquivos.

5.2.5 Resultados

Existem dois tipos de saída na simulação da arquitetura multiagente, através do programa Java Sniffer e uma planilha de Excel. O programa Java Sniffer, é capaz de monitorar toda a troca de mensagens entre os agentes. Desta forma permite acompanhar o desempenho das estratégias de proteção da arquitetura multiagente desenvolvida. A planilha Excel é criada pelo agente coordenador, mas todos os agentes são capazes de escrever nela ao final da simulação. Assim, os agentes relés descrevem o que ocorreu ao longo da simulação, mensagem ao coordenador, proteção primária, proteção de retaguarda e os tempos da abertura dos disjuntores.

Através das duas saídas apresentadas é possível avaliar a troca de mensagens entre os agentes e o desempenho da proteção, primária e de retaguarda.

5.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados de simulação são apresentados nesta seção. O intuito é de avaliar a arquitetura multiagente proposta através de casos exemplos, e o comportamento do SMA.

Para melhor explicar os dados de saída do SMA, a ordem na qual os dados são expressos nas tabelas de resultados, análise *on-line*, é organizada através da maior para a menor corrente informada ao coordenador. A maior corrente informada provavelmente está próxima a um possível evento de falta, semelhante a abordagem do sistema especialista descrito no APÊNDICE A. São apresentadas ao agente coordenador as informações que ele utiliza, para identificar a presença de falta e sua devida localização. Os agentes dos geradores são apresentados em uma coluna separada, devido a diferença de base de tensão.

Na tabela das operações do SMA, análise *off-line*, são apresentados unicamente os agentes relé que eventualmente operaram o seu respectivo disjuntor. Os resultados são ordenados de modo crescente, de acordo com o tempo de atuação da proteção de retaguarda.

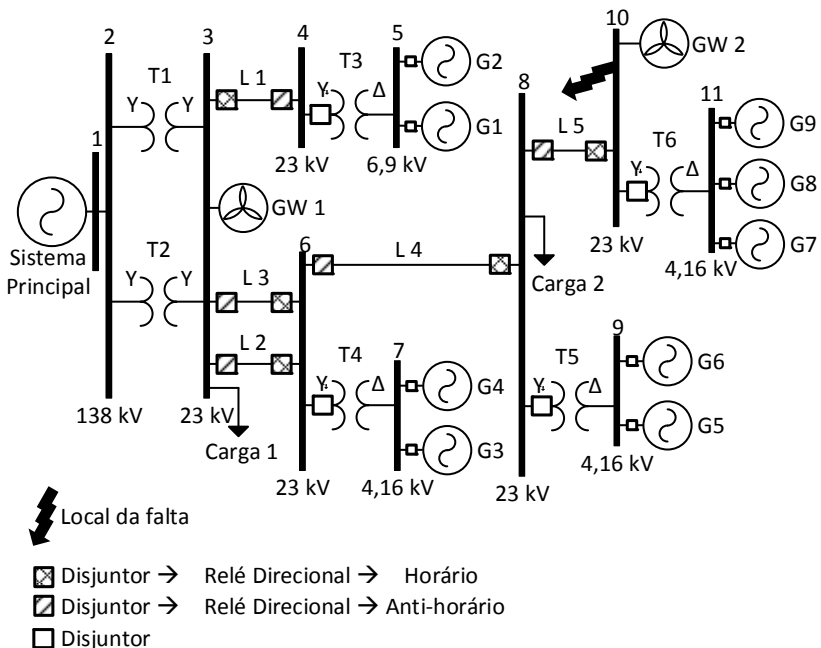
5.3.1 Falha na barra 10

Foi simulada uma falha monofásica a terra na barra 10 do sistema teste, com $0,05 \Omega$ de resistência de aterramento. Esta falha foi simulada na microrrede no modo de operação conectada à concessionária e ilhada, como ilustrado na Figura 5.6 e Figura 5.9, respectivamente. Esta simulação tem como finalidade mostrar a capacidade do SMA em localizar e isolar a falha, como também apresentar a coordenação, seletividade e rapidez das proteções de retaguarda.

5.3.1.1 Microrrede conectada à concessionária

Como apresentado na Figura 5.6 é simulada uma falha monofásica na barra 10, na topologia conectada à rede principal.

Figura 5.6 Falha na barra 10, microrrede conectada a concessionária



Fonte: Próprio autor.

No capítulo 4 é descrito em detalhes o SMA proposto para realizar a proteção de microrredes, possui duas distintas análises de proteção. Ao longo desta seção de resultados é importante recordar qual das análises está sendo tratada, comumente iniciando pela análise *on-line* e

posteriormente a *off-line*. Devido a importância de conhecer a análise de que está sendo abordada todas as tabelas de resultado possuem em seu título a análise que gerou seus dados.

A Tabela 5.2 apresenta a saída do SMA para a análise *on-line*, com as seguintes informações:

- Agente = Agente relé, com a exceção dos relés de gerador. São apresentados unicamente os números identificadores individuais dos relés, devido às restrições de tamanho da tabela e para reduzir sua poluição visual.
- $I_{\max} [A]$ = Corrente informada ao agente coordenador, em amperes. Com ela e informações topológicas da microrrede o agente coordenador é capaz de localizar a falta.
- Função atuante = Função de proteção que atuou o disjuntor.
- Tempo [s] = Tempo de atuação da proteção após a falta, em segundos.
- Gerador = Agentes exclusivamente de geradores. Foram separados para facilitar a compreensão pois possuem bases de tensão diferentes.

Observando a Tabela 5.2 verifica-se que todos os agentes relé enviam mensagem ao agente coordenador informando a corrente máxima observada, após a elevação abrupta na corrente. Todas estas mensagens entram na janela do coordenador e são utilizadas no SE para caracterizar e localizar a falta. O SMA foi capaz de localizar a falta na barra 10, operando o disjuntor em 70 ms, Tabela 5.2. A corrente informada nos extremos da linha 5, permite que o SE do coordenador não classifique falta na linha 5, mesmo que os relés nas extremidades da linha tenham apresentado as maiores correntes. Isto é devido à grande semelhança das correntes informadas (no caso iguais) pelos agentes relés da linha 5. Quando o estado é testado para falta de barra o SE encontra os erros nas somas das correntes: na barra 8 igual a 69,792 [A], conforme a equação (5.1), e para a barra 10 igual a 454,969 [A], conforme a equação (5.2). Através destas informações o SE do coordenador localiza a falta na barra 10, pois apresenta o maior erro em módulo, superior a 10% do erro esperado do TC.

$$\left| I_{\max_{6_8_4}} + I_{\max_{8_9_8}} - I_{\max_{8_{10}_5}} \right| = 69,792 [A] \quad (5.1)$$

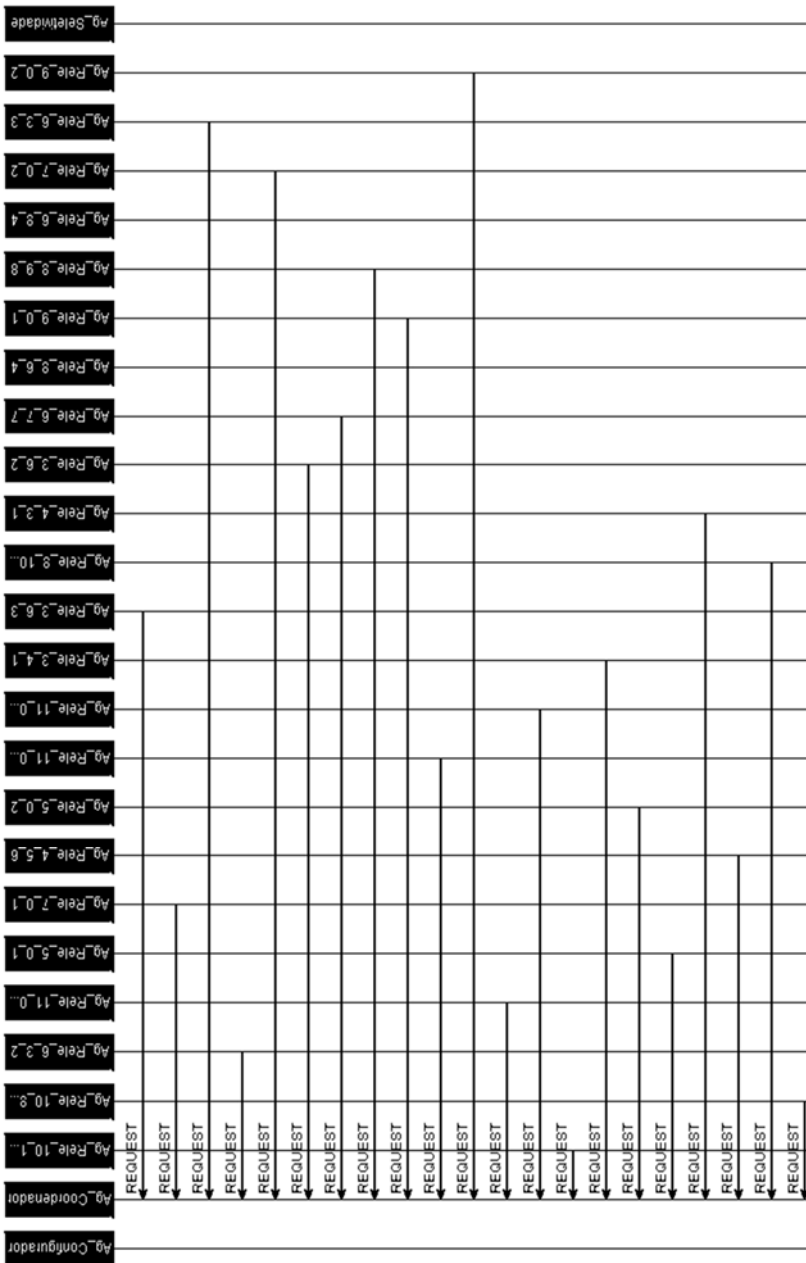
$$\left| I_{\max_{10_{11}_9}} - I_{\max_{10_{8}_5}} \right| = 454,969 [A] \quad (5.2)$$

Tabela 5.2 SMA análise *on-line*, falta na barra 10, microrrede conectada

Agente	I max [A]	Função atuante	Tempo [s]	Gerador	I max [A]
10_8_5	1445,231	50	0,07	9_0_1	785,32
8_10_5	1445,231			9_0_2	785,32
6_8_4	1088,242			11_0_1	774,957
8_6_4	1088,242			11_0_2	774,957
10_11_9	990,262	50	0,07	11_0_3	774,957
8_9_8	426,781			7_0_1	602,75
3_6_2	424,894			7_0_2	602,75
3_6_3	424,894			5_0_1	431,03
6_3_2	424,894			5_0_2	431,03
6_3_3	424,894				
6_7_7	276,126				
3_4_1	263,592				
4_3_1	263,592				
4_5_6	263,592				

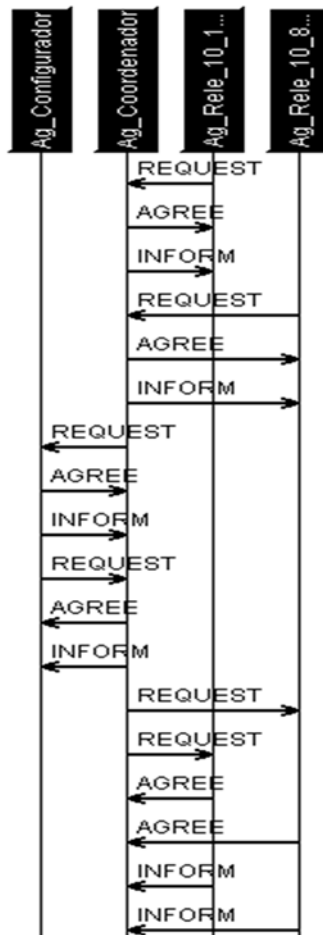
A Figura 5.7 apresenta a comunicação simplificada, dos agentes relé com o agente coordenador, no evento da falta simulada na barra 10. Através de filtros de mensagens do programa Java Sniffer, as mensagens do tipo *agree* e *inform* foram removidas para possibilitar a apresentação de todas as demais mensagens. Esta simplificação foi possível pois todos os *requests* foram aceitos e compreendidos pelo coordenador. Após a troca de mensagens da Figura 5.7 o agente coordenador envia o local da falta para o configurador.

Figura 5.7 Comunicação ao agente coordenador, falta na barra 10



A Figura 5.8 apresenta toda a comunicação, sem filtros, dos agentes coordenador, configurador, relé 10_11_9 e relé 10_8_5. Os próximos casos de simulação não apresentarão todos os agentes relé que enviarem mensagem para o coordenador, mas unicamente os que chegarão a receber o comando de abertura de seu respectivo disjuntor. Sempre que a informação de algum agente relé não possa ser utilizada no SE do coordenador, devido a ser recebida fora do tempo da janela do coordenador, será explicitada no texto. A presença de algum valor na coluna $I_{max} [A]$ indica que o agente relé enviou mensagem para o coordenador.

Figura 5.8 Comunicação entre agentes, falta na barra 10



A Tabela 5.3 apresenta os tempos de atuação das proteções de retaguarda, análise *off-line*. Na simulação do PSCAD não foi realizada a abertura do disjuntor do relé 8_10_5, permitindo apresentar a proteção temporizada de retaguarda remota. Na primeira linha da Tabela 5.3 é encontrado o tempo de operação da proteção de sobrecorrente direcional de linha do relé 8_10_5, atuando de forma desejada. Este tempo é calculado considerando-se a corrente de falta e os ajustes dos relés, conforme o fluxograma da Figura 4.7. Como as proteções de retaguarda de linha são direcionais o relé 6_8_4 é responsável pela retaguarda remota (ver Tabela 5.3) apresenta sua operação coordenada. Também há atuação das proteção de retaguarda de sobrecorrente com restrição de tensão dos geradores da barra 11 e barra 9, necessárias para isolar a falta no caso de falha da análise *on-line*.

Importante ressaltar que o relé 6_8_4 não poderia operar antes de transcorridos 0,3 s da atuação do relé 8_10_5, tempo de coordenação escolhido entre relés digitais. As características de tempo de coordenação foram abordadas na subseção 3.3.2.

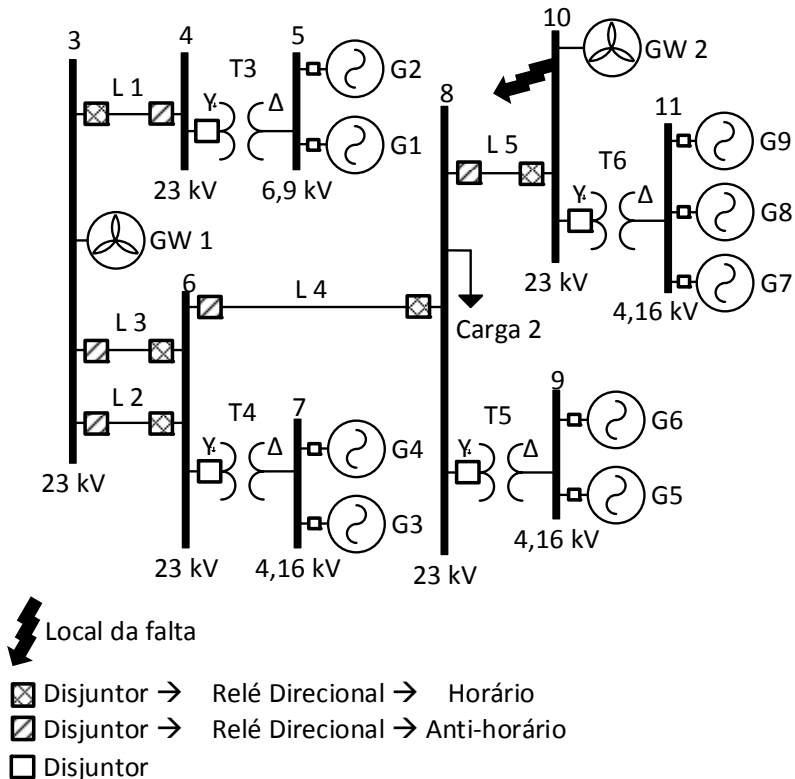
Tabela 5.3 SMA análise *off-line*, falta na barra 10, microrrede conectada

Agente	Função atuante	Tempo [s]
8_10_5	67	0,394
11_0_1	51V	0,752
11_0_2	51V	0,752
11_0_3	51V	0,752
6_8_4	67	1,231
9_0_1	51V	1,437
9_0_2	51V	1,437

5.3.1.2 Microrrede ilhada

A mesma falta (Figura 5.9) monofásica na barra 10 é simulada na topologia ilhada.

Figura 5.9 Falta na barra 10, microrrede ilhada



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado na Tabela 5.4, o SMA localizar a falta na barra 10, enviando comando de abertura aos disjuntores dos relés 10_8_5 e 10_11_9 em 71 ms. A corrente informada nos extremos da linha 5, permite que o SE do coordenador não classifique falta na linha 5, mesmo que os relés da mesma tenham apresentado as maiores correntes. Isto é devido à grande semelhança das correntes informadas (no caso iguais) pelos agentes relés da linha 5. Quando o estado é testado para falta de barra o SE encontra os erros nas somas das correntes: na barra 8 igual a 39,73 [A], conforme a equação (5.3), e para a barra 10 igual a 224,458 [A], conforme a equação (5.4). Através destas informações o SE do coordenador localiza a falta na barra 10, pois apresenta o maior erro em módulo.

$$\left| I_{\max_6_8_4} + I_{\max_8_9_8} - I_{\max_8_10_5} \right| = 39,73 \text{ [A]} \quad (5.3)$$

$$\left| I_{\max_10_11_9} - I_{\max_10_8_5} \right| = 224,458 \text{ [A]} \quad (5.4)$$

O fluxo de mensagens entre os agentes envolvidos na proteção da análise *on-line* estão ilustrados na Figura 5.7 e Figura 5.8, contudo apresentando informações referentes ao estado de falta na barra 10 no modo de operação ilhada. As informações contidas nas mensagens são encontradas na coluna I max [A] da Tabela 5.4.

Tabela 5.4 SMA análise *on-line*, falta na barra 10, microrrede ilhada

Agente	I max [A]	Função atuante	Tempo [s]	Gerador	I max [A]
10_8_5	1075,956	50	0,071	9_0_1	728,028
8_10_5	1075,956			9_0_2	728,028
10_11_9	851,498	50	0,071	11_0_1	657,779
6_8_4	703,417			11_0_2	657,779
8_6_4	703,417			11_0_3	657,779
3_4_1	414,998			7_0_1	601,198
4_3_1	414,998			7_0_2	601,198
4_5_6	414,998			5_0_1	597,021
8_9_8	412,269			5_0_2	597,021
6_7_7	300,697				
3_6_2	213,019				
3_6_3	213,019				
6_3_2	213,019				
6_3_3	213,019				

A Tabela 5.5 apresenta os tempos de atuação das proteções de retaguarda. Na simulação do PSCAD não foi realizada a abertura do disjuntor do relé 8_10_5, simulando uma falha neste disjuntor e assim permitindo apresentar o comportamento da proteção temporizada de retaguarda remota. Na primeira linha da Tabela 5.5 é encontrado o tempo de operação da proteção de sobrecorrente direcional de linha do relé 8_10_5, atuando de forma desejada. Como as proteções de retaguarda de linha são direcionais o relé 6_8_4 é responsável pela retaguarda

remota. A Tabela 5.5 apresenta sua operação coordenada e também a atuação da proteção de retaguarda de sobrecorrente com restrição de tensão dos geradores da barra 11 e barra 9, necessária para isolar a falta no caso de falha da análise *on-line*.

Tabela 5.5 SMA análise *off-line*, falta na barra 10, microrrede ilhada

Agente	Função atuante	Tempo [s]
8_10_5	67	0,349
11_0_1	51V	0,426
11_0_2	51V	0,426
11_0_3	51V	0,426
9_0_1	51V	0,828
9_0_2	51V	0,828
6_8_4	67	0,942

5.3.2 Falta na linha 4, a 15% de distância da barra 6

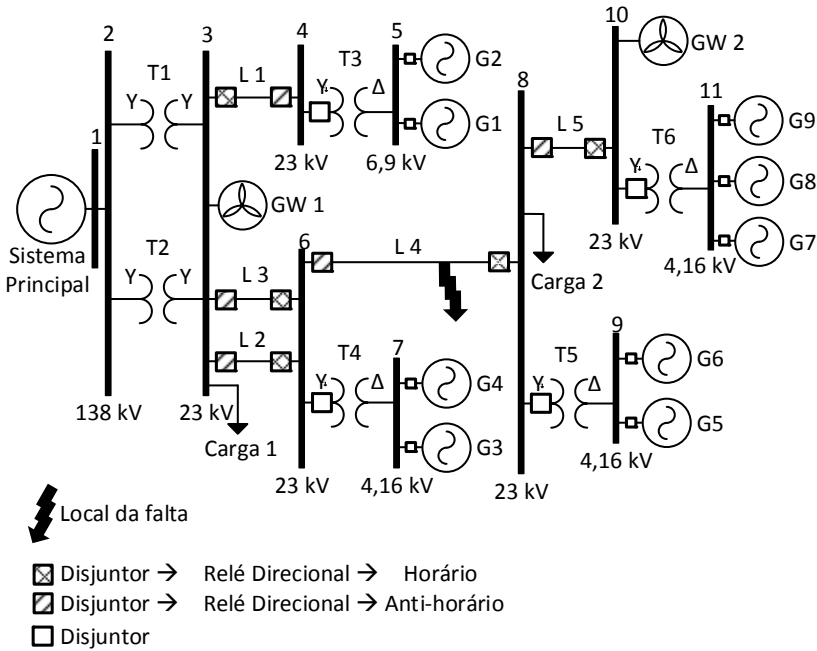
Foi simulada uma falta monofásica a terra na linha 4 a 15% de distância da barra 6 do sistema teste, com $0,05 \Omega$ de resistência de aterramento. Esta falta foi simulada na microrrede no modo de operação conectada à concessionária e ilhada, como ilustrado na Figura 5.10 e Figura 5.12, respectivamente.

5.3.2.1 Microrrede conectada à concessionária

Como apresentado na Figura 5.10 é simulada uma falta monofásica na linha 4 a 15% da barra 6, na topologia conectada à concessionária de energia.

Como se pode observar na Tabela 5.6 o SMA foi capaz de localizar a falta na linha 4, operando o disjuntor em 68 ms. Os agentes relé dos extremos da linha 4 informam as maiores correntes ao coordenador, conforme esperado. Devido à considerável discrepância das correntes informadas nos extremos da linha 4, o SE do coordenador localiza a falta na linha 4. Quando a falta é isolada, os demais relés temporizados que haviam sido sensibilizados param de contar tempo e não atuam.

Figura 5.10 Falta na linha 4, microrrede conectada a concessionária



Fonte: Próprio autor.

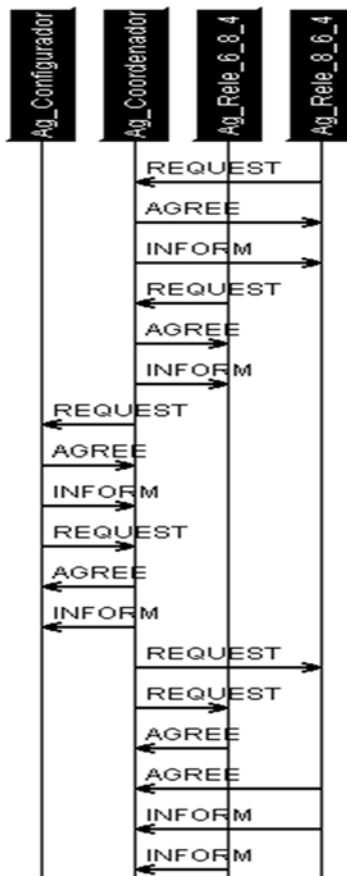
Tabela 5.6 SMA análise *on-line*, falta na linha 4, microrrede conectada

Agente	I max [A]	Função atuante	Tempo [s]	Gerador	I max [A]
6_8_4	2189,168	50	0,068	7_0_1	1016,29
8_6_4	966,681	50	0,068	7_0_2	1016,29
6_7_7	892,67			9_0_1	876,417
3_6_2	724,947			9_0_2	876,417
3_6_3	724,947			5_0_1	520,936
6_3_2	724,947			5_0_2	520,936
6_3_3	724,947			11_0_1	499,729
8_9_8	574,062			11_0_2	499,729
10_8_5	394,977			11_0_3	499,729
8_10_5	394,977				
10_11_9	382,811				

3_4_1	307,668					
4_3_1	307,668					
4_5_6	307,668					

A Figura 5.11 apresenta toda a comunicação, sem filtros, dos agentes coordenador, configurador, relé 6_8_4 e relé 8_6_4. Assim que o SE do coordenador localiza a falta, o mesmo envia uma mensagem para o agente configurador que responde com os disjuntores a serem abertos. O agente coordenador com a lista de disjuntores a serem abertos, envia mensagens com o comando de abertura dos disjuntores para os respectivos agentes relé responsáveis, a saber: relé 6_8_4 e relé 8_6_4.

Figura 5.11 Comunicação entre agentes, falha na linha 4



A Tabela 5.7 apresenta os tempos de atuação das proteções de retaguarda. Na simulação do PSCAD não foi realizada a abertura do disjuntor do relé 8_6_4. Assim permitindo apresentar a proteção temporizada de retaguarda remota. Nas primeiras duas linhas da Tabela 5.7 as proteções de linha operam seus respectivos disjuntores, isolando a falta de modo desejado. O tempo de atuação do relé de retaguarda de linha, relé 10_8_5, está coordenado. Como a falta foi isolada entre 6_8_4 e 10_8_5 os geradores conectados neste intervalo devem abrir, como é o caso dos geradores síncronos da barra 9.

Tabela 5.7 SMA análise *off-line*, falta na linha 4, microrrede conectada

Agente	Função atuante	Tempo [s]
8_6_4	67	0,192
6_8_4	67	0,329
10_8_5	67	0,691
9_0_1	51V	0,821
9_0_2	51V	0,821

5.3.2.2 Microrrede ilhada

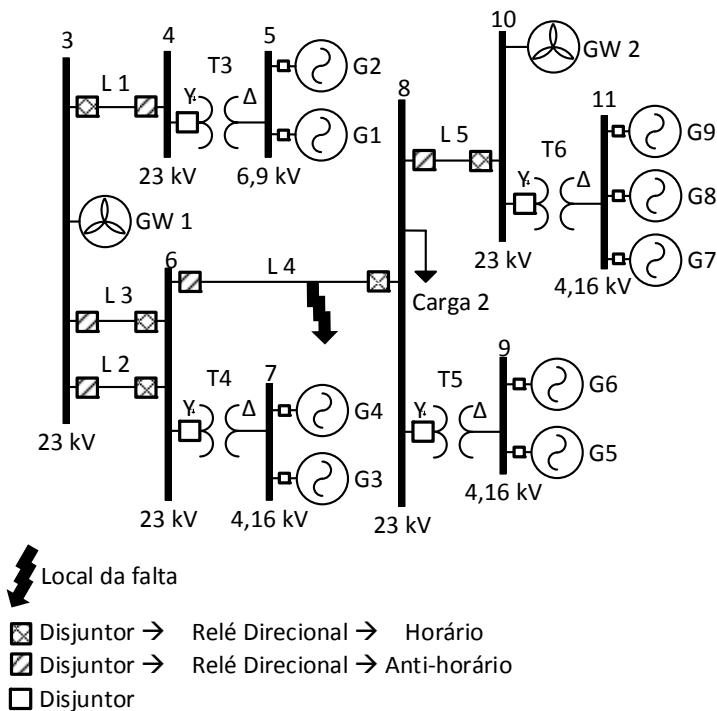
Como apresentado na Figura 5.12, é simulada uma falta monofásica na linha 4 a 15% da barra 6, na topologia ilhada.

Tabela 5.8 SMA análise *on-line*, falta na linha 4, microrrede ilhada

Agente	I max [A]	Função atuante	Tempo [s]	Gerador	I max [A]
6_8_4	1281,951	50	0,072	7_0_1	935,332
8_6_4	872,751	50	0,072	7_0_2	935,332
6_7_7	771,378			9_0_1	802,389
3_4_1	581,163			9_0_2	802,389
4_3_1	581,163			5_0_1	761,123
4_5_6	581,163			5_0_2	761,123
8_9_8	515,697			11_0_1	442,475
10_11_9	363,063			11_0_2	442,475

10_8_5	362,634				11_0_3	442,475
8_10_5	362,634					
3_6_2	294,636					
3_6_3	294,636					
6_3_2	294,636					
6_3_3	294,636					

Figura 5.12 Falta na linha 4, microrrede ilhada



Fonte: Próprio autor.

Como se pode observar na Tabela 5.8 o SMA foi capaz de localizar a falta na linha 4, operando o disjuntor em 72 ms. Os agentes relé dos extremos da linha 4 informam as maiores correntes ao coordenador, conforme esperado. Devido à considerável discrepância das correntes informadas nos extremos da linha 4, o SE do coordenador localiza a falta na linha 4.

O fluxo de mensagens entre os agentes envolvidos na proteção da análise *on-line* repete o ilustrado na Figura 5.11, contudo apresentando informações referentes ao estado de falta na linha 4 a 15% da barra 6 no modo de operação ilhada. As informações contidas nas mensagens são encontradas na coluna I max [A] da Tabela 5.8.

A Tabela 5.9 apresenta os tempos de atuação das proteções de retaguarda. No PSCAD não foi realizada a abertura do disjuntor do relé 8_6_4, simulando falha da proteção primária, permitindo descrever o comportamento da proteção temporizada de retaguarda remota. Nas primeiras duas linhas da Tabela 5.9 as proteções de linha operam seus respectivos disjuntores, isolando a falta de modo desejado. O tempo de atuação do relé de retaguarda de linha, relé 10_8_5, está coordenado. Como a falta foi isolada entre 6_8_4 e 10_8_5 os geradores conectados neste intervalo devem abrir, como é o caso dos geradores síncronos da barra 9.

Tabela 5.9 SMA análise *off-line*, falta na linha 4, microrrede ilhada

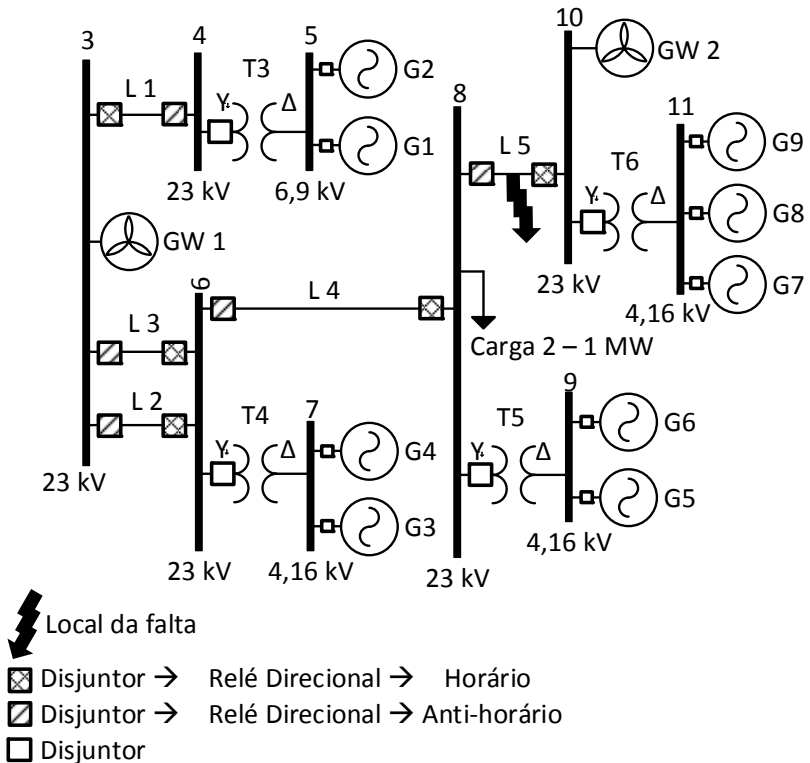
Agente	Função atuante	Tempo [s]
6_8_4	67	0,31
8_6_4	67	0,331
10_8_5	67	0,641
9_0_1	51V	0,673
9_0_2	51V	0,673

5.3.3 Importância do agente seletividade

Como mencionado ao decorrer desta dissertação o foco se situa no agente seletividade, o coração da análise *off-line*. Esta subseção apresenta um exemplo do importante papel do agente planejamento das proteções de sobrecorrente direcional de linha.

A Figura 5.13 ilustra a simulação da redução da carga 2 em 1 MW. Após a alteração da carga com a microrrede no modo de operação ilhado, foi simulada uma falta na linha 5 a 15% da barra 8.

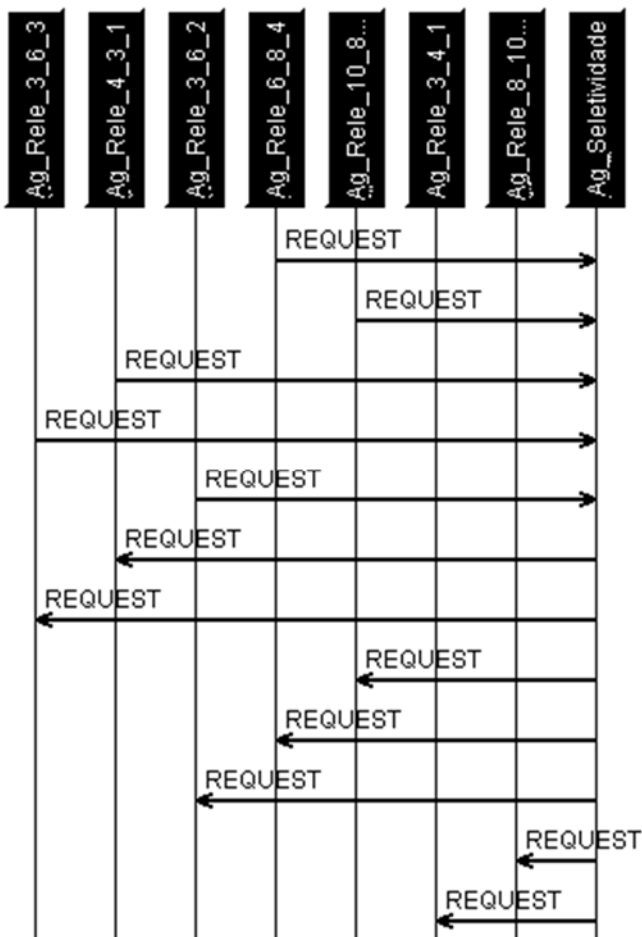
Figura 5.13 Alteração de carga, microrrede ilhada



Fonte: Próprio autor

5.3.3.1 Presença do agente seletividade (*off-line*)

Com a alteração na carga alguns dos agentes relé de linha de distribuição alteraram sua corrente de ajuste e informaram ao agente seletividade, conforme ilustrado na Figura 5.14. O agente seletividade necessitou realizar sete alterações nas curvas de tempo dos relés de proteção de linha para manter a coordenação. Os agentes que tiveram sua curva de tempo alterada foram: 8_10_5, 3_4_1, 10_8_5, 6_8_4, 3_6_2, 3_6_3 e 4_3_1. A comunicação realizada pela análise *off-line* esta apresentada na Figura 5.14.

Figura 5.14 Comunicação análise *off-line*

A Tabela 5.10 apresenta os tempos de atuação do SMA da análise *off-line* para uma falta na linha 5. Os relés nos extremos da linha sob falta, linha 5, são os primeiros a operarem seus respectivos disjuntores, conforme desejado. No entanto é simulada falha na abertura do disjuntor do relé 8_10_5, visando verificar a proteção de retaguarda de linha. Na Tabela 5.10 é possível notar que a proteção de retaguarda remota de linha, relé 6_8_4, operou seu devido disjuntor.

Tabela 5.10 SMA análise *off-line*, falta na linha 5, microrrede ilhada

Agente	Função atuante	Tempo [s]
8_10_5	67	0,171
10_8_5	67	0,320
6_8_4	67	0,591
9_0_1	51V	1,757
9_0_2	51V	1,757

Como esperado, quando todos os agentes operam de maneira prevista o SMA é capaz de realizar a proteção da microrrede com coordenação.

5.3.3.2 Sem o agente seletividade (*off-line*)

Considera-se que com a alteração na carga alguns dos agentes relé de linha de distribuição alteraram sua corrente de ajuste e falham em informar ao agente seletividade. Nesta subseção é considerado a possível falha de comunicação dos agentes relé de linha ao agente seletividade como outras falhas que eliminariam a capacidade de agente de planejamento da análise *off-line* de funcionar corretamente.

A Tabela 5.11 apresenta os tempos de operação da função de sobrecorrente temporizada direcional das linhas. Na simulação foi considerada correta abertura dos disjuntores dos agentes relé 8_10_5 e 10_8_5. Como observado na Tabela 5.11 ocorreu operação indevida do relé 6_8_4. A proteção primaria do relé 8_10_5 operou corretamente e enviou comando de abertura ao disjuntor em 171 ms após a falta, entretanto entre enviar o comando de abertura ao disjuntor e extinguir a corrente de curto-circuito não é instantânea, como apresentado na subseção 3.3.2.1. Como a proteção do relé 6_8_4 operou sem respeitar o mínimo tempo de coordenação estabelecido em 300 ms, a proteção acabou por operar de forma indevida.

Tabela 5.11 SMA análise *off-line*, falta na linha 5, microrrede ilhada

Agente	Função atuante	Tempo [s]
8_10_5	67	0,171
10_8_5	67	0,242
6_8_4	67	0,366

Na ocorrência de alterações no despacho (alterações na carga, conexões e desconexões) a análise *off-line* necessita do agente seletividade de modo a manter a coordenação das proteções de retaguarda de linha.

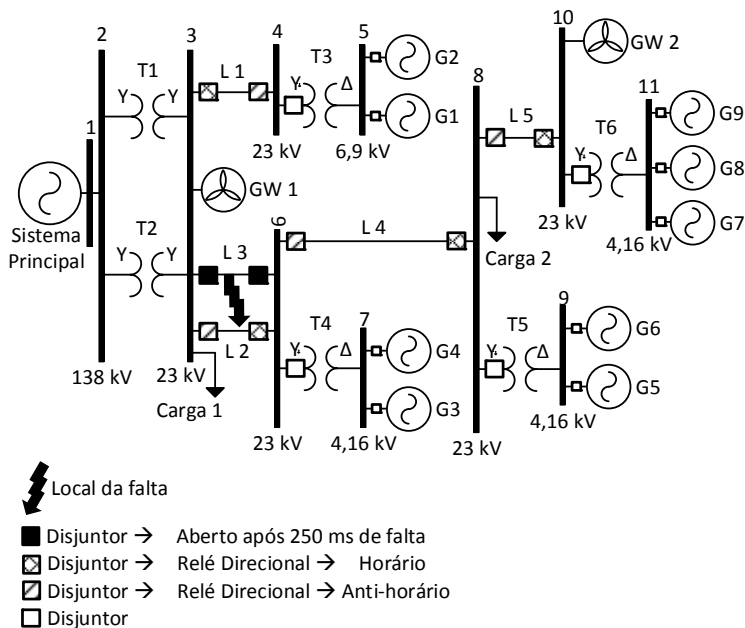
5.3.4 Falta nas linhas em paralelo

Foi simulada uma falta monofásica a terra na linha 3 do sistema teste, com $0,05 \Omega$ de resistência de aterramento.

Nesta simulação os disjuntores primários de proteção da linha em falta foram abertos no PSCAD após 250 ms de falta. Dessa maneira busca-se apresentar a comunicação entre agentes relé e agente seletividade, mas especialmente a comunicação entre os relés de linhas em paralelo.

5.3.4.1 Microrrede conectada à concessionária

Figura 5.15 Falta na linha 3, microrrede conectada a concessionária



Fonte: Próprio autor.

Como apresentado na Figura 5.15 é simulada uma falta monofásica na linha 3 a 85% da barra 3, na topologia conectada à rede principal. A legenda da Figura 5.15 apresenta o símbolo de local da falta junto com o símbolo que representa os disjuntores que foram abertos no PSCAD. Desta forma a falta foi isolada do restante da microrrede apropriadamente.

Como se pode observar na Tabela 5.12 o SMA foi capaz de localizar a falta na linha 3, operando os disjuntores em 68 ms. Os agentes relé dos extremos da linha 3 informam as maiores correntes ao coordenador, conforme esperado. Devido à considerável discrepância das correntes informadas nos extremos da linha 3, o SE do coordenador identifica que esta linha está em falta.

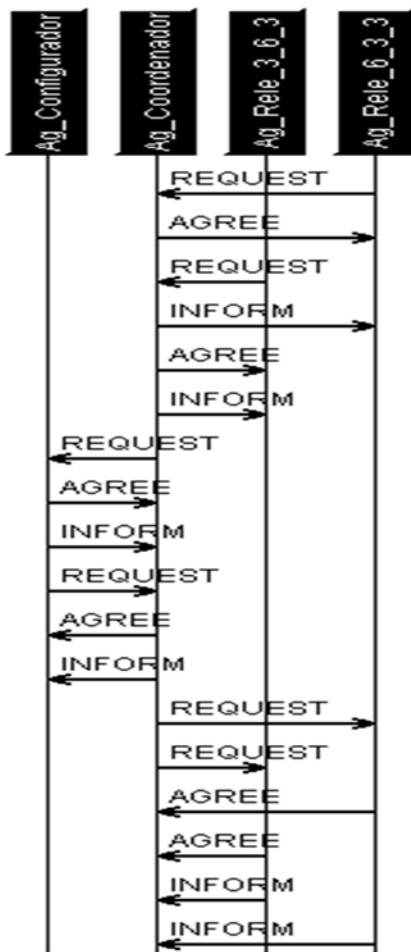
Tabela 5.12 SMA análise *on-line*, falta na linha 3, microrrede conectada

Agente	I max [A]	Função atuante	Tempo [s]	Gerador	I max [A]
6_3_3	1542,666	50	0,068	7_0_1	677,051
3_6_3	821,257	50	0,068	7_0_2	677,051
6_7_7	585,812			9_0_1	579,215
8_9_8	338,114			9_0_2	579,215
3_4_1	284,475			5_0_1	478,518
4_3_1	284,475			5_0_2	478,518
4_5_6	284,475			11_0_1	353,561
10_8_5	265,873			11_0_2	353,561
8_10_5	265,873			11_0_3	353,561
10_11_9	244,222				
3_6_2	130,902				
6_3_2	130,902				
6_8_4	74,854				
8_6_4	74,854				

Mesmo o sistema tendo sido capaz de operar o disjuntor em apenas 68 ms o tempo até a abertura do disjuntor simulado no PSCAD foi escolhido igual a 250 ms. Kindermann (2012a) estabelece como tempo de coordenação mínimo entre relés digitais o intervalo igual a 250 ms, por este motivo este tempo foi escolhido, buscando verificar que não houve operação indevida da proteções de retaguarda.

A Figura 5.16 apresenta toda a comunicação, sem filtros dos agentes coordenador, configurador, relé 3_6_3 e relé 6_3_3.

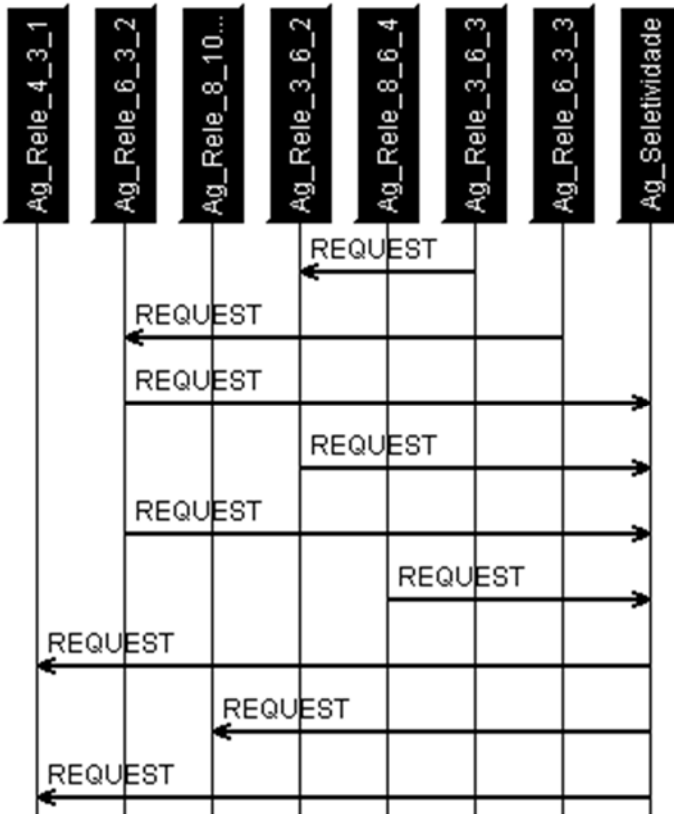
Figura 5.16 Comunicação entre agentes, falha na linha 3



A Tabela 5.13 apresenta o tempo de atuação da proteção de retaguarda. Como na simulação do PSCAD foi realizada a abertura dos disjuntores, dos extremos da linha 3, após 250 ms do início da falta, como apresentado na Figura 5.15. Apenas uma proteção de retaguarda local atuou, conforme apresentado na primeira e única linha da Tabela 5.13.

Tabela 5.13 SMA análise *off-line*, falta na linha 3, microrrede conectada

Agente	Função atuante	Tempo [s]
6_3_3	51	0,019

Figura 5.17 Comunicação, análise *off-line*

A Figura 5.17 apresenta a comunicação dos agentes relé ao agente seletividade e dos agentes relé com linhas em paralelo aos mesmos. Foram utilizados filtros para as mensagens do tipo *inform* e *agree*, assim permitindo apresentar todas as demais mensagens em uma mesma imagem. No evento da abertura dos disjuntores durante a simulação de falta no PSCAD a corrente que circula nos relés 6_3_3 e 3_6_3 vai a zero

em todas as fases e assim que estes relés notam a corrente em zero enviam mensagem para seus respectivos relés em paralelo. Assim, os relés em paralelo que permanecem em operação terão sua corrente de ajuste dobrada evitando que os mesmos atuem por sobrecorrente para um estado de operação normal.

Como apresentado Figura 5.17 os relés 6_3_3 e 3_6_3 enviam mensagem para 6_3_2 e 3_6_2 respectivamente para que dobrem suas respectivas correntes de ajustes. Todo o agente relé que altera sua corrente de ajuste informa a alteração para o agente seletividade, como apresentado os agentes 6_3_2, 3_6_2 e 8_6_4. O agente 6_3_2 dobrou sua corrente, e informou ao agente seletividade, mas como o dobro era um aumento demasiadamente elevado o relé o reduziu posteriormente, novamente enviando mensagem para o agente seletividade.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo apresentou o sistema teste da microrrede, etapas que precisam ser seguidas nas realizações das simulações do SMA e diversos casos. O sistema teste é baseado numa parte do sistema de distribuição das Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), tendo sido utilizado em trabalhos anteriores (Maiola, 2014; Nascimento, 2014; Pinto, 2015). São especificadas brevemente algumas características dos componentes da microrrede, permitindo familiaridade com o sistema teste modelado e simulado. Subsequentemente, as etapas de simulação de faltas seguidas da execução do SMA são apresentadas. A simulação realizada em PSCAD, seguida do programa tradutor desenvolvido para permitir que os agentes sejam capazes de ler os sinais de corrente e tensão dos arquivos de saída da simulação no PSCAD.

Os casos de simulação apresentados neste capítulo demonstram que o sistema de proteção é capaz de realizar as proteções instantâneas e de retaguarda de linhas com seletividade e coordenação, como foi apresentado para: diferentes locais de falta, nos diferentes modos de operação da microrrede, distintos tipos de falta e diferentes condições de carga.

Analisando-se o modo de operação da análise *on-line* com a *off-line* pode-se constatar a necessidade da proteção de retaguarda, tanto local quanto remota. Mesmo tendo o sistema de comunicação utilizado em ambas as análises, apenas na análise *on-line* o agente relé é dependente da mesma para operar seu disjuntor, já que necessitam receber comando do agente coordenador. A imperatividade do sistema de comunicação na

análise *on-line*, é agraciada com sua rápida atuação, a qual não foi superior a 72 ms em nenhum dos casos simulados. Contudo, a proteção de retaguarda de linha é necessária, mesmo com sua atuação mais lenta, pois não depende do sistema de comunicação, como também não depende de outros agentes para realizar a abertura de seu disjuntor.

A análise *off-line*, na grande maioria dos casos simulados, apresentou lenta atuação em relação à proteção, como é normal em proteções primárias versus retaguarda. Importante ressaltar que o tempo de atuação da proteção de sobrecorrente direcional de linha é extremamente dependente do caso simulado, como se pode observar nos casos estudados; pois o tempo de atuação apresenta consideráveis variações, podendo até chegar a operar antes da proteção da análise *on-line*, no caso de retaguarda local. Em todos os casos apresentados os agentes relé provaram ser capazes de atuar de maneira satisfatória, coordenada.

Apesar dos bons resultados das análises *on-line* e *off-line* é importante ressaltar suas limitações. A análise *on-line* depende completamente do sistema de comunicação e que os agentes coordenador e configurador não falhem. Já a análise *off-line* é extremamente robusta, mas enfrenta o problema do tempo de atuação, o qual para se manter coordenado com demais relés nas diferentes condições da microrrede necessita do sistema de comunicação. Ambas análises são extremamente dependentes de seus bancos de dados, arquivos de configuração e também que o agente relé responsável por comandar o disjuntor não falhe.

Concluindo, como se pode observar nos casos simulados o sistema de proteção de retaguarda de sobrecorrente direcional proposto é capaz de atuar de modo satisfatório na arquitetura utilizada.

6 CONCLUSÕES

Sistemas de proteção para sistemas de potência utilizam relés em pontos estratégicos, buscando atingir todos os requisitos de sistemas de proteção, a saber: seletividade, velocidade e confiabilidade. Sendo assim, sistemas de proteção naturalmente possuem características de sistemas distribuídos, como sistemas multiagentes. O trabalho apresentou um SMA capaz de realizar a proteção da microrrede, usufruindo das características distribuídas e da capacidade de interação dos agentes.

A característica distribuída do SMA permite que os relés analisem seus sinais de entrada, de forma independente, possuindo autonomia. Os agentes relé utilizam seus comportamentos de interação e comunicação unicamente quando realizam uma alteração de seus ajustes ou quando detectam a ocorrência de uma possível falta. Relevante ressaltar que na ocorrência de troca de mensagens entre os agentes, seus conteúdos são unicamente as informações necessárias para que o SMA seja capaz de alcançar seu objetivo global, realizar a proteção das microrredes. A cooperação entre os agentes permite a divisão de tarefas. Assim cada agente possui um conjunto pequeno de comportamentos, simplificando seu desenvolvimento individual como sua compreensão. O *framework* JADE se mostrou capaz de suprir as necessidades computacionais para o desenvolvimento dos agentes, o qual permite o monitoramento gráfico da troca de mensagens no programa Java Sniffer. O conjunto de programas e de plataformas utilizadas possibilitou desenvolver e avaliar o SMA proposto.

A principal característica do sistema desenvolvido é sua adaptabilidade às alterações na microrrede. Esta capacidade está presente em ambas análises, seja para identificar a seção em falta ou realizar o planejamento da coordenação da função de proteção de sobrecorrente direcional das linhas de distribuição da microrrede. Alterações nos ajustes de proteção das microrredes são acionados ou sensibilizados por alterações significativas no despacho, como pela conexão ou não da microrrede à concessionária de energia. Assim, o objetivo da elaboração do sistema de proteção adaptativa de retaguarda para as linhas de distribuição em conjunto com a análise online e proteção de retaguarda de geradores síncronos foram atingidos.

A implementação descrita neste trabalho demonstra a utilização de SMA na proteção adaptativa da microrrede, sendo ela pela atualização de ajustes ou através de centralizar informações essenciais, a fim de, localizar a falta pelo sistema especialista. No desenvolver do trabalho foi almejado atingir os requisitos de um sistema de proteção, como reduzir

os dados transmitidos pelos agentes, assim reduzindo o uso do sistema de comunicação (evitar congestionamento). A utilização de agentes, distribuídos pela microrrede, na realização da proteção se demonstrou uma solução interessante para as dificuldades apresentadas pelas tendências dos sistemas elétricos de potência.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são listadas abaixo:

- Adicionar a capacidade de cálculo das correntes de curto-circuito na microrrede em diferentes condições. Permitindo que os ajustes de proteção de retaguarda adaptativos sejam realizados, considerando as capacidades de curto-circuito do atual sistema (automatizar a entrada de dados de curto-circuito).
- Utilizar otimização para o cálculo dos novos ajustes da proteção de retaguarda adaptativa. Para otimizar o tempo de resposta da proteção.
- Desenvolvimento de uma simulação integrada, permitindo que o sistema multiagente abra os disjuntores da microrrede.
- Inserir erros de medição nos sensores dos relés. Aproximando o sistema simulado à realidade.
- Implementar tradicionais sistemas de tele proteção no sistema teste através de SMA.
- Implementar a função de proteção de sobrecorrente instantânea adaptativa na análise *off-line*, na qual o agente relé tem autonomia em operar seu disjuntor. Para realizar esta função seria necessário automatizar os cálculos de curto-circuito do sistema teste.
- Simulação do sistema de comunicação. Permitindo uma análise confiável dos atrasos da troca de mensagens e especificações mínimas da rede de comunicação, necessária para a proteção da microrrede.

7 REFERÊNCIAS

ABB. Types IRP, IRC and IRD Directional Overcurrent Ground Relays Instruction Leaflet 1998.

ABDEL-KHALIK, A. S. et al. Fault Current Contribution of Medium Voltage Inverter and Doubly-Fed Induction-Machine-Based Flywheel Energy Storage System. **Sustainable Energy, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 1, p. 58-67, 2013. ISSN 1949-3029.

ABEDINI, R. et al. Multi-agent approach for power system in a smart grid protection context. PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble, 2013, 16-20 June 2013. p.1-6.

AL-NASSERI, H.; REDFERN, M.; LI, F. A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters. Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006, IEEE. p.7 pp.

BAKKEN, D. Smart Grids: Clouds, Communications, Open Source, and Automation. CRC Press, 2014. ISBN 1482206110.

BAR-NOY, A.; DOLEV, D.; PETKOVIC, D. Robust multi-agent decision making in faulty environment. Pattern Recognition, 1988., 9th International Conference on, 1988, 14-17 Nov 1988. p.966-970 vol.2.

BARAN, M.; EL-MARKABI, I. Adaptive over current protection for distribution feeders with distributed generators. Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, 2004, IEEE. p.715-719.

BARBOSA FILHO, W. P.; DE AZEVEDO, A. C. S. Geração distribuída: vantagens e desvantagens. **II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia**, 2013.

BARKER, P. P.; DE MELLO, R. W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems. Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, 2000, IEEE. p.1645-1656.

BELLIFEMINE, F. L.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. **Developing multi-agent systems with JADE.** John Wiley & Sons, 2007. ISBN 0470058404.

BENJAMIN, K.; ROBERT, L.; TOSHIFUMI, I. A look at microgrid technologies and testing, projects from around the world. **IEEE Power and energy magazine**, v. 6, n. 3, p. 41-53, 2008.

BITTENCOURT, A. A. **Proteção adaptativa de alimentadores de distribuição de energia elétrica considerando geração distribuída**. 2011. (Mestre). Engenharia Elétrica,

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective relaying: principles and applications**. CRC press, 2014. ISBN 1439888116.

BORDINI, R. H.; HÜBNER, J. F.; WOOLDRIDGE, M. **Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason**. John Wiley & Sons, 2007. ISBN 0470061839.

BRATMAN, M. **Intention, plans, and practical reason**. Cambridge, USA, Mar. : Harvard University Press, 1987.

BROOKS, R. A. Intelligence without representation. **Artificial intelligence**, v. 47, n. 1, p. 139-159, 1991. ISSN 0004-3702.

BUSE, D. P. et al. Agent-based substation automation. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 1, n. 2, p. 50-55, 2003. ISSN 1540-7977.

CHEN, Z.; KONG, W. Protection Coordination Based on a Multi-agent for Distribution Power System with Distribution Generation Units. International Workshop on Next Generation Regional Energy System Development, 2007.

CORREA FILHO, M. **Arquitetura de diálogos entre agentes cognitivos distribuídos**. Rio de Janeiro: COPPE da UFRJ. 1994. Tese de Doutorado

DANG, K. et al. An adaptive protection method for the inverter dominated microgrid. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on, 2011, IEEE. p.1-5.

DAVIDSON, E. M. et al. Applying multi-agent system technology in practice: automated management and analysis of SCADA and digital fault recorder data. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS PWRS**, v. 21, n. 2, p. 559, 2006. ISSN 0885-8950.

DEWADASA, J. M.; GHOSH, A.; LEDWICH, G. Distance protection solution for a converter controlled microgrid. Proceedings of the 15th National Power Systems Conference, 2008.

DEWADASA, J. M. D. **Protection of distributed generation interfaced networks**. 2010. (Doctor of Philosophy). School of Engineering Systems, Queensland University of Technology, Queensland, Australia.

DEWADASA, M.; GHOSH, A.; LEDWICH, G. Protection of microgrids using differential relays. Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian, 2011, IEEE. p.1-6.

DEWADASA, M. et al. Control and protection of a microgrid with converter interfaced micro sources. Power Systems, 2009. ICPS'09. International Conference on, 2009, IEEE. p.1-6.

DIMEAS, A. L.; HATZIARGYRIOU, N. D. Operation of a Multiagent System for Microgrid Control. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1447-1455, 2005. ISSN 0885-8950.

DUDOR, J. S.; PADDEN, L. K. Problems and solutions for protective relay applications in petroleum facilities-some protection applications for generators and transformers. Petroleum and Chemical Industry Conference, 1995. Record of Conference Papers., Industry Applications Society 42nd Annual, 1995, 11-13 Sep 1995. p.131-144.

ETZIONI, O. Moving up the information food chain: Deploying softbots on the world wide web. **AI magazine**, v. 18, n. 2, p. 11, 1997. ISSN 0738-4602.

FARHANGI, H. The path of the smart grid. **Power and energy magazine, IEEE**, v. 8, n. 1, p. 18-28, 2010. ISSN 1540-7977.

FERGUSON, I. A. **Touring Machines: An architecture for dynamic, rational, mobile agents**. 1992. University of Cambridge UK

FIPA. Standard Status Specifications. 2002. Disponível em: < <http://www.fipa.org/repository/standardspecs.html> >. Acesso em: 15/10/2015.

GEORGEFF, M. Communication and interaction in multi-agent planning. **Readings in distributed artificial intelligence**, v. 313, p. 125-129, 1988.

GEORGEFF, M. P. A Theory of Action for MultiAgent Planning. AAI, 1984. p.121-125.

HORLING, B.; LESSER, V. A survey of multi-agent organizational paradigms. **The Knowledge Engineering Review**, v. 19, n. 04, p. 281-316, 2004. ISSN 1469-8005.

IEEE Power System Relaying Committee. **IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators**, IEEE Tutorial Course, IEEE Power Engineering Society Special Publ, n. 95, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1995.

IEEE Power System Relaying Committee. **IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays**, IEEE Std C37.112-1996, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1997.

IEEE Power System Relaying Committee. **IEEE Guide for AC Generator Protection**, IEEE Std C37.102-2006 (Revision of IEEE Std C37.102-1995), p. 1-173, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2013.

IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays. **IEEE Std C37.112-1996**, p. i, 1997.

IEEE Standards Association. **IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems**, IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book], p. 1-710, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2001.

ISSICABA, D. **Block-Oriented Agent-Based Architecture to Support the Power Distribution System Operation**. 2013. (Doctor of Philosophy). Electrical and Computer Engineering, University of Porto

JOSEPH, G.; GARY, R. **Expert systems principles and programming**. 3. PWS Publishing Company, 1998a. 597.

_____. **Expert systems principles and programming**. PWS Publishing Company, v. 2, p. 321, 1998b.

KAMEL, R. M.; CHAOUACHI, A.; NAGASAKA, K. Comparison the performances of three earthing systems for micro-grid protection during the grid connected mode. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 2, n. 03, p. 206, 2011.

KHEDERZADEH, M. Adaptive setting of protective relays in microgrids in grid-connected and autonomous operation. *Developments in Power Systems*

Protection, 2012. DPSP 2012. 11th International Conference on, 2012, IET. p.1-4.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2008.

_____. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 3. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2012a.

_____. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. v.1 2012b.

_____. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. v.2 2014a.

_____. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2014b.

KINNY, D.; GEORGE, M. Commitment and Effectiveness of Situated Agents. IJCAI-91, 1991. p.82-88.

LAAKSONEN, H.; ISHCHENKO, D.; OUDALOV, A. Adaptive protection and microgrid control design for Hailuoto Island. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, v. 5, n. 3, p. 1486-1493, 2014. ISSN 1949-3053.

LIANG, C.; KHODAYAR, M. E.; SHAHIDEHPOUR, M. Adaptive Protection System for Microgrids: Protection practices of a functional microgrid system. **Electrification Magazine, IEEE**, v. 2, n. 1, p. 66-80, 2014. ISSN 2325-5897.

LIM, I. H. et al. Multi-Agent System-based Protection Coordination of Distribution Feeders. Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007. International Conference on, 2007, 5-8 Nov. 2007. p.1-6.

LOUW, C.; BUQUE, C.; CHOWDHURY, S. Modelling and simulation of an adaptive differential current protection scheme for a solar PV microgrid. 2014.

MA, J. et al. A novel adaptive current protection scheme for distribution systems with distributed generation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 43, n. 1, p. 1460-1466, 2012. ISSN 0142-0615.

MAHAT, P. et al. A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, v. 2, n. 3, p. 428-437, 2011. ISSN 1949-3053.

MAIOLA, P. C. **Arquitetura multiagente para a coordenação de relés de sobrecorrente na proteção de sistemas radiais na presença de geração distribuída**. 2014. (Mestre). Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Grupo Gen-LTC, 2011. ISBN 8521618840.

MIRSAEIDI, S. et al. Progress and problems in micro-grid protection schemes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 834-839, 2014. ISSN 1364-0321.

MONTEIRO, A. M. **Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller)**. 2005. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

MÜLLER, J. P.; PISCHEL, M.; THIEL, M. Modeling reactive behaviour in vertically layered agent architectures. In: (Ed.). **Intelligent Agents**: Springer, 1995. p.261-276. ISBN 3540588558.

NASCIMENTO, L. L. **Sistema multiagente para proteção adaptativa de microrredes**. 2014. (Mestre). Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OULDALOV, A.; FIDIGATTI, A. Adaptive network protection in microgrids. **International Journal of Distributed Energy Resources**, v. 5, n. 3, p. 201-226, 2009.

PINTO, J. O. C. P. **Inclusão de Agentes de Proteção de Geradores Síncronos em um Sistema Multiagente para Proteção de Microrredes**. 2015. (Mestre). Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PRASAI, A. et al. Protection of meshed microgrids with communication overlay. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 2010, IEEE. p.64-71.

- ROCKEFELLER, G. D. et al. Adaptive transmission relaying concepts for improved performance. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 4, p. 1446-1458, 1988. ISSN 0885-8977.
- SCHELLING, T. C. Dynamic models of segregation†. **Journal of mathematical sociology**, v. 1, n. 2, p. 143-186, 1971. ISSN 0022-250X.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, SEL. **SEL-700G Generator and Intertie Protection Relays**. 2013.
- SHAHRIARI, S. A. A. et al. Minimizing the impact of distributed generation on distribution protection system by solid state fault current limiter. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, 2010, 19-22 April 2010. p.1-7.
- SMITH, R. G. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. **IEEE Transactions on computers**, n. 12, p. 1104-1113, 1980. ISSN 0018-9340.
- SOLANKI, J. M.; KHUSHALANI, S.; SCHULZ, N. N. A multi-agent solution to distribution systems restoration. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 22, n. 3, p. 1026-1034, 2007. ISSN 0885-8950.
- SORTOMME, E.; VENKATA, S. S.; MITRA, J. Microgrid Protection Using Communication-Assisted Digital Relays. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 25, n. 4, p. 2789-2796, 2010. ISSN 0885-8977.
- SUNG, B. C. et al. Adaptive protection algorithm for overcurrent relay in distribution system with DG. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, v. 8, n. 5, p. 1002-1011, 2013. ISSN 1975-0102.
- TAVARES, T. N. **Avaliação do impacto causado na proteção pela interligação de produtores independentes no sistema de distribuição de energia**. 2003. (Mestre). Engenharia Elétrica,
- THERRIEN, C.; TUMMALA, M. **Probability and Random Processes for Electrical and Computer Engineers**. CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-2698-0.
- TUMILTY, R. M. et al. Approaches to Network Protection for Inverter Dominated Electrical Distribution Systems. Power Electronics, Machines and Drives, 2006. The 3rd IET International Conference on, 2006, 4-6 April 2006. p.622-626.

USTUN, T. S.; KHAN, R. H. Multiterminal Hybrid Protection of Microgrids Over Wireless Communications Network. **IEEE Transactions on smart grid**, v. 6, 2015. ISSN 1949-3053.

USTUN, T. S. et al. An adaptive microgrid protection scheme based on a wide-area smart grid communications network. Communications (LATINCOM), 2013 IEEE Latin-America Conference on, 2013, IEEE. p.1-5.

USTUN, T. S.; OZANSOY, C.; ZAYEGH, A. A central microgrid protection system for networks with fault current limiters. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on, 2011, 8-11 May 2011. p.1-4.

WAN, H.; WONG, K.; CHUNG, C. Multi-agent application in protection coordination of power system with distributed generations. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 2008, IEEE. p.1-6.

WANG, H. A new method to eliminate DG's negative effects on the existing distribution network protection. Electricity Distribution - Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on, 2009, 8-11 June 2009. p.1-4.

WEISS, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. MIT press, 1999. ISBN 0262731312.

WIDERGREN, S. E. et al. Simulating the dynamic coupling of market and physical system operations. Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE, 2004, IEEE. p.748-753.

WOOLDRIDGE, M. Agent-based software engineering. **IEE Proceedings-software**, v. 144, n. 1, p. 26-37, 1997. ISSN 1463-9831.

XIAO-PING, W.; YANG, L.; YONG-YANG, Y. Research on the relay protection system for a small laboratory-scale microgrid system. Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on, 2011, 21-23 June 2011. p.2712-2716.

ZHU, Y.; SONG, S.; WANG, D. Multiagents-based wide area protection with best-effort adaptive strategy. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 31, n. 2-3, p. 94-99, 2// 2009. ISSN 0142-

0615. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061508000975>>.
Acesso em: 2009/3//.

APÊNDICE A Regras dos sistemas especialista

As regras apresentadas a seguir fazem referência aos sistemas especialistas do agente coordenador e agente configurador.

A.1 Agente coordenador:

Através das informações recebidas dos agentes relé, e conhecimento da microrrede, o sistema especialista é responsável por localizar a falta. As regras são apresentadas a seguir:

- O relé que informa, a maior corrente, provavelmente de falta, é considerado inicialmente como o mais próximo à falta. As regras a seguir utilizam essa característica:
 - Caso um relé de linha tenha informado a maior corrente, da proteção 50, há três possibilidades: falta na linha, na barra e sem falta.
 - Para concluir que se trata de falta na linha é necessário, que o relé da outra extremidade da linha, informe uma corrente diferente. Na comparação é considerado erro de medição de 20%, nos TCs.
 - Não sendo possível identificar falta na linha, é considerada a possibilidade de falta numa das barras limites da LT. Através da lei de Kirchhoff, é verificado que todas as correntes estão indo ao relé que apresentou a maior corrente (relé 50); e em seu adjacente é realizado o mesmo. A barra que apresentar o maior erro, e sendo superior a 10% (devido a imprecisões) da corrente do relé de proteção de linha, é considerado falta nesta barra.
 - Falta na interconexão dos geradores síncronos, engloba faltas externas aos geradores e falta no transformador. Exige que o coordenador tenha recebido mensagem de proteção 27I e a maior corrente (50) pelo relé dos geradores. Atendendo esses quesitos é considerado falta na

interconexão. Assim não satisfazendo os quesitos é eliminada a possibilidade de falha na interconexão.

- Faltas internas aos geradores são eliminadas automaticamente pelo relé de gerador, através da proteção diferencial percentual 87. O agente relé de gerador informa a atuação da mesma ao coordenador, definindo como falha interna.
- Caso nem uma das regras tenha sido satisfeita o sistema é considerado em estado normal. Não há falha na microrrede.

A.2 Agente configurador:

Com a informação do local da falta, informado pelo agente coordenador, e conhecimento da microrrede, o sistema especialista é responsável por selecionar os disjuntores que devem ser abertos. As regras são apresentadas a seguir, com o agente coordenador localizando falta na:

- Linha, os relés de suas extremidades devem receber comando de abertura, de seus respectivos disjuntores.
- Barra, todos os relés conectados à barra em falta devem receber comando.
- Falta na interconexão, todos os relés presentes na respectiva interconexão recebem comando. Os agentes relé dos geradores e o do transformador.

ANEXO A Dados do subsistema real

Os dados apresentados neste anexo fazem referência ao diagrama unifilar apresentado pela Figura 5.1.

A.1 EQUIVALENTE CONCESSIONÁRIA (B1-B2)

Impedância Seq. Positiva = $0,04343 + j 0,18824$ p.u.

Impedância Seq. Zero = $0,0208 + j 0,16259$ p.u.

(referência à base do sistema de 100 MVA)

A.2 GERADORES

Quadro A.1 – Dados dos geradores

	Barra 7 G1 = G2	Barra 9 G1 = G2	Barra 11 G1 = G2 = G3	Barra 5 G1 = G2
Unidades Geradoras	2	2	3	2
Potência Aparente Nominal (MVA)	1,666	1,666	1,300	3,75
Potência Ativa Nominal Unitária (MW)	1,5	1,5	1,2	3,375
Tensão Nominal (kV)	4,16	4,16	4,16	6,9
Fator de Potência	0,9	0,9	0,9	0,9
Reatância Síncrona de Eixo Direto X_d (p.u.)	0,89	0,89	0,9014	0,98
Reatância Síncrona de Eixo Quadratura X_q (p.u.)	0,87	0,87	0,657	0,96
Reatância Transitória de Eixo Direto X'_d (p.u.)	0,29	0,29	0,237	0,15
Reatância Subtransitória de Eixo Direto X''_d (p.u.)	0,17	0,17	0,229	0,10
Reatância de Sequência Negativa X₂ (p.u.)	0,18	0,18	0,2	0,12
Reatância de Sequência Zero X₀ (p.u.)	0,05	0,05	0,07	0,03
Fabricante	WEG	WEG	WEG	WEG

Todos os geradores apresentados no Quadro A.1 possuem configuração Estrela, com resistência de aterramento de 12 ohms. Os valores apresentados em p.u. têm como referência as bases das máquinas.

A.3 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

- L1 - Cabo 336,4 CAA, 12 km
- L2 - Cabo 336,4 CA, 20,97 km
- L3 - Cabo 336,4 CA, 20,97 km
- L4 - Cabo 336,4 CA, 4,01 km
- L5 - Cabo 336,4 CA, 5,22 km

Cabo 336,4 CAA:

Impedância Seq. Positiva = $0,033 + j 0,068$ p.u/km

Impedância Seq. Zero $0,0639 + j 0,3216$ p.u/km.

Cabo 336,4 CA:

Impedância Seq. Positiva = $0,0326 + j 0,0699$ p.u/km.

Impedância Seq. Zero $0,0634 + j 0,3235$ p.u/km.

Base 100 MVA – Tensão 23 kV

A.4 TRANSFORMADORES

Quadro A.2 – Dados dos transformadores

	Barras 6 e 7	Barras 8 e 9	Barras 10 e 11	Barras 4 e 5	Conexão com a Concessionária	
					T1	T2
Tensão Nominal BT (kV)	4,16	4,16	4,16	6,90	23,00	23,00
Tensão Nominal AT (kV)	23,00	23,00	23,00	23,00	138,00	138,00
Potência Nominal (MVA)	3,35	3,35	4,00	8,00	28,53	26,67
Impedância (%)	6	6	6	6	0,6843	0,6987
Grupo de Ligação AT/BT	Triângulo / Estrela Aterrado	Triângulo / Estrela Aterrado	Triângulo / Estrela Aterrado	Triângulo / Estrela Aterrado	Estrela Aterrado /Estrela Aterrado	Estrela Aterrado /Estrela Aterrado