Campus de São Carlos

**EPOCHS: UMA PLATAFORMA PARA AVALIAÇÃO DE NOVAS
TECNOLOGIAS BASEADAS EM AGENTES PARA PROTEÇÃO
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Autor: Renan Giovanini

Orientador: Prof. Dr. Denis Vinicius Coury

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

EPOCHS: UMA PLATAFORMA PARA AVALIAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS BASEADAS EM AGENTES PARA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

RENAN GIOVANINI

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos

2005

DEDALUS - Acervo - EESC

31100053575

Class.	TESE-EESC
Cutt.	245B
Tombo	T 262/05
Sysno	1467163

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

G512e Giovanini, Renan
Epochs : uma plataforma para avaliação de novas tecnologias baseadas em agentes para proteção de sistemas elétricos de potência / Renan Giovanini. -- São Carlos, 2005.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury.

1. Sistemas, agentes. 2. Proteção de sistemas elétricos de potência. 3. Redes de computadores intranet.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RENAN GIOVANINI**

Tese defendida e julgada em 04-07-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **DENIS VINICIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Associado **LUIZ GONÇALVES NETO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **SOFIANE LABIDI**
(Universidade Federal do Maranhão/UFMA)

APROVADO

Prof. Dr. **EDUARDO CÉSAR SENER**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Prof. Titular **ALEXANDRE PINTO ALVES DA SILVA**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

APROVADO

Prof. Associado **HOMERO SCHIABEL**
Vice-Coordenador em Exercício do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALLURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico, mais uma vez, esta tese aos meus pais, Ricardo e Maria Clara, pelo apoio incondicional e total confiança depositados ao longo de toda a minha vida.

Agradecimentos

Ao Professor Titular Denis Vinicius Coury pela valiosa orientação e enorme contribuição à minha formação acadêmica nestes quase 10 anos de relação profissional.

Ao Professor James S. Thorp pela oportunidade de trabalho em seu grupo de pesquisa em Proteção de SEPs na Escola de Engenharia Elétrica da Universidade de Cornell. Ao Professor Kenneth M. Hopkinson e a Professora Xiaoru Wang pelo *team working* e preciosa ajuda no desenvolvimento da plataforma EPOCHS.

Aos colegas e amigos do laboratório LSEE, e aos muitos amigos de pós-graduação que ainda estão ou já passaram pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – campus São Carlos.

Aos meus irmãos, Ridinei e Neure, à minha namorada Márcia, aos meus *best friends* André e Cleiser, e a todos amigos que sempre acreditaram em mim e me ajudaram em todas as decisões tomadas ao longo de todos esses anos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelas bolsas de doutorado e sanduíche concedidas.

Resumo

Este trabalho apresenta novas explorações do uso de sistemas agentes aplicados à proteção de sistemas elétricos de potência (SEP). Os sistemas agentes são definidos como *softwares* capazes de interagir com seu ambiente. Todos estudos apresentados focam o uso de agentes dentro de um SEP, através de uma rede privada de comunicação (intranet) baseada na tecnologia da Internet. O objetivo final deste trabalho é o desenvolvimento de agentes que possam ser examinados em situações reais. Para facilitar esta tarefa, uma plataforma computacional foi desenvolvida denominada como EPOCHS (*Electric Power and Communication Synchronizing Simulator*). A principal função desta plataforma é permitir a integração dos agentes a um ambiente que combine simuladores que ofereçam informações sobre um SEP, assim como dados sobre uma rede Intranet. Dentro deste contexto, um método para proteção primária e de retaguarda foi desenvolvido e testado dentro da plataforma EPOCHS. Os agentes desenvolvidos apresentaram resultados melhores que as técnicas tradicionais. Resultados ilustrando o desempenho e viabilidade deste sistema de proteção baseado em agentes são apresentados.

Palavras-chave: Sistemas Agentes, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Redes de Computadores Intranet

Abstract

This work presents new explorations into the use of agent technology applied to the protection of power systems. We broadly define an agent to be an autonomous piece of software capable of interacting with its environment. Our investigation centers on the use of agents within an electric power grid using a private communication network, termed a Utility Intranet, based on Internet technology. Our goal is to create practical agents that can be examined in realistic situations. To facilitate this aim, a new platform has been developed, EPOCHS, which allows agents to operate in an environment that combines proven electric power electromagnetic and electromechanical transient simulators with a popular network communication simulation engine. We developed primary and a backup protection system using agent technology and evaluated this system within the EPOCHS environment. The agent-based system studied improved on traditional methods. Results illustrating the performance and viability of agent-based protection system are presented.

Keywords: Agent Systems, Power System Protection, Intranet Computer Networks

Lista de Ilustrações

<i>Figura 1 – Subsistemas de um esquema de proteção</i>	19
<i>Figura 2 - Um típico SEP com as suas respectivas zonas de proteção</i>	20
<i>Figura 3 – Exemplo de proteção primária e de retaguarda para LT</i>	21
<i>Figura 4 – Relação entre os diferentes agentes</i>	33
<i>Figura 5 - A Estrutura dos Agentes para Proteção de LTs</i>	34
<i>Figura 6 - Custos relativos dos diferentes tipos de canais</i>	38
<i>Figura 7 - Diagrama esquemático de um sistema de comunicação através de ondas portadoras</i>	40
<i>Figura 8 - Cabo OPGW – (a) Estrutura, (b) Ilustração</i>	45
<i>Figura 9 - Gerenciamento do Sistema de Potência</i>	48
<i>Figura 10 - (a) Intertravamento necessário para abertura da seccionadora S3A com o circuito LI sob carga. (b) Intertravamento necessário para abertura da seccionadora S3A com o circuito LI sob carga</i>	50
<i>Figura 11 - Requerimentos para um sistema de proteção convencional</i>	52
<i>Figura 12 - Requerimentos para um sistema de controle convencional</i>	53
<i>Figura 13 - Sistema de proteção e controle coordenado</i>	53
<i>Figura 14 - Sistema de proteção e controle para subestações</i>	55
<i>Figura 15 - Subestação Coordenada</i>	56
<i>Figura 16 - Estrutura modular de um sistema coordenado</i>	57
<i>Figura 17 - O modelo de referência híbrido</i>	63
<i>Figura 18 - Sistema de controle e proteção baseado em uma intranet</i>	74
<i>Figura 19 - O relacionamento entre os 5 componentes do EPOCHS</i>	81
<i>Figura 20 - Fluxograma da interface elétrica</i>	83
<i>Figura 21 - Fluxograma da interface de comunicação em rede</i>	84
<i>Figura 22 - Fluxograma do Componente AgentHQ</i>	85
<i>Figura 23 - Recebimento de uma Mensagem</i>	86
<i>Figura 24 - Relacionamento entre os componentes do EPOCHS na sua implementação</i>	87
<i>Figura 25 – Sistema IEEE 14 barras</i>	93
<i>Figura 26 – Sistema de Comunicação</i>	94
<i>Figura 27 – Localização dos Agentes</i>	97
<i>Figura 28 – Sistema de comunicação funcionando corretamente</i>	100
<i>Figura 29 – Enlaces 2-3 e 3-2 estão inoperantes</i>	101
<i>Figura 30 - Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 1 enlace</i>	105
<i>Figura 31 - Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 2 enlaces</i>	108
<i>Figura 32 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 3 enlaces</i>	110
<i>Figura 33 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 4 enlaces</i>	112
<i>Figura 34 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 5 enlaces</i>	114
<i>Figura 35 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 6 enlaces</i>	116
<i>Figura 36 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação relativo ao conjunto total de testes</i>	118
<i>Figura 37 – Tempo de trânsito máximo entre os nós adjacentes da rede de comunicação relativo ao conjunto total de testes</i>	120
<i>Figura 38 - O mecanismo dos agentes para a proteção diferencial</i>	125
<i>Figura 39 – Proteção Diferencial de uma LT</i>	126

<i>Figura 40 – Característica percentual diferencial</i>	126
<i>Figura 41 – Proteção Diferencial de Retaguarda</i>	139
<i>Figura 42 - Princípio básico da fibra óptica</i>	170
<i>Figura 43 - Fibra multimodo do tipo índice degrau</i>	171
<i>Figura 44 - Fibra multimodo tipo índice gradual</i>	172
<i>Figura 45 - Fibra Monomodo</i>	172
<i>Figura 46 - Modulação analógica de uma fonte óptica</i>	174
<i>Figura 47 - Modulação digital de uma fonte óptica</i>	175

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Classificações dos Agentes</i>	31
<i>Tabela 2 - Critérios obedecidos para a abertura da seccionadora S3A</i>	49
<i>Tabela 3 - Comparação entre Internet e intranet</i>	62
<i>Tabela 4 - Dados das barras</i>	90
<i>Tabela 5 - Dados das LTs</i>	91
<i>Tabela 6 - Largura de banda</i>	101
<i>Tabela 7 - Tempo de trânsito</i>	102
<i>Tabela 8 - Situações possíveis para queda de 1 enlace</i>	104
<i>Tabela 9 - Volume de tráfego máximo e indicação da situação correspondente para todos os enlaces relativa à queda de 1 enlace</i>	106
<i>Tabela 10 - Situações possíveis para queda de 2 enlaces</i>	107
<i>Tabela 11 - Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 2 enlaces</i>	109
<i>Tabela 12 - Situações possíveis para queda de 3 enlaces</i>	110
<i>Tabela 13 - Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 3 enlaces</i>	111
<i>Tabela 14 - Situações possíveis para queda de 4 enlaces</i>	112
<i>Tabela 15 - Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 4 enlaces</i>	113
<i>Tabela 16 - Situações possíveis para queda de 5 enlaces</i>	113
<i>Tabela 17 - Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 5 enlaces</i>	115
<i>Tabela 18 - Situações possíveis para queda de 6 enlaces</i>	115
<i>Tabela 19 - Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 6 enlaces</i>	117
<i>Tabela 20 - Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para o conjunto completo de testes</i>	119
<i>Tabela 21 - Tempo de trânsito máximo e indicação da contingência correspondente para todos os nós adjacentes da rede de comunicação para o conjunto completo total de testes</i>	121
<i>Tabela 22 - Conjunto de parâmetros utilizados para testes</i>	128
<i>Tabela 23 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,29960 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω</i>	129
<i>Tabela 24 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,3039 s (ângulo de falta de 90°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω</i>	130
<i>Tabela 25 - Testes da proteção primária relativa a LT 1-2</i>	130
<i>Tabela 26 - Testes da proteção primária relativa a LT 4-5</i>	131
<i>Tabela 27 - Testes da proteção primária relativa a LT 13-14</i>	131
<i>Tabela 28 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace (1-2) inoperante</i>	132
<i>Tabela 29 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace (1-2) com 1% de sobrecarga</i>	133
<i>Tabela 30 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace 1-2 com 5% de sobrecarga</i>	134

Tabela 31 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace 1-2 com 10% de sobrecarga	134
Tabela 32 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace 1-2 com 30% de sobrecarga	135
Tabela 33 - Conjunto de regras utilizadas pelo sistema agente	142
Tabela 34 - Seqüência de eventos exemplificando o funcionamento correto do sistema agente para uma falta trifásica localizada no meio da LT 13-14	143
Tabela 35 - Sumário dos testes realizados para o funcionamento correto dos agentes	144
Tabela 36 - Seqüência de eventos exemplificando o comportamento do sistema agente frente à uma falha de enlace para uma falta trifásica localizada no meio da LT 13-14	145
Tabela 37 - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha de um enlace	146
Tabela 38 - Seqüência de eventos exemplificando o comportamento do sistema agente frente à falha do disjuntor associado ao agente PRIM_13-14 para uma falta trifásica localizada no meio da LT 13-14	147
Tabela 39 - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um disjuntor	148
Tabela 40 - Seqüência de eventos exemplificando o comportamento do sistema agente frente à falha do agente PRIM_13-14 para uma falta trifásica localizada no meio da LT 13-14	151
Tabela 41 - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um dos agentes primários	152
Tabela 42 - Seqüência de eventos exemplificando o comportamento do sistema agente frente à falha do IED_13-14 para uma falta trifásica localizada no meio da LT 13-14	154
Tabela 43 - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um dos IEDs	155
Tabela 44 - Volume de tráfego nos enlaces	177
Tabela 45 - Tempo de trânsito nos enlaces	186

Lista de Abreviaturas e Siglas

AgentHQ – *Agent Headquarter*

EPOCHS – *Electric Power and Communication Synchronizing Simulator*

EPRI – *Electric Power Research Institute*

FAQ – *Frequently Asked Questions*

GPS – *Global Positioning System*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IA – *Inteligência Artificial*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IED – *Intelligent Electronic Device*

IP – *Internet Protocol*

LAN – *Local Area Network*

LT – *Linha de Transmissão*

OPGW – *Optical Ground Wire*

OPLAT – *Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão*

PCM – *Pulse Code Modulation*

PDA – *Personal Desktop Assistant*

PLC – *Power Line Carrier*

RTI – *Runtime Infrastructure*

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition System*

SEP – *Sistema Elétrico de Potência*

TC – *Transformador de Corrente*

TCP – *Transmission Control Protocol*

TP – *Transformador de Tensão*

UCA – *Utility Communication Architecture*

UDP – *User Datagram Protocol*

UTR – *Unidade Terminal Remota*

VPN – *Virtual Private Network*

WAN – *Wide Area Network*

Lista de Símbolos

A	–	Ampère
Hz	–	Hertz
k	–	kilo
G	–	giga
°	–	grau
M	–	mega
m	–	mili
Ω	–	Ohm
V	–	Volt

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Lista de Ilustrações	7
Lista de Tabelas	9
Lista de Abreviaturas e Siglas	11
Lista de Símbolos	13
Sumário	14
Capítulo 1	18
1.1 Componentes dos Esquemas de Proteção	18
1.2 Zonas de Proteção	19
1.2.1 Proteção Primária e de Retaguarda	20
1.3 Características Funcionais de um Relé	21
1.4 O Relé Digital	22
1.5 Proteção dos Elementos de um Sistema de Potência	23
1.5.1 Técnicas para a Proteção de Linhas de Transmissão	23
1.5.2 Sistemas Agentes Aplicados à Proteção de Sistemas Elétricos de Potência	24
Capítulo 2	27
2.1 O que é um Agente ?	27
2.2 A Essência dos Agentes	30
2.3 Classificações de Agentes	30
2.4 A Estrutura dos Agentes para Proteção de Linhas de Transmissão	32
2.5 Resumo	34
Capítulo 3	36
3.1 Introdução	36
3.2 Meios Físicos Utilizados para Comunicação em Sistemas de Proteção	37
3.2.1 Escolha do Meio Físico	38
3.3 Aplicações de Fibras Ópticas em Sistemas de Potência	43
3.3.1 Comunicação entre Subestações	43
3.3.2 Comunicação dentro da Subestação	45
3.3.3 Comunicação entre uma Subestação e uma Rede Externa	45
3.4 Resumo	46
Capítulo 4	47

4.1	Introdução	47
4.2	Sistemas de Controle para Subestações Convencionais (The Electricity Training Association, 1995)	49
4.2.1	Funções e Arquitetura	49
4.2.2	Desvantagens do Uso da Tecnologia Tradicional	51
4.3	Sistemas de Controle Coordenados para Subestações (The Electricity Training Association, 1995)	54
4.3.1	Arquitetura do Sistema	54
4.3.2	Funcionalidades do Sistema	57
4.4	Vantagens de um Sistema de Controle Coordenado	58
4.5	Resumo	60
Capítulo 5		61
5.1	Introdução	61
5.2	Intranet – Definição	62
5.3	Redes de Computadores – Uma Visão Geral (Tanenbaum, 1996a)	62
5.3.1	Camada Física	63
5.3.2	Camada de Enlace de Dados	64
5.3.3	Camada de Rede	65
5.3.4	Camada de Transporte	66
5.3.5	Camada de Aplicação	68
5.4	Vantagens da Utilização de Tecnologias baseadas na Internet em Sistemas de Potência	68
5.5	Configurações de Redes para Sistemas de Potência	70
5.5.1	Meio Físico	72
5.5.2	Protocolos e Configurações de Rede	72
5.6	Resumo	75
Capítulo 6		76
6.1	Introdução	76
6.2	Histórico	77
6.3	Trabalhos Relacionados	77
6.4	Descrição da Plataforma EPOCHS	79
6.5	Arquitetura e Funcionamento da Plataforma EPOCHS	80
6.5.1	A RTI	81
6.5.2	A Interface Elétrica	82
6.5.3	A Interface de Comunicação em Rede	83
6.5.4	O Componente AgentHQ	85
6.6	Implementação e Otimização	86
6.7	Scripts de Simulação	87
6.8	Resumo	88
Capítulo 7		89
7.1	Introdução	89
7.2	Sistema de Potência	90
7.3	Sistema de Comunicação	91
7.4	Agentes	95

7.5	Resumo	98
Capítulo 8		99
8.1	Introdução	99
8.2	Características da Rede de Comunicação	99
8.2.1	Largura de Banda e Tempo de Trânsito	99
8.2.2	A Estrutura das Mensagens	102
8.3	Determinação da Largura de Banda da Rede de Comunicação e o Fenômeno da Queda de Enlaces	103
8.3.1	Queda de 1 Enlace	104
8.3.2	Queda de 2 Enlaces	107
8.3.3	Queda de 3 Enlaces	109
8.3.4	Queda de 4 Enlaces	111
8.3.5	Queda de 5 Enlaces	113
8.3.6	Queda de 6 Enlaces	115
8.3.7	Análise Global	117
8.4	Avaliação do Tempo de Trânsito dos Pacotes entre os Nós da Rede de Comunicação	120
8.5	Resumo	122
Capítulo 9		123
9.1	Introdução	123
9.2	Trabalhos Relacionados	123
9.3	A Arquitetura do Agente para Proteção Diferencial	124
9.3.1	Esquema para o Cálculo da Corrente Diferencial	125
9.3.2	Características Complementares	127
9.4	Resultados do Sistema Agente para Proteção Diferencial	127
9.5	Resumo	136
Capítulo 10		137
10.1	Introdução	137
10.2	A Arquitetura do Agente para Proteção de Retaguarda	138
10.3	Integração dos Agentes de Retaguarda com os Agentes Primários e a Nova Abordagem para os Agentes Primários	140
10.4	Avaliação do Desempenho do Sistema Agente Projetado	142
10.4.1	Funcionamento Correto do Sistema de Proteção	143
10.4.2	Falha de um Enlace	144
10.4.3	Falha do Disjuntor	146
10.4.4	Falha de um Agente Primário	150
10.4.5	Falha de um IED	153
10.5	Resumo	157
Capítulo 11		159
Referências		164
Apêndice A		168
Apêndice B		170
11.1	Tipos de Fibras Ópticas e Características	170
11.2	Fontes Ópticas	172

11.3	Detectores	173
11.4	Emendas	173
11.5	Conectores	173
11.6	Técnicas de Modulação de Ondas de Luz	173
<i>Apêndice C</i>		<i>176</i>

Capítulo 1

A Proteção dos Sistemas Elétricos de Potência

Simultaneamente ao surgimento dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, surgiram os primeiros esquemas de proteção, que tinham como finalidade proteger o sistema de faltas que nestes pudessem ocorrer, resultantes de descargas atmosféricas, curtos-circuitos e problemas de chaveamento (Stevenson Jr., 1986). Apesar de tais faltas serem um evento um tanto raro, estas se não isoladas em um curto espaço de tempo, provocariam sérios danos ao sistema elétrico, tais como danos a equipamentos, redução da margem de estabilidade do sistema e explosões em equipamentos. Para que tais problemas não ocorressem, os esquemas de proteção deveriam possuir uma rápida ação, isolando a porção em falha do sistema.

1.1 Componentes dos Esquemas de Proteção

A rápida ação dos esquemas de proteção exige a operação de vários subsistemas. Os esquemas de proteção podem ser subdivididos em quatro partes (Stevenson Jr., 1986):

- transdutores : são transformadores de corrente (TC) e tensão (TP) responsáveis pela alimentação do relé;
- relé : corresponde ao elemento lógico do esquema de proteção, tendo como função detectar faltas dentro de seu alcance, e a partir disto energizar as bobinas de disparo dos seus disjuntores associados;
- disjuntores : são acionados pelos relés, e isolam a parte do sistema em que ocorreu a falta;

- bateria : responsável pelo fornecimento de energia ao sistema de proteção.

Na Figura 1 visualiza-se um esquema de proteção com todos os seus subsistemas.

Figura 1 – Subsistemas de um esquema de proteção

A ação coordenada do esquema de proteção pode ser vislumbrada da seguinte maneira: quando ocorre uma falha em *P* na linha de transmissão (LT) da Figura 1, uma corrente adicional flui de ambos os terminais da LT para a falha (supondo-se a existência de fontes de energia em ambos os lados) aumentando-se o nível de corrente na LT e conseqüente diminuição da tensão. Estes dados de corrente e tensão são então convertidos a níveis mais baixos pelos transdutores (TC e TP) servindo de entrada para o relé. O relé então processa os sinais de entrada e decide se uma falta realmente ocorreu na LT. Caso uma falta seja detectada, o relé energiza a bobina de disparo do disjuntor correspondente, fazendo que os contatos deste, que estão em série com a LT, abram e desconectem a LT do restante do sistema, isolando assim a parte defeituosa do sistema.

1.2 Zonas de Proteção

A filosofia de um esquema de proteção consiste basicamente na divisão do sistema elétrico de potência (SEP) em pequenas partes de modo que uma proteção ade-

quada seja assegurada, bem como a garantia de que apenas uma pequena parte do sistema seja desligada no caso de uma falta. Um típico SEP e suas respectivas zonas de proteção podem ser visualizadas na Figura 2. Nesta figura podemos observar que as zonas de proteção se sobrepõem umas às outras de maneira a não existir zonas desprotegidas.

Figura 2 - Um típico SEP com as suas respectivas zonas de proteção

1.2.1 Proteção Primária e de Retaguarda

Conforme salientamos, os esquemas de proteção dividem o SEP em zonas para assegurar uma proteção adequada. Estes esquemas são conhecidos como esquemas de proteção primária, pois eles são responsáveis pela remoção da falta o mais rápido possível, desligando a menor parcela do sistema. Entretanto, usualmente considera-se que alguns destes componentes possam vir a falhar, sendo necessário, portanto, a criação de um esquema de proteção de retaguarda (Elmore, 1994).

Uma maneira de se obter um esquema de retaguarda consiste na duplicação dos componentes de proteção primária de modo que a falha do esquema primário não impossibilite a remoção da falta. Este esquema geralmente é utilizado em circuitos importantes dentro de um SEP, visto o custo adicional que ele acarreta.

Uma outra maneira de se obter um esquema de proteção de retaguarda, consiste-se na utilização das zonas de proteção vizinhas à zona de proteção primária. Dentro deste contexto, as zonas vizinhas (proteção de retaguarda) devem atuar quando uma falta for detectada dentro da zona primária. Deve-se salientar que os esquemas de proteção de retaguarda devem dar ao esquema primário um tempo suficiente para que este possa atuar, visto que uma operação excessivamente rápida dos esquemas de retaguarda podem levar a um desligamento desnecessário de uma grande porção do sistema. A Figura 3 ilustra um esquema de proteção primária e de retaguarda para LTs. Nela podemos observar a proteção primária da LT 2-3 realizada pelo relé 2 (R2), e a proteção de retaguarda desta mesma linha realizada pelo relé 1 (R1). Conforme já mencionado, a proteção de retaguarda realizada por R1 cobre uma grande porção do sistema. Caso exista uma falta dentro da LT 2-3 e simultaneamente ocorra uma falha de funcionamento por parte de R2, o relé R1 realiza a abertura de seu disjuntor, extinguindo a falta.

Figura 3 – Exemplo de proteção primária e de retaguarda para LT

1.3 Características Funcionais de um Relé

Observando o panorama anterior, percebemos que certas características são fundamentais para o desempenho de um relé: velocidade, confiabilidade, seletividade e sensibilidade. A primeira característica – velocidade – é básica dentro do funcionamento de um relé: o relé deve tomar uma decisão o mais rápido possível. A característica confiabilidade traduz-se como a probabilidade do relé satisfazer uma operação prevista sob dadas circunstâncias. Define-se seletividade como a capacidade de atuação do relé com conseqüente isolamento da menor parte do sistema, evitando-se assim desligamentos desnecessários de partes do sistema. Por último, a sensibilidade consiste-se na capacidade do relé em responder corretamente frente a anormalidades das condições de operação e de curtos-circuitos.

Sendo assim, percebemos que os relés são a parte fundamental (“cérebro”) dentro do esquema de proteção, sendo que especial atenção deve ser reservada a este elemento.

1.4 O Relé Digital

Os primeiros relés utilizados eram de constituição eletromecânica que embora eficazes no acionamento dos disjuntores, apresentavam grandes dimensões e eram relativamente lentos. Estes relés possuíam como entradas as leituras de tensão e corrente provenientes dos transdutores, sendo que a sua decisão – *trip* – baseava-se diretamente na comparação ou combinação destes parâmetros com um valor predeterminado (valor ou curva de referência) (Phadke e Thorp, 1988).

No final dos anos 50 surgiram os primeiros relés eletrônicos (conhecidos também como relés de estado sólido). Eles eram constituídos basicamente por diodos, transistores e amplificadores operacionais, sendo mais flexíveis e mais velozes que os relés eletromecânicos porém mais susceptíveis a ruídos eletromagnéticos (EMI).

Com o surgimento dos microprocessadores no início dos anos 70, começou-se a estudar o uso desta nova tecnologia dentro dos esquemas de proteção, criando-se um novo tipo de relé: o relé digital.

O relé digital possui como entrada os mesmos dados de tensão e corrente provenientes de transdutores, tais como no relé eletromecânico ou de estado sólido, sendo que estes sinais são então convertidos em sinais digitais. O processo de decisão é feito então pelo microprocessador através de um programa onde a análise destes sinais de entradas é feita.

Percebe-se logo a superioridade dos relés digitais em relação aos relés convencionais, visto que estes se baseiam em relações simples existentes entre os sinais de entrada enquanto aqueles possuem a capacidade de extração das características mais importantes dos sinais de entrada, bem como uma análise mais complexa da relação existente entre estes sinais. Esta característica só pôde ser obtida graças ao caráter programável dos microprocessadores.

Outras vantagens diretas do uso de relés digitais em relação aos relés convencionais são a crescente diminuição do custo dos microprocessadores e outros componentes digitais integrantes deste tipo de relé, a flexibilidade de operação que este dispositivo proporciona, visto a sua característica programável e por fim a capacidade de auto-diagnóstico para a detecção de possíveis falhas existentes em algum dos componentes integrantes do relé para posterior reparo, evitando assim falhas no seu funcionamento (aumento da confiabilidade).

1.5 Proteção dos Elementos de um Sistema de Potência

Um sistema de potência pode ser dividido em 5 elementos básicos (Elmore, 1994):

- Geradores;
- Transformadores;
- Barramentos;
- Circuitos de distribuição e transmissão;
- Motores.

Dentre estes elementos, percebe-se que a LT é o elemento mais susceptível a faltas devido a sua grande dimensão física (Stevenson Jr., 1986). A proteção de LTs é objeto freqüente de estudos sendo que a proteção deste elemento será o objetivo principal deste trabalho.

1.5.1 Técnicas para a Proteção de Linhas de Transmissão

A maioria das faltas em um SEP ocorrem em LTs. Este elemento possui uma grande variação em suas características, configuração, comprimento e importância relativa dentro do SEP em que se encontra, ocasionando assim a existência de várias técnicas para a sua proteção. Dentre as diversas técnicas de proteção comumente utilizadas para a proteção de LTs, podemos citar a proteção de sobrecorrente, a proteção direcional, a proteção de distância e a proteção através de relé de fio piloto.

A proteção de sobrecorrente consiste na comparação da magnitude da corrente com um valor típico de corrente para uma situação normal, indicando assim uma situação de falta ou não. A proteção direcional baseia-se na comparação do ângulo de fase da corrente de falta com uma quantidade referência (a tensão correspondente, por exemplo) indicando assim se uma falta à diante ou reversa existe.

O esquema de proteção de distância baseia-se no princípio que a relação das entradas de tensão e corrente (impedância aparente) é função da distância entre o ponto de falta e a localização do relé. Basicamente este esquema de proteção compara essas grandezas do sistema, determinando se uma falta está ocorrendo dentro ou fora da sua

zona de proteção. Dentre os relés de distância mais comumente encontrados, podemos citar os relés de impedância, reatância e mho.

Por fim, a proteção através de relé de fio piloto utiliza como base um canal de comunicação entre os relés de terminais remotos de modo que eles funcionem cooperativamente na tomada de decisão e não de maneira independente (*standalone*). Um algoritmo básico utilizado dentro desta filosofia é a comparação diferencial.

1.5.2 Sistemas Agentes Aplicados à Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Os sistemas de potência têm passado por uma série de mudanças desde a última década. Com o processo de privatização iniciado neste período, o sistema passou a ser operado com menores reservas de geração e maiores congestionamentos na transmissão. Sistemas de controle e proteção mais rápidos, confiáveis e melhores coordenados são ainda mais críticos sob este novo cenário. Para enfrentar esta nova realidade, novos métodos de controle e proteção tornam-se necessários.

Sistemas tradicionais de proteção baseiam-se em unidades independentes que se utilizam de medidas locais para a maioria de suas decisões. As redes de comunicação exercem um papel muito limitado nestes sistemas. Com o surgimento de uma nova era de controle descentralizado associado a novos padrões de eficiência, estes métodos revelaram-se ineficientes em atender essas novas exigências. A indústria de sistemas de potência está começando a reconhecer os benefícios que a comunicação pode trazer para uma melhor coordenação dos sistemas de proteção e controle através de ações mais rápidas e precisas. A expansão da rede mundial Internet, ao mesmo tempo, trouxe um grande interesse para o uso de redes de comunicação baseadas na mesma tecnologia para as tarefas de controle e proteção de SEPs. Em particular, tem crescido o interesse do uso de agentes baseados em redes de comunicação para a melhoria da eficiência e confiabilidade dos SEPs.

Mas apesar desse crescente interesse pela comunidade de sistemas de potência, existem poucas oportunidades para investigação do efeito de agentes em sistemas reais devido, principalmente, à falta de uma plataforma computacional que possa simultaneamente simular elementos de um sistema de potência e de um sistema de comunicação.

Com isto em mente, este trabalho descreve o projeto de doutorado intitulado “EPOCHS: Uma Plataforma para Avaliação de Novas Tecnologias Baseadas em Agentes para Proteção de Sistemas Elétricos de Potência”. Nele apresentamos as explorações mais recentes do uso de sistemas agentes aplicados à proteção de sistemas elétricos de potência. Os sistemas agentes são definidos como *softwares* capazes de interagir com seu ambiente. Todos os estudos apresentados focam o uso de agentes dentro de um SEP através de uma rede privada de comunicação (intranet) baseada na tecnologia da Internet. O objetivo final deste trabalho é a análise da viabilidade do uso de agentes para proteção de SEPs. Para facilitar esta tarefa, uma plataforma computacional foi desenvolvida denominada EPOCHS (*Electric Power and Communication Synchronizing Simulator*). A principal função desta plataforma é permitir a integração dos agentes a um ambiente que combine simuladores que ofereçam informações sobre um SEP, assim como dados sobre uma rede intranet. Dentro deste contexto, um sistema para proteção primária e de retaguarda para linhas de transmissão foi desenvolvido e testado dentro da plataforma EPOCHS. Os agentes desenvolvidos apresentaram melhores resultados que as técnicas tradicionais. Resultados ilustrando o desempenho e a viabilidade deste sistema de proteção baseado em agentes são apresentados.

Devido ao caráter multidisciplinar desta pesquisa, três assuntos principais são apresentados e explorados durante este trabalho. Inicialmente, no capítulo 2, abordaremos e definiremos o conceito de sistemas agentes. Este conceito apresenta várias definições por diversos pesquisadores, fazendo assim uma análise mais rigorosa deste assunto extremamente relevante. Posteriormente, no capítulo 3, apresentaremos uma visão geral sobre os sistemas de comunicação, dedicando uma atenção especial aos utilizados pelos sistemas de potência. Logo em seguida, nos capítulos 4 e 5, abordaremos os principais sistemas de controle e proteção para SEPs baseados em redes de comunicação. Após a introdução teórica sobre estes três pontos chave, exibiremos no capítulo 6 a plataforma computacional denominada EPOCHS. O EPOCHS constitui-se no elo de ligação entre os três domínios apresentados, permitindo o estudo de agentes para proteção de SEPs baseados em redes de comunicação. Como finalização deste trabalho, apresentaremos nos capítulos 7, 8, 9 e 10 o estudo realizado com a plataforma EPOCHS. Inicialmente no capítulo 7 apresentamos o SEP e a rede de comunicação utilizada em todos os testes desenvolvidos neste trabalho, assim como todas as considerações tomadas para simulação destes sistemas. Posteriormente no capítulo 8 abordaremos os testes desenvolvidos com a rede de comunicação. Em seguida, no capítulo 9, exporemos os testes

realizados com a proteção primária. Finalmente, no capítulo 10, apresentamos os testes com o sistema de proteção de retaguarda e sua interação com os agentes primários. O capítulo 11 é destinado às conclusões e observações gerais do trabalho. O trabalho é finalizado com as referências bibliográficas e três apêndices onde são descritos a relação de trabalhos publicados durante esta pesquisa, uma breve introdução aos conceitos básicos sobre fibras ópticas e o conjunto completo de testes realizados com o sistema de comunicação.

Capítulo 2

Introdução a Agentes

2.1 O que é um Agente ?

Pesquisadores envolvidos com o estudo de agentes têm oferecido uma variedade de definições, onde cada um tenta explicar o uso da palavra “agente”. Estas definições variam das mais simples até as mais longas e complicadas. Estas definições, à primeira vista, parecem ter surgido diretamente do conjunto de exemplos de agentes que os pesquisadores tinham em mente. Vamos então examinar e comparar algumas destas definições.

O Agente MuBot (Virdhagriswaran, 1998): “O termo agente é usado para representar dois conceitos ortogonais. O primeiro é a habilidade de execução autônoma. A segunda é a habilidade de desempenhar raciocínio orientado à domínio”. Esta definição foi formulada por Sankar Virdhagriswaran da Crystaliz, Inc., onde se define a tecnologia de agentes móveis. A execução autônoma é claramente vital para um agente.

O Agente AIMA (Russel e Norvig, 1995): “Um agente pode ser visto como qualquer coisa que percebe o seu meio através de sensores e age sobre ele através de atuadores”. AIMA é um acrônimo para “*Artificial Intelligence: a Modern Approach*”, um livro de sucesso que foi usado em mais de 200 universidades e faculdades em 1995. Os autores estavam interessados em programas agentes incorporados com técnicas de inteligência artificial (IA). Claramente, a definição AIMA depende do que entendemos como meio, e do que sensores e atuadores são. Se definirmos o meio como qualquer coisa que fornece uma entrada de dados e recebe uma saída de dados, onde os sensores estão ligados à entrada de dados e os atuadores à saída de dados, todo programa é um agente. Portanto, se desejarmos chegar a uma diferenciação entre agentes e programas, deveremos então restringir pelo menos algumas das noções de meio, atuadores e sensores.

O Agente de Maes (Maes, 1995): “Agentes autônomos são sistemas computacionais que vivem em algum meio dinâmico complexo, sente e atua autonomamente neste meio, e fazendo isto atinge uma série de objetivos e tarefas para as quais foi designado”. Pattie Maes, do Media Lab do Massachusetts Institute of Technology, é uma das pioneiras da pesquisa em agentes. Ela acrescentou um elemento crucial à definição de agente: “agentes devem agir autonomamente para atingir uma série de objetivos e tarefas”. Além disso, os meios foram restritos a complexos e dinâmicos. Porém, a partir destas definições, não fica claro se um programa comum para folha de pagamento, por exemplo, pode ser considerado como um agente ou não.

O Agente KidSim (Smith et al., 1994): “Vamos definir um agente como um *software* persistente dedicado a um propósito específico. ‘Persistente’ distingue um agente de uma sub-rotina; agentes têm a sua própria idéia sobre como atingir certas tarefas. ‘Propósito específico’ distingue agentes de aplicativos multifuncionais; agentes são tipicamente muito menores”. O conceito de persistência é uma nova e importante adição. Apesar de muitos agentes serem de “propósito específico”, para alguns autores (Franklin e Graesser, 1996) esta não é uma característica essencial para os agentes.

O Agente de Hayes-Roth (Hayes-Roth, 1995): “Agentes inteligentes desempenham continuamente três funções: percepção das condições dinâmicas do ambiente; atuação nas condições do ambiente; e raciocínio para interpretar as percepções, resolver problemas, fazer inferências e determinar ações”. Bárbara Hayes-Roth do Laboratório de Sistemas de Conhecimento de Stanford insiste que os agentes devem raciocinar durante o processo de atuação. Se o raciocínio for interpretado amplamente, a arquitetura do agente permitirá ações reflexivas, assim como ações planejadas.

O Agente da IBM (IBM, 1997): “Agentes inteligentes são programas que produzem um conjunto de operações em nome de um usuário ou outro programa com algum grau de independência ou autonomia, e assim, utiliza algum conhecimento ou representação dos objetivos ou desejos do usuário”. Esta definição encontrada no artigo de Estratégias Inteligentes para Agentes da IBM, apresenta um agente inteligente como atuador para um terceiro, com autoridade dada por este. Um típico exemplo apresentado é um agente de coleta de informações, apesar do artigo apresentar oito possíveis aplicativos.

O Agente de Wooldridge & Jennings (Wooldridge e Jennings, 1995): “Um agente consiste em um *hardware* ou (mais usualmente) um programa que possui as seguintes propriedades:

- Autonomia: agentes operam sem a intervenção direta de humanos ou outros, e possuem algum tipo de controle sobre as suas ações e estados internos;
- Habilidade Social: agentes interagem com outros agentes (e possivelmente humanos) através de algum tipo de linguagem para comunicação de agentes;
- Reatividade: agentes percebem seus ambientes, (que podem ser o mundo físico, a interface gráfica com usuário, um conjunto de outros agentes, a Internet, ou talvez todos estes combinados), e respondem prontamente a mudanças que nestes possam ocorrer;
- Pró-atividade: agentes simplesmente não agem em resposta ao ambiente, eles são capazes de exibir um comportamento orientado a objetivos através da tomada de iniciativa. ”

A definição de Wooldridge e Jennings, em adição à autonomia, sensoria-mento e atuação, permite uma grande, porém finita, gama de meios. Eles ainda acrescentam a necessidade de comunicação.

O Agente SodaBot (Coen, 2001) : “Programas agentes são programas que se envolvem em diálogos e negociam e coordenam a transferência de informação”. Soda-Bot é um ambiente em desenvolvimento para programas agentes sendo construído no Laboratório de IA do MIT por Michael Coen. Destaca-se nesta definição a quase nula interseção entre ela e as sete anteriores. “Quase nula” pois negociação, por exemplo, exige tanto percepção quanto atuação, bem como diálogo necessita de comunicação. Ainda assim esta definição é vastamente diferente das outras, tendo-se assim a impressão que todos os programas padrões não se encaixam nesta definição.

Foner exige muito mais do que foi citado anteriormente de um agente (Foner, 1993). Seus agentes colaboram com outros agentes para melhorar a execução das tarefas do usuário. Isto demanda, em adição à autonomia, que o agente dialogue com o usuário e seja confiável.

O Agente de Brustoloni (Brustoloni, 1991) é definido como: “Agentes autô-nomos são sistemas possuidores de ações autônomas e propositais dentro do mundo real”. O agente de Brustoloni, diferentemente dos anteriores, deve viver e agir no “mun-

do real”. Ele também insiste que seus agentes devem ser “reativos; isto é, são capazes de responder a estímulos externos e assíncronos”.

Como estas definições deixam claro, não existe um acordo geral do que é exatamente constituído um agente, ou no que eles diferem de programas normais. A própria lista de e-mail de *softwares* agentes na Internet fornece um FAQ (*Frequently Asked Questions*) que diz, “Este FAQ não tentará fornecer uma definição final sobre programas agentes” (The FAQ Agent, 1997).

2.2 A Essência dos Agentes

Como bastante evidenciado na seção anterior, é muito difícil dar uma definição formal para agentes. Russel e Norvig (Russel e Norvig, 1995) acrescentam a seguinte explicação: “A noção de um agente deve ser encarada como uma ferramenta para a análise de sistemas, não como uma absoluta caracterização que divide o mundo em agentes e não-agentes”. O único conceito que determina limites absolutos são os conceitos matemáticos, e eles apenas obtêm sucesso porque são livres de conteúdo. Agentes “vivem” no mundo real (ou em algum outro mundo), e os conceitos existentes no mundo real levam a categorias difusas.

Apesar de não existir uma definição universalmente aceita de agentes, decidimos por adotar uma definição abrangente, baseada em (Garcia e Sichman, 2003) apud (Ferber e Gasser, 1991): “Um agente é uma entidade real ou virtual, capaz de agir num ambiente, de se comunicar com outros agentes, que é movida por um conjunto de inclinações (sejam objetivos individuais a atingir ou uma função de satisfação a otimizar), que possui recursos próprios, que é capaz de perceber seu ambiente, que dispõe (eventualmente) de uma representação parcial deste ambiente, que possui competência e oferece serviços, e cujo comportamento tende a atingir seus objetivos utilizando as competências e os recursos que dispõe, levando em conta os resultados de suas funções de percepção e comunicação, bem como suas representações internas.”

Essa definição pode ser encarada como integradora de todas as técnicas anteriormente citadas.

2.3 Classificações de Agentes

A variedade de definições discutidas anteriormente envolve um conjunto de propriedades dos agentes. Através da definição pouco restritiva de agentes autônomos,

estas propriedades podem ajudar a classificar os agentes em categorias. A tabela seguinte lista muitas das propriedades mencionadas anteriormente.

Tabela 1 - Classificações dos Agentes

Propriedade	Outros Nomes	Significado
Reatividade	Sensoriamento e atuação	Responde prontamente a mudanças no meio
Autonomia		Possui controle sob suas ações
Orientação a objetivos	Pró-atividade	Não age simplesmente em resposta ao ambiente
Continuidade temporal		É um processo contínuo ao longo do tempo
Inteligência	Adaptatividade	Muda o seu comportamento baseado em experiências anteriores
Mobilidade		Capaz de se transportar de uma máquina para outra
Flexibilidade		Suas ações não são predeterminadas

Todo agente, pela definição, satisfaz as primeiras quatro propriedades. Acrescentar outras propriedades aos agentes pode gerar classes potencialmente utilizáveis de agentes, como por exemplo, agentes móveis inteligentes. Portanto, uma classificação hierárquica baseada na inclusão de conjuntos ocorre naturalmente. Agentes móveis inteligentes são, portanto, uma subclasse de agentes móveis.

Existem em última instância, outros possíveis esquemas de classificação. Programas agentes podem ser classificados de acordo com as tarefas que eles desempenham, por exemplo, agentes coletores de informação ou agentes filtradores de *e-mail*. Os agentes podem também ser classificados de acordo com a sua estrutura de controle. Eles ainda podem ser classificados pelo alcance e sensibilidade dos seus sensores, pela variedade e eficiência de suas ações, ou por quantos estados internos eles possuem.

2.4 A Estrutura dos Agentes para Proteção de Linhas de Transmissão

Conforme encontrado na literatura, os primeiros pesquisadores a proporem o uso de agentes para proteção de SEPs foram (Tomita et al., 1998). Neste artigo, os autores propõem o conceito de “relé agente”. Estes relés são capazes de realizar a proteção cooperativa de um SEP, baseados em equipamentos distribuídos combinados com uma rede de comunicação. Os autores apontam que o uso de relés agentes proporciona uma menor área isolada para situações de falta, assegurando uma alta confiabilidade com uma quantidade menor de *hardware* redundante que os sistemas de proteção convencionais. Este artigo revelou-se de grande importância para este trabalho, sendo sua maior fonte inspiradora. Porém, Tomita não realiza nenhuma simulação computacional envolvendo agentes, SEP e rede de comunicação. Ele restringe-se apenas a propor os possíveis tipos de agentes, e suas interações com o SEP, em conjunto com algumas estratégias para proteção.

Os agentes para proteção de LTs propostos neste trabalho baseiam-se em agentes geograficamente distribuídos embarcados em IEDs (*Intelligent Electronic Devices*). Este método aprimora os componentes tradicionais do sistema levando em conta o uso de informações remotas. Com o objetivo de fazer esses sistemas distribuídos funcionarem efetivamente, os agentes devem ser capazes de interagir autonomamente uns com os outros.

Os agentes desenvolvidos durante este trabalho foram divididos em 3 categorias:

- Agentes Primários;
- Agentes de Retaguarda;
- Agentes de Carga.

Os agentes primários são os agentes responsáveis pela proteção primária das LTs do SEP, isto é, uma vez detectada uma falha dentro da sua zona de proteção, estes agentes irão eliminá-la o mais rápido possível. Estes agentes comunicam-se entre si para a realização desta tarefa, e uma vez confirmada a presença de uma falta, estes agentes acionam seus respectivos disjuntores para eliminação da menor porção do sistema.

Os agentes de retaguarda são responsáveis pela proteção de retaguarda das LTs, isto é, caso exista falha na proteção primária, estes agentes percebem que os agentes primários falharam por algum motivo, e acionam seus respectivos disjuntores, eliminando uma porção maior do sistema. Para atingir seus objetivos, os agentes de retaguarda recebem informações provenientes dos agentes de carga e de outros agentes de retaguarda. Uma vez detectada a presença de falta, os agentes de retaguarda comunicam todos os agentes primários contidos dentro da sua área de proteção sobre o defeito em questão.

Os agentes de carga são os agentes mais simples deste esquema. Eles são responsáveis apenas por prover aos agentes de retaguarda informações necessárias ao processo de decisão destes agentes.

A relação entre as três categorias de agentes pode ser visualizada na Figura 4. Neste esquema as setas nos indicam os possíveis fluxos de comunicação. Conforme já exposto anteriormente, os agentes primários comunicam-se apenas entre si e com os disjuntores, enquanto os agentes de retaguarda recebem informações dos agentes de carga, comunicam-se entre si, com os agentes primários e com os disjuntores. Os agentes de carga por sua vez, apenas enviam mensagens aos agentes de retaguarda.

Figura 4 – Relação entre os diferentes agentes

Esquemáticamente, todos os agentes podem ser resumidos pela Figura 5. Todos possuem em suas interfaces sensores que coletam informações relevantes aos seus algoritmos de proteção e controle tais como tensão e corrente locais, e possuem acionadores através dos quais acionam seus respectivos disjuntores. Internamente os

agentes são constituídos por rotinas para a comunicação inter-agentes e por algoritmos para proteção e controle (Wooldridge e Ciancarini, 2000).

Todos os agentes possuem sua própria rotina de proteção e controle convencional, mas comunicam-se com outros agentes e agem em resposta ao ambiente. Cada agente faz suas próprias decisões baseadas em informações locais e remotas. Esta flexibilidade e autonomia acrescentam confiabilidade ao sistema de proteção, pois qualquer agente pode continuar a funcionar corretamente apesar de falhas em outras partes do sistema de proteção ou do sistema de comunicação.

Figura 5 - A Estrutura dos Agentes para Proteção de LTs

Aspectos como os diferentes tipos de mensagens trocadas pelos agentes, a estrutura da rede de comunicação, os algoritmos para detecção e coordenação, assim como a própria localização dos agentes dentro do SEP, serão oportunamente introduzidos durante o desenvolvimento deste trabalho.

2.5 Resumo

Este capítulo procurou mostrar algumas definições de agentes e tenta convergir, embora não seja uma tarefa fácil, para a apresentação da essência dos agentes e sua classificação. Como finalização, apresentamos o princípio de funcionamento e relacionamento dos agentes para proteção de LTs. Este esquema apresenta as diferentes categorias de agentes desenvolvidos, assim como o inter-relacionamento entre esses agentes. Para os dois próximos capítulos, reservamos a apresentação dos sistemas de

comunicação em geral e suas utilizações em sistemas de potência. Logo a seguir, apresentamos uma visão geral da utilização de intranets corporativas, principalmente levando-se em conta o principal escopo deste trabalho: o seu uso na proteção de sistemas elétricos.

Capítulo 3

Aplicação de Sistemas de Comunicação em Sistemas Elétricos de Potência

3.1 Introdução

Ao longo dos últimos anos temos observado uma revolução dentro da área de sistemas de comunicação. Telefonia, sistemas de comunicação via satélite e o surgimento da própria Internet são alguns exemplos desta revolução. Todas estas tecnologias sofreram ao longo da última década um rápido aprimoramento, e conseqüentemente, um grande barateamento em seu *hardware* e *software*. Observando estes fatos, torna-se claro o alto potencial de utilização destas tecnologias nos mais diversos campos, tendo em vista a grande quantidade de informação e controle que os sistemas de comunicação podem nos trazer. Podemos citar como exemplo de utilização destas tecnologias, o uso computadores de bolso tipo PDA (*Personal Desktop Assistant*) para agendamento de reuniões e leitura de *e-mails*, sistemas de comunicação para controle de máquinas em chão de fábrica através do uso de VPNs (*Virtual Private Networks*), sistemas de localização e condução para veículos através de GPS (*Global Positioning System*), sistemas de segurança residencial via Internet, etc.

Dentro desta perspectiva percebemos que os sistemas de potência se apresentam como um ramo altamente beneficiado através do uso de tais tecnologias, devido fundamentalmente a capacidade de controle e monitoramento que os sistemas de comunicação podem trazer às suas mais diversas áreas. A utilização de protocolos já existentes como TCP (*Transmission Control Protocol*) ou UDP (*User Datagram Protocol*) em cima de redes IP (*Internet Protocol*) apresenta-se como alternativa real devido à larga utilização destes na Internet. Somando-se a este fato, destacamos que já existem produtos em fase avançada de desenvolvimento utilizando tecnologias tipo Internet para sistemas elétricos de potência (Sekiguchi, 2000b), (Sekiguchi, 2000a).

A partir então desta constatação, pretendemos apontar os principais aspectos envolvidos, tanto na utilização de sistemas tradicionais, quanto em sistemas baseados em Intranets para a comunicação em sistemas de potência. Inicialmente apresentaremos os sistemas tradicionais utilizados para a comunicação de dados em sistemas de proteção, destacando os meios físicos utilizados para estas soluções. Posteriormente, no próximo capítulo, introduziremos os conceitos relativos ao uso de redes LANs e WANs para comunicação em / entre subestações. Finalmente apresentaremos o conceito de sistemas de proteção baseados em redes Intranets, técnica que representa e introduz um novo paradigma às técnicas de proteção para sistemas de potência.

3.2 Meios Físicos Utilizados para Comunicação em Sistemas de Proteção

O meio físico consiste numa parte fundamental de um sistema de comunicação para proteção de linhas de transmissão. Ele é necessário para que ocorra a transmissão de dados a partir de um terminal da linha a outro, possibilitando assim a detecção da falta e conseqüente coordenação do sistema de proteção. Um processo semelhante também é feito na direção oposta, permitindo a determinação da presença de uma falta interna.

As exigências para comunicação entre relés são bem mais severas que para transmissão de dados ou voz. Na transmissão de dados ou voz a inoperância do canal de comunicação por alguns instantes pode ser compensada pela retransmissão dos dados perdidos, porém este é um fato inaceitável para a comunicação entre relés. Durante o instante de uma falta, deve-se garantir o funcionamento correto do meio de comunicação, pois interpretações incorretas feitas pelos relés podem levar a aberturas indesejadas ou à inexistência de sinal de abertura.

Como principais meios físicos para relés de proteção podemos destacar:

- Fio piloto
- Ondas Portadoras
- Sinais de Áudio
- Microondas
- Fibras Ópticas

A tecnologia da comunicação já é empregada há muitas décadas pelos sistemas de proteção. Dentro deste cenário, podemos afirmar que muitos SEPs possuem pelo menos um ou mais destes meios físicos, sendo possível que alguns possuam todos os meios relacionados.

3.2.1 Escolha do Meio Físico

A Figura 6 fornece um esboço do custo relativo dos diferentes meios físicos (Elmore, 2000a). O custo do canal tipo fio piloto cresce linearmente com a distância, mas é sem dúvida o canal mais barato para pequenas distâncias. Um único canal de microondas é dificilmente justificável, mas como o diagrama mostra, o custo incremental por canais adicionais é pequeno. Pelo fato das microondas serem um sistema restringido pela linha de visada, e as condições do terreno limitarem a distância na qual a comunicação pode ser feita confiavelmente sem a necessidade de repetidores, este tipo de canal apresenta saltos em seu custo em suas distâncias limitantes. Os sistemas de ondas portadoras PLC (*Power Line Carrier*) (Figura 7), também denominados como OPLAT (Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão), são os sistemas mais utilizados para comunicação entre relés de proteção para LTs. Estes sistemas aplicados às linhas de transmissão não são limitados pela distância em geral, mas apresentam um custo considerável em seus terminais. Um meio físico importante não mostrado na Figura 6 são as fibras ópticas. Basicamente, elas apresentam custos similares ao custo do canal tipo fio piloto, em relação ao crescimento linear, porém apresentam um custo por quilômetro consideravelmente maior.

Figura 6 - Custos relativos dos diferentes tipos de canais

A seguir damos um breve detalhamento das tecnologias apresentadas.

Fio Piloto

Condutores metálicos têm sido utilizados largamente e com sucesso ao longo dos anos pelos relés diferenciais de corrente. Apesar de completamente aplicáveis à proteção de linhas curtas, as suas limitações são grandes. A frequência de transmissão é 60 Hz, não permitindo nenhuma possibilidade de filtragem de ruído. Sob condições normais, o circuito deve permitir a passagem de sinais CC, e está sujeito à altas tensões modais para casos que eles devem ignorar (faltas externas) (Elmore, 2000a). Apesar destas dificuldades, virtualmente todas as companhias possuem relés diferenciais utilizando fios piloto.

Ondas Portadoras

A utilização das LTs como próprio meio de comunicação para transmissão de informações é a maneira mais comum utilizada pelas companhias de transmissão para transmissões de média e longa distância (20 a 500 km). As LTs apresentam baixa atenuação para frequências portadoras na faixa de 20 a 500 kHz e por isso são uma boa escolha como meio físico para comunicação. Um canal PLC operando a 80 kHz ou menos pode alcançar até 800 km, distância inigualável por outros meios de comunicação comumente disponíveis às companhias de transmissão (fio piloto, rádio ou microondas) sem o uso de repetidores ou estações repetidoras. Os sistemas OPLAT são virtualmente utilizados por todos os países do mundo para a transmissão de voz, dados e sinais de proteção e se tornaram um sistema importante para o gerenciamento e segurança dos SEPs (Camara, 2003).

Os sistemas OPLAT são constituídos pelas próprias LTs, bobinas de bloqueio, caixa de sintonia e capacitores de acoplamento. As bobinas de bloqueio devem ser capazes de conduzir a corrente máxima da linha de transmissão sem apresentar um aquecimento excessivo, devem possuir indutância e capacitância apropriadas e devem agüentar a corrente máxima de curto-circuito. Elas são sustentadas nas linhas de transmissão, e não necessitam de uma estrutura de isolamento independente. O capacitor de acoplamento deve possuir uma capacitância apropriada para o acoplamento do sinal da portadora no circuito de alta-tensão e deve ser totalmente isolado para suportar as tensões de regime e transitórias nas quais o sistema de potência está sujeito. Normalmente

existem centelhadores nas caixas de sintonia, e também na base dos capacitores de acoplamento, que irão centelhar na presença de tensões excessivas produzidas por raios, flutuações da tensão do sistema ou faltas. Uma vigilância especial deve ser tomada em relação ao tamanho do *gap*, pois o centelhamento causa um curto na onda portadora, e ele pode ocorrer no momento onde ela é mais necessária. Os principais tipos de modulação utilizados por esta tecnologia são a sinalização *On-Off* e Ajuste por Variação da Frequência (FSK) (Elmore, 2000a). Um exemplo típico de um sistema de comunicação através de ondas portadoras pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Diagrama esquemático de um sistema de comunicação através de ondas portadoras

Como principais vantagens deste sistema podemos destacar:

- Alta rigidez mecânica das LTs;
- As LTs e os equipamentos terminais pertencem e estão exclusivamente sob o controle das concessionárias de transmissão;
- Atenuação baixa e relativamente constante sob condições atmosféricas normais;

- A manutenção do sistema é feita exclusivamente dentro do ambiente da subestação, evitando-se assim custos adicionais devido ao deslocamento de pessoal técnico a um repetidor distante da subestação.

Como desvantagem desta tecnologia podemos citar sua susceptibilidade a ruídos. Os sistemas OPLAT estão sujeitos a rajadas de ruídos de alta intensidade durante a operação de disjuntores ou seccionadoras ou a ruídos persistentes produzidos por efeito corona (Mesbah, 2003).

Em relação à adição de novos canais, o sistema OPLAT não necessita de novas bobinas de bloqueio ou capacitores de acoplamento, porém a troca da caixa de sintonia e a adição de novos multiplexadores / demultiplexadores são necessárias. Maiores informações sobre este tópico podem ser encontradas em (Elmore, 2000a).

Sinais de Áudio

Como o nome implica, os sinais de áudio são as frequências pertencentes à banda de frequência audível pelo ouvido humano. Estes canais de baixa frequência podem ser usados:

- Independentemente em um par de fios piloto;
- Em um canal de voz em ondas portadoras;
- Em um canal de voz em microondas.

Este sistema utiliza predominantemente a variação de frequência. Em geral, o sinal é operado em sua frequência guarda e é variado para a frequência de abertura quando alguma ação é exigida. Um uso importante de sinais de áudio no contexto de relés de proteção é o uso para transferência de *trip* (abertura), com o objetivo de se operar um disjuntor remoto para extinção de uma falta. Este também pode ser utilizado em sistemas de proteção piloto em linhas de transmissão.

Microondas

A região compreendida entre 1 e 30 GHz é considerada a região de microondas. A transmissão de microondas é limitada por uma linha de visada, possuindo um alcance de apenas 30-80 km, dependendo do terreno e sendo influenciada em longos

caminhos pela curvatura da Terra. Similar à luz, a energia da microonda pode ser focada através do uso de antenas parabólicas. O objetivo da microonda é a comunicação com uma antena receptora. Quando a distância excede um certo valor permitido, o uso de repetidores deve ser feito para a retransmissão do sinal.

Fibras Ópticas

Ao contrário das tecnologias anteriores, as fibras ópticas possuem as seguintes vantagens:

- Possuem uma alta largura de banda, permitindo a transmissão de uma alta quantidade de informação em uma única fibra;
- As fibras ópticas são 100% dielétricas, não sendo afetadas por *loops* para a terra, surtos indutivos ou descargas atmosféricas – fatores comuns na geração de ruídos nos sistemas anteriores. Esta característica é particularmente importante, pois sistemas elétricos de potência possuem um ambiente altamente eletromagnético;
- As fibras ópticas são pequenas e leves;
- Elas apresentam perdas muito pequenas, fator que permite a utilização de grandes vãos entre os repetidores, diminuindo os custos de manutenção.

O uso de uma fibra óptica dedicada para uma função única é ocasionalmente usada, sendo uma maneira inapropriada de uso de um recurso tão caro. As fibras ópticas apresentam um espectro largo de frequências, e ela é costumeiramente utilizada completamente com o uso de múltiplos canais. Este arranjo envolve o uso de modulação PCM (*Pulse Code Modulation*), apresentando 24 canais para a configuração tipo T1, sendo apenas 1 canal necessário para cada direção de um sistema de relés piloto (The Electricity Training Association, 1995).

Fica claro pelas características apresentadas que as fibras ópticas oferecem grandes vantagens como meio físico para comunicação, sendo um meio altamente conveniente para os SEPs. Maiores informações sobre o princípio básico das fibras ópticas podem ser encontradas no Apêndice B.

3.3 Aplicações de Fibras Ópticas em Sistemas de Potência

Até agora discutimos brevemente alguns aspectos físicos associados às fibras ópticas. A próxima seção discute como os vários fatores pertinentes as fibras ópticas podem ser levados em conta para o fornecimento de um sistema de comunicação capaz de suprir as exigências de um sistema de potência. Neste contexto existem três áreas principais: comunicação entre subestações, comunicação dentro da subestação e comunicação entre a subestação e uma rede externa.

3.3.1 Comunicação entre Subestações

A comunicação entre subestações normalmente é constituída por canais de dados operacionais e administrativos em adição aos sinais de proteção dos relés. As distâncias entre as subestações podem variar de alguns quilômetros a centenas de quilômetros e a largura de banda de algumas centenas de kHz a 1 MHz. Alguns dos fatores importantes na determinação de um sistema de comunicação baseado em fibras ópticas factível, particularmente sob um ponto de vista econômico, são as distâncias de transmissão, a capacidade de transmissão e o uso de repetidores ao longo da linha. Outros aspectos que podem ainda ser adicionados nesta lista são a perda da fibra, a potência média necessária na fonte óptica e a sensibilidade do receptor. As fontes ópticas normalmente utilizadas são LEDs ou lasers enquanto os detectores são os fotodiodos tipo Avalanche ou detectores tipo PIN. Como regra geral, os LEDs são utilizados com fibras multimodo do tipo índice gradual enquanto os lasers são utilizados com fibras monomodo.

Tipos de Cabos Utilizados para Sistemas de Potência

- **Cabo Óptico Externamente Anexado a um Cabo Aéreo:** Vários sistemas têm sido desenvolvidos para anexar cabos ópticos em condutores aéreos. Um destes sistemas consiste no enrolamento de um cabo óptico ao longo de um condutor aéreo. Este método possui como vantagem o baixo custo de instalação. Outra vantagem que podemos citar é o seu uso tanto em sistemas de distribuição de baixa tensão como também em linhas de transmissão de alta tensão. Este sistema apresenta como desvantagem a sua vulnerabilidade física a danos mecânicos.

- **Cabo Condutor-Óptico para Sistemas de Transmissão:** Este tipo de cabo é constituído tanto por fibras ópticas quanto por cabos condutores. Ele é basicamente um cabo óptico, usualmente coberto por um tubo metálico para proteção, envolvido externamente por condutores elétricos que podem ser utilizados tanto como condutor de fase como cabo pára-raio. Esses cabos possuem as mesmas características que os cabos aéreos convencionais em relação a resistência, peso por unidade de comprimento, diâmetro, condutância e comportamento em relação a mudanças na temperatura e força do vento. Um exemplo comumente encontrado atualmente são os cabos OPGW (*Optical Ground Wire*) (Figura 8a e Figura 8b), que são cabos pára-raios, que possuem em seu interior fibras ópticas.
- **Cabos Ópticos Aéreos:** Este tipo de cabo consiste basicamente em um cabo projetado para ser colocado diretamente nos suportes das linhas de transmissão. Como este tipo de cabo é colocado nos mesmos suportes dos cabos aéreos, ele deve atender aos requerimentos mecânicos necessários de um condutor aéreo tradicional.

Figura 8 - Cabo OPGW – (a) Estrutura, (b) Ilustração

3.3.2 Comunicação dentro da Subestação

As fibras ópticas podem ser utilizadas dentro do ambiente de uma subestação como meio físico para comunicação. Neste tipo de aplicação, as distâncias de transmissão são geralmente menores que 1 km e as fibras são utilizadas basicamente pelas suas propriedades dielétricas. A transmissão de dados dentro de uma subestação é uma tarefa complicada devido alta quantidade de ruídos eletromagnéticos, e as fibras ópticas apresentam-se como um meio físico favorável a este tipo de ambiente. Dentro do ambiente de uma subestação, as fibras ópticas podem ser utilizadas para a aquisição de dados para sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition System*) e como infra-estrutura para uma LAN (*Local Area Network*).

3.3.3 Comunicação entre uma Subestação e uma Rede Externa

Este tipo de comunicação pode ser visto como pequenos enlaces de comunicação que interconectam uma sala de comunicação presente em uma subestação à uma

rede de comunicação externa que pode ser privada ou pública. Estes enlaces possuem normalmente de 1 a 5 km de distância e as fibras são utilizadas principalmente devido a sua isolamento contra altas tensões e a picos de corrente. Em qualquer caso, o uso de fibras elimina o problema de diferença de potencial existente entre a subestação e o terminal da rede externa.

3.4 Resumo

Neste capítulo apresentamos os diversos meio-físicos utilizados para comunicação nos SEPs. Um grande destaque foi dado às fibras ópticas devido as grandes vantagens econômicas e em termos de comunicação apresentadas por esse meio e sua crescente utilização e implantação pelas empresas de energia atualmente. No próximo capítulo abordaremos os principais tipos de aplicativos utilizados pelos SEPs baseados em redes de comunicação.

ESTUDO10.STB

Perda em $t=0,30$ seg: LT 500kV B. Despacho-Neves C1
LT 138kV S. Gonçalo do Pará-Pará de Minas
LT 138kV S. Gonçalo do Pará-Itaúna
LT 138kV Barreiro-Igarapé
LT 138kV Barreiro-Regap
UTE Ibiritermo (UG1 gás = 146MW)

Perda em $t=2,0$ seg: LT 345kV Barreiro-Neves
LT 345kV Neves-T. Marias

Perda em $t=4,0$ seg: LT 500kV O. Preto-S. Gonçalo do Pará

Capítulo 4

Utilização de Redes de Comunicação para Operação e Controle de SEPs

4.1 Introdução

A operação de um SEP inclui um grande número de funções as quais, no passado, eram realizadas por equipamentos e sistemas independentes envolvendo equipes de manutenção diferentes. Como principais funções podemos destacar:

- Controle de frequência e tensão;
- Controle de dispositivos para chaveamento;
- Proteção de equipamentos de alta tensão;
- Indicação de estado e registro de eventos;
- Monitoramento do sistema e de alarmes;
- Localização de faltas e registro de perturbações;
- Auto-religamento e restauração automática do sistema;
- Sincronização;
- Despacho e gerenciamento de carga.

Em adição as funções denotadas, dados estatísticos também são coletados para diferentes propósitos, destacando-se o planejamento e a programação da operação e manutenção do sistema, assim como suporte à tomada de decisões em relação à modificação e ampliação do próprio sistema.

Neste cenário, o planejamento da operação e do controle do sistema é dirigido por centros regionais ou nacionais de operação e controle. Juntas, estas funções podem ser descritas como o gerenciamento do sistema de potência, destacado na Figura 9, e podem ser divididas nos seguintes sistemas (The Electricity Training Association, 1995):

- SMS – Sistema de Monitoramento da Subestação
- SGE – Sistema para Gerenciamento da Energia
- SGD – Sistema para Gerenciamento da Distribuição
- SGC – Sistema para Gerenciamento da Carga
- SCP – Sistema de Controle da Planta
- SCS – Sistema de Controle da Subestação
- SCADA – Sistema de Aquisição de Dados e Controle Supervisório

Figura 9 - Gerenciamento do Sistema de Potência

Através da coordenação destes sistemas, o projeto, operação e manutenção podem ser conduzidos mais eficiente e economicamente do que no passado. No entanto, deve-se ressaltar a importância da estruturação destes sistemas, pois uma incorreta estruturação destes pode levar ao não atendimento dos requisitos básicos para operação do sistema.

4.2 Sistemas de Controle para Subestações Convencionais (The Electricity Training Association, 1995)

4.2.1 Funções e Arquitetura

Equipamentos para controle, monitoramento e proteção convencionais têm sido tradicionalmente projetados a partir de uma combinação de dispositivos estáticos e eletromecânicos, sendo constituídos por um grande número de subsistemas. Controle de dispositivos para chaveamento, intertravamento, alarmes, registro de perturbações, proteção, medição e contadores são alguns destes subsistemas, sendo todos ligados através de fios. Esta arquitetura de subestação foi inicialmente concebida para subestações controladas por pessoal técnico localizado na própria subestação. Mesmo com a introdução de computadores e sistemas SCADA, a arquitetura básica utilizada nas subestações continuou a mesma, pois as subestações comunicavam-se com os centros de controle regionais (ou nacionais) através de unidades terminais remotas (UTR).

Como exemplo de controle convencional, apresentamos a subestação da Figura 10. Neste exemplo, a posição de cada disjuntor e seccionadora é monitorada. Nela, a operação de cada disjuntor ou seccionadora, tanto dentro da subestação quanto remotamente, depende da checagem da posição de todos os outros dispositivos de chaveamento. Se, por exemplo, uma seccionadora é aberta durante uma situação de carga alta, uma falta severa pode ocorrer.

Para prevenir-se de uma situação como essa, o uso de um sistema de intertravamento deve ser usado. A partir desta constatação, os seguintes critérios devem ser obedecidos para a abertura da seccionadora S3A:

Tabela 2 - Critérios obedecidos para a abertura da seccionadora S3A

Figura	Dispositivo	Posição	
10(a)	D3	Desligado	E
	S3B	Desligada	E
10(b)	S2A	Ligada	E
	S2B	Ligada	E
	D2	Ligado	E
	S3B	Ligada	

Este tipo de operação em subestações é normalmente implementada com relés auxiliares. Para a subestação da Figura 10 existem apenas 4 disjuntores; é fácil perceber que este tipo de lógica complica-se para subestações maiores. Se, por exemplo, outras condições como tensão, checagem da sincronia e estado dos disjuntores forem incluídas, a lógica de controle exigirá um número ainda maior de relés auxiliares e contatos. Este também é o caso para controles sequenciais tais como transferência de carga e restauração automática do sistema após uma falta.

Figura 10 - (a) Intertravamento necessário para abertura da seccionadora S3A com o circuito L1 sob carga. (b) Intertravamento necessário para abertura da seccionadora S3A com o circuito L1 sob carga

4.2.2 Desvantagens do Uso da Tecnologia Tradicional

A tecnologia tradicional para o monitoramento e controle de subestações foi brevemente descrita na seção anterior. Como pôde ser constatado, o uso da tecnologia convencional para grandes subestações ou subestações desassistidas resultará em um grande número de componentes tais como relés auxiliares e muitos quilômetros de fios. Em geral, esta tecnologia é cara e desperdiça espaço, fatores que ocasionam a diminuição da segurança deste tipo de instalação. Porém a maior desvantagem da tecnologia tradicional aparece durante situações de manutenção ou em situações de reestruturação / ampliação do próprio sistema de controle. Se uma parte do sistema é desligada para manutenção, ele pode afetar outras partes do sistema, a menos que procedimentos rígidos sejam adotados. Como outro exemplo, podemos citar o rastreamento de um defeito, situação que pode levar à uma longa interrupção devido ao grande número de cabos presentes, especialmente em locais onde os cabos não possuem marcações corretas. As principais desvantagens deste tipo de sistema são:

- Garantia da Qualidade: Em sistemas convencionais de controle o uso de uma grande quantidade de componentes e fios é necessário para a realização de funções simples e complexas. O projeto destes sistemas tem de ser feito individualmente para cada subestação e portanto, soluções padrões nem sempre são cabíveis. Além disso, o uso de redundâncias neste tipo projeto é pequeno, acarretando em uma baixa capacidade de oposição a defeitos, pois a falha de apenas um componente pode afetar todo sistema;
- Instalação e Comissionamento: É comprovada através da experiência da maioria empresas que a maioria das falhas nos sistemas de controle e proteção são causados por enganos humanos durante o processo de engenharia, cabeamento, instalação e comissionamento do sistema. Alguns destes erros podem ser detectados durante o comissionamento, mas outros não ficam aparentes até o acontecimento de uma falta;
- Manutenção e Teste: A manutenção de qualquer parte do sistema normalmente necessita da mudança do esquema de ligação dos componentes do sistema de controle. Por exemplo, para a manutenção

de um disjuntor, o disjuntor deve ser desligado de qualquer sistema de registro de eventos ou alarme assim como de qualquer lógica sequencial. Como pode ser observado, é praticamente impossível testar o sistema completo, pois este envolve uma grande quantidade de componentes;

- Expansibilidade: Modificações em uma subestação existente, por exemplo a adição de uma nova linha de transmissão, são difíceis pois uma grande parte da lógica de controle da instalação tem de ser modificada, ocasionando em grandes recabeamentos. Este fato, novamente, corre o risco de trazer novos erros ao sistema de controle, além de consumir tempo e possivelmente exigir que parte da subestação seja tirada de serviço.

A Figura 11 e Figura 12 mostram uma subestação convencional com subsistemas separados para os sistemas de proteção e controle. Através destas figuras podemos notar que os sistemas de controle e proteção possuem funções similares e redundantes. Através da coordenação destas funções, é possível manter os sistemas de proteção e controle independentes mas, ao mesmo tempo, reduzir a quantidade de cabeamento, como denotado na Figura 13. Esta coordenação pode, concomitantemente, diminuir o espaço necessário e aumentar a confiabilidade e disponibilidade do sistema de proteção e controle.

Figura 11 - Requerimentos para um sistema de proteção convencional

Figura 12 - Requerimentos para um sistema de controle convencional

Figura 13 - Sistema de proteção e controle coordenado

4.3 Sistemas de Controle Coordenados para Subestações (The Electricity Training Association, 1995)

4.3.1 Arquitetura do Sistema

A Figura 14 mostra um exemplo de um sistema distribuído e coordenado para controle e proteção de uma subestação constituída por um sistema SCADA / SGE e um *bay*. No centro de controle uma rede local (LAN) é usada para a comunicação. Uma rede típica para este tipo de comunicação baseia-se nos padrões IEEE 802.2 e IEEE 802.3 (Ethernet), proporcionando um sistema de comunicação síncrona com velocidade de 100 Mbps em um cabo par-trançado. A comunicação entre as várias subestações pode ser feita através de uma rede WAN baseada em um canal SONET de 1,5 Mbps. Estas subestações podem incluir sistemas antigos (UTR) ou sistemas recentes (SCS). Para sistemas de transmissão e subtransmissão, uma estrutura de dois níveis é utilizada: barra de estação e barra objeto. A barra de estação usa a mesma LAN usada no centro de controle e devido ao alto nível de perturbação encontrado na estação, utiliza fibras ópticas como meio físico. Em contrapartida, a barra objeto é uma barra limitada, não excedendo normalmente mais de 10 metros, rodando comunicação assíncrona a uma velocidade de 9600 bps.

A Figura 15 mostra um exemplo constituído por uma pequena subestação. Neste exemplo não existe a necessidade de uma estação central de controle, pois ele foi concebido utilizando-se uma abordagem baseada em processamento distribuído. Nele, a LAN provê um sistema democrático sem a necessidade de um sistema mestre-escravo, transmitindo a informação entre os vários terminais de controle de *bays* (REC) continuamente. Neste sistema, um *gateway* e uma estação de trabalho podem ser conectadas independentemente à LAN. Se, por exemplo, a conexão ao *gateway* for perdida, a subestação continua a funcionar normalmente através das estações de trabalho locais. Também é possível neste tipo de configuração acessar todos os terminais REC a partir de qualquer outro terminal REC.

As funções de controle, proteção, monitoramento e medição podem ser estruturadas segundo a Figura 16. Neste cenário, o terminal de controle de *bay*, REC, manipula toda a comunicação entre o *bay* e a subestação. Ele possui todas as funções para controle, registrando também a ocorrência de eventos. Este tipo de terminal possui várias portas I/O para entrada / saída de sinais analógicos e digitais, fornecendo assim uma flexibilidade muito grande para a conexão de dispositivos convencionais ou

numéricos, assim como dispositivos de diferentes fabricantes.

Figura 14 - Sistema de proteção e controle para subestações

Num sistema SCS completo, incluindo a proteção numérica, toda a comunicação em nível de *bay* é feita através da barra objeto. Por exemplo, o terminal de linha, REL, fornece os dados de corrente, tensão, frequência e potências ativa e reativa. Além dessas indicações, dados de falta, localização, tensões, correntes, ângulos de fase são fornecidos após uma perturbação. A função de registro de perturbação fica disponível através do terminal de monitoramento, RES, que comunica o SMS no acontecimento de uma falta.

O uso desta estrutura modularizada e distribuída assegura uma capacidade muito grande de independência do sistema todo em relação à suas partes, garantindo que se uma função falhar, essa falha não se estenda para as outras funções. Se, por exemplo, um terminal RES apresentar defeito, ainda é possível obter-se dados da perturbação a partir de outros *bays*.

Figura 15 - Subestação Coordenada

Figura 16 - Estrutura modular de um sistema coordenado

4.3.2 Funcionalidades do Sistema

- Bay

Neste nível, o terminal de controle de *bay* é usado para coordenar todas as funções dentro do *bay*. Como principais funções deste tipo de terminal podemos citar:

- Aquisição de dados;
- Controle de equipamentos de alta tensão;
- Intertravamento de equipamentos de alta tensão;
- Religamento automático;
- Controle de tensão executado a partir de *taps*, reatores ou bancos de capacitores.

Neste nível os equipamentos de proteção estão separados mas podem comunicar-se com os terminais REC.

- Subestação

As estações de trabalho em conjunto ao *gateway* são os únicos equipamentos conectados neste nível. Elas são responsáveis pela substituição dos painéis de controle convencionais assim como os painéis de alarme e os registradores de eventos. Na tela das estações de trabalho uma série de displays são disponibilizados contendo informações sobre o estado da SCS. Informações típicas deste sistema são:

- Informação do *status* atual da subestação (diagrama unifilar);
- Disponibilização de relatórios;
- Informações sobre manutenções do SCS;
- Lista de alarmes e eventos.

Neste nível, a partir das estações de trabalho, as seguintes funções podem ser realizadas pelos operadores:

- Operação de equipamentos de alta tensão;
- Indicação de *status*;
- Indicação de valores medidos e checagem de limites;
- Operação de equipamentos de controle;
- Manipulação de eventos sequenciais;
- Leitura de parâmetros e configuração de relés de proteção.

4.4 Vantagens de um Sistema de Controle Coordenado

As vantagens de um sistema de controle coordenado podem ser divididas em vantagens a curto-prazo, durante a fase de engenharia e instalação, e a longo-prazo, durante a fase de operação e manutenção. As vantagens a curto-prazo são mais fáceis de quantificar se comparadas às vantagens a longo-prazo.

Antes de entrarmos em mais detalhes nesta comparação, vamos considerar alguns aspectos gerais pertinentes a este assunto. Atualmente, o uso de inteligência

distribuída através de microprocessadores que se comunicam através de fibras-ópticas e o uso de PCs são aspectos do nosso cotidiano. Com isso, o surgimento de novas tecnologias acontece todos os dias, reduzindo os custos e aumentando a velocidade destas tecnologias. Além disso, cada vez mais, encontram-se disponíveis pessoas habilitadas para lidar com este tipo de tecnologia. Neste contexto, sistemas altamente centralizados, usados largamente nos anos 1970 e 1980, já não são mais apropriados, pois os sistemas descentralizados adaptam-se mais facilmente às mudanças futuras. Adicionado a este fato, os sistemas descentralizados incorporam muito mais facilmente equipamentos de diferentes fabricantes e diferentes modelos e gerações.

Observados estes fatos, façamos então uma comparação de uma subestação convencional com uma subestação totalmente automatizada, sumariando os principais benefícios de um SCS a curto-prazo:

- Menor custo de engenharia através do uso de *softwares* padronizados;
- Menor custo de instalação devido a menor quantidade de cabos necessária e menor número de pontos de conexão;
- Menor custo de comissionamento através da utilização de módulos pré-testados;
- Menor custo de *hardware* devido à redução do número de relés auxiliares.

Os principais benefícios de um SCS a longo-prazo podem ser resumidos como:

- Menor custo na operação através do acesso remoto até o nível do *bay*;
- Maior disponibilidade do sistema devido ao menor tempo de interrupção necessário para manutenção e maior agilidade no rastreamento de faltas;
- Maior tempo de vida de equipamentos através de manutenções programadas e análise de dados estatísticos.

Por último, podemos citar a adição de novas funções e a possibilidade do uso de sistemas inteligentes ao SCS, características que são difíceis de quantificar atualmente. Com mudanças como estas, surge a questão de quanto custará se as subestações não mudarem a sua tecnologia.

O processo de implantação destas tecnologias pode ser introduzido dentro das subestações passo-a-passo, deixando de fora certas funções, ou utilizando o sistema antigo como *backup*. Porém, para obter-se o benefício total desta tecnologia, o SCS deve possuir todas as funções pertinentes à uma subestação: controle, proteção, monitoramento, (registro de perturbações e sinalização) e medição. Juntas, todas estas funções podem levar ao surgimento das subestações inteligentes e como consequência, aos sistemas de potência inteligentes.

4.5 Resumo

Neste capítulo abordamos os principais sistemas de controle e operação utilizados nos SEPs baseados em redes de comunicação. Como pode ser constatado, os SEPs atualmente encontram-se em uma fase de transição, de um passado onde os relés e as subestações realizavam processos simples de comunicação para um futuro onde todos os relés e as próprias subestações poderão se comunicar. Neste novo cenário, características como controle e proteção coordenados, compra e venda de energia baseados em dados *on-line* serão novos desafios a serem estudados e entendidos. No próximo capítulo introduziremos a aplicação de redes intranets para SEPs.

Capítulo 5

A Aplicação de Sistemas de Comunicação Baseados em Intranets em Sistemas de Potência

5.1 Introdução

Como observado anteriormente, os sistemas de comunicação convencionais utilizados nos sistemas de proteção possuem esquemas de funcionamento muito simples. Estes esquemas baseiam-se na passagem de mensagens entre relés contendo informações simples, tais como comando para abertura e *status* de relés remotos. Com isso podemos deduzir que, apesar da comunicação existente entre os relés, estes continuam trabalhando de maneira solitária (*standalone*), sendo que nenhuma tomada de decisão é feita de maneira conjunta pelos relés presentes no sistema.

Outro fato que devemos destacar dentro do universo de sistemas de comunicação é o surgimento da Internet. A rede mundial de computadores (nos moldes como é conhecida atualmente) surgiu no início da década passada, expandindo-se velozmente a partir de então, devido principalmente a necessidade crescente de comunicação entre seus usuários e ao barateamento das tecnologias empregadas para a sua implantação.

Atentos a este fato, os pesquisadores da área de sistemas de potência começaram a encarar esta nova tecnologia como uma nova maneira de se efetuar o controle e proteção dos sistemas de potência. A implantação e utilização de intranets dentro dos sistemas de potência já é alvo de inúmeras pesquisas, sendo que a definição de padrões já está em pauta em organismos como IEEE, EPRI e IEC. Mas o que é uma intranet?

5.2 Intranet – Definição

Uma intranet é basicamente uma rede privada de computadores baseada nos padrões utilizadas pela Internet. Na sua configuração mais simples, a comunicação de dados é feita internamente à intranet, sendo que nenhuma informação flui para fora

dela. Esta situação pode ser alterada com a utilização de dispositivos conhecidos como *firewalls*, possibilitando assim o tráfego seguro de informação entre uma intranet e a Internet e vice-versa.

A título de esclarecimento, apresenta-se a seguir uma breve comparação entre Internet e intranet.

Tabela 3 – Comparação entre Internet e intranet

Internet	versus	intranet
▪ Pacotes são públicos		▪ Pacotes são privados
▪ Utiliza o protocolo IP		▪ Utiliza o protocolo IP
▪ Custo distribuído		▪ Empresa arca com os custos
▪ Manutenção descentralizada (complicada)		▪ Empresa faz a manutenção
▪ Políticas de operação fracas		▪ Política de operação forte

Como já pôde ser notado, tanto intranets quanto a Internet, compartilham da mesma tecnologia e padrões. Baseada nesta idéia, apresentaremos uma breve introdução à teoria de redes de computadores.

5.3 Redes de Computadores – Uma Visão Geral (Tanenbaum, 1996a)

As primeiras redes de computadores foram projetadas baseadas em *hardware*, sendo o *software* apenas complementação desta concepção. Este conceito já não mais impera, sendo que as redes atuais são fortemente projetadas em soluções calcadas em *softwares* altamente estruturados.

Com o intuito de se diminuir a complexidade do projeto de redes, a maioria delas são organizadas em uma série de camadas ou níveis. Cada camada tem como objetivo prover uma série de serviços bem definidos para as camadas superiores, escondendo destas camadas os detalhes de como estes serviços são implementados. Tendo em vista este conceito, destacam-se dois modelos de rede: o modelo de referência OSI e o modelo de referência TCP/IP. Ambos os modelos apresentam vantagens e desvantagens, como destacado em (Tanenbaum, 1996a). Seguindo a linha de raciocínio apresentado nesta referência, apresenta-se o modelo híbrido criado pelo autor em questão:

Figura 17 - O modelo de referência híbrido

Baseado então neste modelo, apresenta-se a seguir, uma breve explicação da função e constituição de cada camada.

5.3.1 Camada Física

A camada física tem como função a transmissão de *bits* em um canal de comunicação. Os típicos problemas tratados por esta camada envolvem quantos volts devem ser utilizados para representar “1” e quantos para “0”, quantos microssegundos um *bit* dura, se é possível a transmissão de *bits* em ambas as direções. Como pode ser visto, os problemas tratados por esta camada tratam das características elétricas e mecânicas do meio a ser utilizado pelo canal de comunicação.

Exemplos típicos constituintes desta camada são:

- Cabo par-trançado: Este meio de transmissão constitui no meio mais antigo e é o mais utilizado para a transmissão de dados. Ele é constituído basicamente por dois fios de cobre encapados trançados entre si. A aplicação mais comum deste tipo de cabo situa-se na área de telefonia onde praticamente todos telefones são conectados a central telefônica por este tipo de cabo. Eles também são largamente utilizados dentro das redes de computadores através dos cabos par-trançado categoria 3 e categoria 5;
- Cabo coaxial: Os cabos coaxiais são também outro meio comumente achada na transmissão de dados. Os tipos mais comuns destes cabos são

os de 50 e 75 Ω , sendo o primeiro mais utilizado para transmissões digitais e o segundo para transmissões analógicas. Os cabos coaxiais tiveram um largo uso dentro das redes locais de computadores (LANs) na década passada, porém foram gradativamente substituídos pelos cabos tipo par trançado;

- Fibra Óptica: As fibras ópticas são certamente as mais impressionantes dentre os meios utilizados para transmissão de dados, como já enfatizado anteriormente. Elas apresentam taxas de transmissão em torno de 1 Gbps (apesar de experiências em laboratório apresentarem taxas equivalentes a 100 Gbps para distâncias curtas). As fibras ópticas são categorizadas em 2 tipos: a multimodo e a monomodo. Esta diferença refere-se ao modo como a luz se propaga dentro da fibra, como apresentado anteriormente;

- Comunicação Sem-Fio (Wireless): As ondas eletromagnéticas são também uma outra maneira de se realizar a transmissão de dados. Ondas de rádio, microondas e infravermelho constituem os principais tipos encontrados nesta categoria. Este tipo de transmissão apresenta-se como uma boa solução para casos onde existe a dificuldade de implantação de cabos ou fibras, ou a necessidade de comunicação móvel seja necessária.

5.3.2 Camada de Enlace de Dados

A camada de enlace de dados tem como função garantir para a camada de rede a correta transmissão de dados. Esta tarefa é feita através da divisão do fluxo de dados proveniente da camada de rede em quadros (*frames*), com conseqüente transmissão destes quadros para o receptor e recebimento dos quadros de confirmação (*acknowledgement frames*) devolvidos por ele. A tarefa de verificação de erro na transmissão de dados é feita por esta camada, uma vez que a camada física apenas transmite uma série de bits proveniente da camada de enlace de dados.

Como exemplos desta camada podemos citar:

- Padrão IEEE 802.3 (Ethernet): O padrão 802.3 é o padrão mais conhecido e utilizado em redes locais. Ele define os tipos de cabos e dimensões físicas máximas que estes podem apresentar para o funcio-

namento da LAN. Ele define também a codificação conhecida como *Manchester Encoding* como a maneira para codificação dos bits, e o formato e a codificação para os quadros de dados (*frames*) a serem transmitidos;

- *Padrão IEEE 802.6 (Distributed Queue Dual Bus)*: Como mencionado no item anterior, o padrão *Ethernet* é utilizado apenas para redes locais (LANs). Para utilização de redes metropolitanas (MANs), o IEEE desenvolveu o padrão 802.6. Ao contrário do padrão anterior, que tinha como principal problema a existência de várias estações conectadas a rede, este padrão define normas para implantação de redes com poucos pontos, porém com dimensões muito maiores.

Além dos padrões mencionados, existem ainda outros padrões dentro desta camada. Dentre eles podemos citar os próprios sistemas telefônicos como estrutura para implementação de MANs e WANs (*Wide Area Networks* – redes de computadores que abrangem mais de uma cidade). Sistemas como SONET ou ATM constituem estruturas que podem (e são) utilizadas para o estabelecimento destes tipos de redes.

5.3.3 Camada de Rede

A camada de rede tem como objetivo o controle de comunicação entre as diversas sub-redes de computadores presentes no processo de comunicação. Esta camada é responsável pelo direcionamento da transmissão dos pacotes de dados, através da criação de rotas entre a fonte e o destino envolvidos no processo de comunicação. Outro aspecto desempenhado por esta camada refere-se ao controle de congestionamento. Se uma grande quantidade de pacotes é apresentada à uma sub-rede ao mesmo tempo, eles irão congestionar esta sub-rede, formando gargalos para a transmissão. Esta camada tem, portanto, a função de controlar estes congestionamentos.

Exemplos típicos de protocolos para esta camada são:

- *Protocolo IP*: Este protocolo pode ser encarado como o pilar da Internet. Ao contrário de outros protocolos, ele foi projetado desde o início para a tarefa de comunicação entre diversas sub-redes. Ele possui como função receber o fluxo de dados proveniente da camada de transporte e dividi-lo em pacotes. Cada pacote é então transmitido até a es-

tação destino sendo possivelmente fragmentado ao longo do trajeto. Após a chegada de todos os fragmentos, o protocolo IP remonta o pacote, entregando-o à camada de transporte;

- Protocolos ICMP, ARP, RARP e BOOTP: Além do protocolo IP, que é utilizado para a transmissão de dados, a Internet apresenta outros protocolos tais como ICMP, ARP, RARP e BOOTP que tem como função o controle da transmissão dos pacotes e do estabelecimento de rotas entre os diversos roteadores.

O protocolo de baixo-nível mais popular em uso na Internet é o protocolo IP (*Internet Protocol*). Este protocolo, como já vimos, empacota uma certa quantidade de dados em uma entidade conhecida como pacote e realiza uma tentativa de entrega tipo melhor-esforço ao destinatário intencionado. Melhor-esforço significa que se um problema ocorrer na tentativa de entrega, talvez por causa de um congestionamento na rede, então o pacote será perdido. O protocolo IP raramente é usado sozinho. Protocolos de transporte de mais alto-nível são utilizados no topo do protocolo IP para fornecer novas funcionalidades.

É importante enfatizar que o IP é independente do meio físico que os pacotes são transportados. A camada de rede da pilha IP pode ser constituída por vários padrões compatíveis de rede. O uso de redes Ethernet baseadas em fibras ópticas está se tornando uma escolha popular, mas o meio físico utilizado sob a perspectiva do protocolo IP não é importante.

5.3.4 Camada de Transporte

A camada de transporte tem como função aceitar os dados provenientes da camada de aplicação, dividi-los em unidades menores caso seja necessário, repassá-los para a camada de rede e garantir para a camada de aplicação que os dados foram transmitidos corretamente.

Sob condições normais, a camada de transporte cria uma conexão para a transmissão de dados requerida pela camada de aplicação. Caso a camada de aplicação necessite de uma alta velocidade de transmissão, a camada de transporte pode criar várias conexões, dividindo os dados entre estas conexões, aumentando assim o rendimento da transmissão. Por outro lado, se a criação ou a manutenção de conexões for cara, a

camada de transporte pode multiplexar várias conexões de transporte em uma única conexão de rede, reduzindo assim o custo.

A Internet apresenta dois principais protocolos na camada de transporte, um orientado à conexão e outro sem conexão, conhecidos respectivamente por TCP e UDP.

- Protocolo TCP: Este protocolo pode ser encarado como o meio responsável por garantir à camada de aplicação a transmissão confiável de um fluxo de dados entre duas estações. Ele divide este fluxo em datagramas, transmitindo-os para a camada de rede, para que esta transmita até a estação destino. Nada garante que os datagramas cheguem na ordem correta, ou até mesmo cheguem na estação destino. Cabe ao protocolo TCP remontar estes datagramas na ordem correta, e requisitar novos datagramas caso estes sejam destruídos ao longo do trajeto, garantido assim um fluxo de dados confiável para a camada de aplicação;
- Protocolo UDP: Enquanto o protocolo TCP exige que haja o estabelecimento de uma conexão entre as duas estações comunicadoras, o protocolo UDP fornece uma maneira de uma aplicação enviar um fluxo de dados sem a necessidade de estabelecimento de uma conexão. Este tipo de serviço é utilizado por aplicações que exigem apenas uma requisição e uma resposta, evitando assim o processo de estabelecimento e liberação de uma conexão.

Estes dois protocolos de rede são os protocolos mais íntegros em redes baseadas em IP. O TCP é o mais comum dos dois. A sua maior contribuição para a funcionalidade do IP é a sua habilidade em compensar perdas de pacotes na rede através da retransmissão dos dados até que estes sejam recebidos pelo destinatário pretendido. Esta característica é muito valiosa em muitos casos, mas pode apresentar desvantagens em situações dependentes do tempo, pois o TCP entrega todos os dados baseado na ordem de chegada (estrutura de fila). Isto significa que uma informação que não é mais importante pode ficar na frente de novas informações se a perda de pacotes se tornar muito grande. UDP, ao contrário, faz apenas pequenas modificações ao IP. O sistema de melhor-esforço para entrega dos pacotes feito pelo UDP pode ser vantagem em situações onde os dados são relevantes apenas por uma fração de tempo.

5.3.5 Camada de Aplicação

A camada de aplicação é a camada onde se encontram os protocolos de alto nível. Aplicações como terminais remotos (TELNET), transferência de arquivos (FTP) e e-mail (SMTP) são exemplos das primeiras utilizações desta camada. Ao longo dos anos, vários outros protocolos foram incorporados, entre eles o sistema de resolução de nomes para domínios (DNS), o protocolo para transmissão de notícias (NNTP), e o protocolo mais conhecido atualmente, o HTTP, protocolo utilizado para a visualização de páginas da *World Wide Web* (WWW).

5.4 Vantagens da Utilização de Tecnologias baseadas na Internet em Sistemas de Potência

Alguns autores (Elmore, 2000b), (Khatib et al., 2000) e (Hamamatsu et al., 2001) apontam as vantagens da utilização de sistemas baseados na Internet para os sistemas de potência. Devemos salientar que quando dizemos “sistemas baseados na Internet”, não estamos dizendo que os sistemas de potência irão utilizar a rede Internet para a realização da comunicação, e sim irão utilizar um sistema de comunicação particular (intranet) que possui as mesmas características da rede Internet.

Como principais vantagens podemos citar:

- Gerenciamento da Informação: A utilização de sistemas de comunicação propicia uma maior integração das diversas instalações presentes em um sistema de potência. Sistemas baseados neste modelo possuem uma maior facilidade de acesso a dados do sistema (dados em tempo real e dados históricos) para confecção de relatórios e prognósticos do sistema;
- Operação do Sistema: O processo de desregulamentação do setor elétrico tornou muito maior a necessidade de comunicação dentro de um sistema elétrico. Podemos citar como exemplo o acesso à base de dados SCADA. Devido a desregulamentação, diferentes companhias, tais como companhias de distribuição, de transmissão e de compra e venda de energia, necessitam acesso a banco de dados SCADA (Khatib et al., 2000). Soluções tipo Internet baseadas em interfaces

Web apresentam-se como solução atrativa devido, principalmente, a possibilidade de acesso remoto e a ausência de instalação de programas para tal tipo de consulta. Outras vantagens que podemos citar é a possibilidade de controle/teste de dispositivos do sistema remotamente, utilização de sistemas inteligentes de controle tanto nos dispositivos dos sistemas (relés) assim como na sala de operação;

- Monitoramento do Sistema de Potência: A utilização de sistemas de comunicação baseados na Internet facilitará o processo de monitoramento da qualidade da energia do sistema. Ferramentas com este objetivo já estão sendo desenvolvidas (ACTLEM, 1999). Além da qualidade da energia, o processo de diagnóstico de uma subestação e do próprio sistema elétrico será facilitado, visto a possibilidade de automação deste processo e a independência dele em relação aos operadores dos equipamentos;
- Mercado de Energia: O processo de compra e venda de energia será facilitado, uma vez que a utilização de sistemas tipo OASIS (*Open Access Same-time Information System*) (Khatib et al., 2000), proporcionará acesso *on-line* aos diversos dados do sistema, tais como histórico de produção, transações, preços, etc.

Através dos itens anteriores, fica claro que a Internet constitui uma ótima base para o desenvolvimento de diversas aplicações para os sistemas de potência. Essas vantagens podem ser resumidas como:

- Acesso multi-ponto;
- Não necessidade de instalação de programas em máquinas clientes;
- Independência quanto à plataforma e ao *hardware*;
- Interface familiar (Mozilla / Explorer).

Apesar de todas estas vantagens, a Internet ainda apresenta algumas desvantagens que podem ser sumarizadas como:

- Segurança e confiabilidade ainda não atingiram patamares desejáveis;
- Atrasos devido a *buffers*, conflitos entre diferentes tecnologias de redes (síncronas vs. assíncrona), retransmissão de dados devido a erros, problemas de tráfego e roteamento.

5.5 Configurações de Redes para Sistemas de Potência

A infra-estrutura de comunicação a ser utilizada pelo sistema agente é um assunto muito discutido atualmente pelos principais fabricantes de equipamentos para automação, controle e proteção de SEPs. A infra-estrutura atualmente existente é composta desde de equipamentos como cabos ópticos de última geração com grande capacidade de transmissão de dados, sistemas tipo PLC com limitada largura de banda ou até mesmo nenhum sistema de comunicação. No entanto, este cenário tende a ser mudado devido à implementação de sistemas de controle e proteção cada vez mais elaborados, condição que exige a presença de melhores e mais modernas redes de comunicação.

O sistema agente que será proposto neste trabalho possui pequenas exigências em termos de capacidade de transmissão de dados se comparada à capacidade de comunicação que estará disponível num futuro próximo. Acreditamos que a necessidade por um maior nível de comunicação pelos SEPs resultará em uma intranet corporativa pertencente às concessionárias de energia. Esta intranet será responsável pelo interligamento das áreas de controle de um SEP assim como todas as entidades nelas conectadas, através de uma rede de alta capacidade similar à Internet, mas fisicamente separada e dedicada apenas às aplicações dos SEPs.

Para avaliar a possibilidade do emprego de agentes e de comunicações em rede para a proteção de SEPs, nós precisamos entender a confiabilidade e a latência necessárias pelos relés. Uma vez feito isso, podemos determinar se uma determinada combinação de *hardware* e de protocolos de comunicação podem atender as necessidades dos sistemas de proteção. Os relés desempenham um papel fundamental dentro da operação de um SEP, possuindo uma baixíssima tolerância a falhas. Podemos apontar que a comunicação entre relés deve ser realizada em tempos menores que 30 ms, latência que deixa pouquíssimo tempo para recuperação de falhas na transmissão de dados. Torna-se crítico então nos perguntarmos se a tecnologia disponível atende a estas exigências.

A intranet corporativa do futuro será certamente construída a partir de componentes baseados na tecnologia da Internet atual já presentes no mercado. Fazer algo

diferente demandaria um alto custo inicial de desenvolvimento assim como altos custos de manutenção futuros. Infelizmente, os *hardwares* de roteamento da Internet não possuem nenhuma noção de qualidade de serviço na transmissão de dados. Os roteadores, como atualmente projetados, descartam informação (pacotes) quando a quantidade de informação recebida ultrapassa sua capacidade de armazenamento. Esta abordagem revela-se válida para navegadores ou sistemas de *e-mail*, mas precisamos avaliar que efeitos este comportamento terá sobre os sistemas de proteção para SEPs. Dentro da Internet, toda a transmissão de dados é realizada na base do “melhor esforço” (*best-effort*) sem qualquer possibilidade de aumento da prioridade de uma mensagem sobre a outra. Em aplicações de controle há sempre cenários onde mensagens de alta prioridade são geradas, e perguntas sobre as implicações de rodar tais aplicações sobre uma rede que carece desta capacidade sempre surgem.

Os fatos levantados anteriormente sobre prioridades sugerem que os SEPs necessitam de garantias de “Qualidade de Serviço” (*Quality of Service – QoS*). Infelizmente, enquanto QoS tem sido um tópico de pesquisa altamente ativo nos últimos anos, nenhum acordo sobre a abordagem ideal para a resolução desse problema ainda foi tomada e nenhuma solução ganhou a larga aceitação do mercado, e nem parece surgir num futuro próximo.

Conforme podemos ver, o projeto da rede intranet corporativa deve ser cuidadosamente realizado e fortemente administrado para que características como confiabilidade, latência máxima e qualidade de serviço sejam alcançadas. Com estas características em mente, apresentamos algumas possíveis configurações de intranets propostas atualmente.

5.5.1 Meio Físico

No processo de definição de uma rede de comunicação para um sistema de potência, a definição do meio físico constitui numa das etapas de maior importância. Atualmente existem várias opções que podemos escolher, como apontado em (Elmore, 2000b) e (Schweitzer et al., 2001). A escolha do meio físico a ser utilizado pode ser basicamente dividida em duas partes: meio físico para a própria subestação e o meio físico entre as subestações.

Conforme destacamos nos itens 3.2.1 e 5.3.1, existem diversos meios físicos utilizados para a implementação de sistemas de comunicação para SEPs. Dentre estas

opções, a solução mais atrativa para comunicação entre subestações, como extensivamente enfatizado em itens anteriores, é a fibra ótica. A fibra ótica possui uma alta largura de banda (a maior entre todas as opções apresentadas), apresentando também um baixo tempo de atraso para a propagação do sinal. Em contrapartida, devemos salientar que as fibras óticas possuem um alto custo de implementação quando comparada as outras tecnologias. Podemos destacar também como solução para comunicação entre subestações, o baixo custo dos circuitos de telefone, que constituem talvez a solução de mais fácil implementação, uma vez que a empresa de energia poderá alugar as linhas da companhia local de telefonia.

Em relação à comunicação dentro de uma subestação, podemos apontar como solução os cabos tipo par-trançado e as soluções baseadas em técnicas de rádio (incluindo sistemas celulares). Ao longo dos últimos anos, os sistemas de comunicação baseados em técnicas de rádio sofreram um desenvolvimento muito grande, principalmente no que concerne ao aumento de confiabilidade deste sistema. Estes sistemas atualmente possuem um custo associado de valor médio, em relação às outras opções, apresentando uma largura de banda baixa (valor típico : 100 kbps). Contudo, a solução mais atrativa para comunicação dentro de subestações é a utilização de cabos tipo par-trançado. O custo desta implementação é baixo, apresentando grande largura de banda (valor típico: 100 Mbps).

5.5.2 Protocolos e Configurações de Rede

Talvez o ponto que mais gere controvérsia no projeto de uma rede de comunicação para sistemas de potência seja a especificação de protocolos e o modelo da própria rede. Vários autores propuseram diversos modelos e especificações (Elmore, 2000b), (Khatib et al., 2000), (Hamamatsu et al., 2001), (Qiu et al., 2000) e (Ebata et al., 2000), e conforme destacado em (EPRI, 2003), atualmente existem 152 diferentes protocolos de comunicação para a transmissão de dados utilizados nas concessionárias de energia elétrica e 28 diferentes protocolos de comunicação em equipamentos específicos como sensores de temperatura, nível e pressão fornecidos por diferentes fabricantes.

Durante a década de 1990, como destacado em (Elmore, 2000b), o próprio IEEE apenas sugeria o uso do protocolo DNP 3.0 em conjunto com o IEC 870-5, sendo que um comitê formado pelo próprio IEEE e o EPRI estava em processo de desenvolvimento e especificação de um protocolo para comunicações em sistemas de potência

denominado UCA. Concomitante a este comitê, o IEC também iniciou o desenvolvimento de um padrão de comunicação baseado no protocolo TCP/IP, denominado IEC 61850.

Conforme relatado em (Proudfoot, 2002), no início da década de 1990, o desenvolvimento inicial do protocolo UCA foi focado na comunicação entre centros de controle e na comunicação entre subestações e centros de controles. Em 1994, EPRI/IEEE iniciaram o trabalho na nova fase do protocolo UCA – nomeado UCA 2 – desta vez concentrando o foco na comunicação dentro da subestação. Em 1996, o comitê técnico 57 do IEC começou a trabalhar com o IEC 61850 com uma abordagem semelhante, a comunicação dentro da subestação. Em 1997, os dois grupos concordaram em trabalhar juntos na definição de um padrão internacional comum que combinaria o trabalho dos dois grupos. Os resultados desta harmonização de esforços é a especificação atual do protocolo IEC 61850. Como benefícios esperados deste esforço, espera-se a definição da infra-estrutura de comunicação que irá permitir a integração transparente de IEDs, isto é, uma infra-estrutura que será independente de fabricante e que permitirá a fácil integração e automação de IEDs provenientes de diversos fabricantes. Atualmente este protocolo encontra-se em fase de aprovação (Crispino et al., 2004).

Outro fato que deve ser destacado é a inexistência de artigos científicos onde haja a especificação formal de todas as camadas de rede definidas pelo modelo TCP/IP (Tanenbaum, 1996a) a serem utilizadas pelos sistemas de potência, destacando-se os trabalhos (Hamamatsu et al., 2001) e (Coury et al., 2002) como os que mais se aproximam de uma definição completa. Constatado este fato, apresentamos a seguir uma breve descrição destes trabalhos.

Coury et al. (Coury et al., 2002) propõem o uso do protocolo de transporte UDP para a transmissão dos dados relativos ao sistema de proteção idealizado. Este protocolo foi utilizado em redes tipo IP, baseadas na especificação IPv4, sendo que a rede em questão, possuía uma largura de banda de 1,6 Mbps. Escolheu-se as fibras ópticas como meio físico utilizado para comunicação. Baseado nesta configuração de rede, os autores investigam o uso de relés diferenciais para a proteção de linhas de transmissão. Este sistema vale-se do uso do sistema GPS para a sincronização de dados. Aspectos como a quantidade de tráfego e a latência da comunicação foram analisados observando suas influências no processo de detecção da falta.

Já (Hamamatsu et al., 2001) propõem o uso da rede ilustrada na Figura 18. Neste trabalho não se faz menção quanto aos protocolos de rede utilizados, mencionan-

do apenas o fato desta rede ser baseada nos mesmos padrões da Internet. Deve-se destacar, porém, a importância deste trabalho no tocante à topologia da rede. Nele são destacados os elementos constituintes desta rede, assim como esquema de ligações entre eles.

Uma observação que se faz oportuna para este momento, refere-se a uma breve comparação dos últimos dois trabalhos comentados. Nota-se claramente a preocupação dos autores quanto ao escopo principal de seus respectivos trabalhos no processo de definição da rede a ser utilizada. Enquanto Coury et al. especificaram os protocolos de rede para atender o processo de simulação de uma WAN, Hamamatsu et al. baseiam suas definições em uma rede de comunicação a ser utilizada dentro de uma subestação.

Figura 18 - Sistema de controle e proteção baseado em uma intranet

5.6 Resumo

Neste capítulo apresentamos brevemente a definição de uma intranet corporativa e suas camadas lógicas. A partir destes conceitos apresentamos as possíveis configurações que uma intranet deve ter para ser utilizada pelos sistemas de proteção. Para o próximo capítulo reservamos o detalhamento da plataforma EPOCHS. Será através desta plataforma que todas as experiências conduzidas neste trabalho serão realizadas.

Capítulo 6

Desenvolvimento do EPOCHS

6.1 Introdução

Este capítulo introduz o EPOCHS (*Electric Power and Communication Synchronizing Simulator*). A plataforma EPOCHS permite aos usuários criarem e testarem cenários de agentes envolvendo SEPs e sistemas de comunicação. A plataforma EPOCHS é notável pelo uso de múltiplos simuladores de alta qualidade sem a modificação do código original destes. Todos os três simuladores usados pelo EPOCHS permitem aos usuários estender suas funcionalidades, e o sistema EPOCHS vale-se destas facilidades. Isto é de importância fundamental uma vez que o código-fonte destes aplicativos é raramente disponibilizado.

A plataforma EPOCHS faz uso de três grandes simuladores: PSCAD/EMTDC, para simulações de transitórios eletromagnéticos, PSLF, para simulações de transitórios eletromecânicos e NS2, para simulações de rede. Todos simuladores são bem conhecidos e são freqüentemente utilizados em suas respectivas áreas. EPOCHS também adiciona dois componentes próprios. O AgentHQ (*Agent Headquarter*) apresenta uma visão unificada de todos os simuladores para todos os agentes envolvidos no processo de simulação, funcionando como um procurador (*proxy*) para todo o processo de troca de informações entre os simuladores e os agentes. A RTI (*Run-Time Infrastructure*) é responsável por manter consistente a sincronização entre todos os simuladores e pelo roteamento das mensagens entre todos os componentes.

Todos os componentes do EPOCHS são executados em paralelo. Pontos freqüentes de sincronização são usados para leitura e modificação dos estados de simulação dos diferentes componentes, mantendo assim o funcionamento correto de todos os componentes

6.2 Histórico

A plataforma EPOCHS foi desenvolvida totalmente durante o curso deste trabalho, devido principalmente a necessidade de simulação de um SEP em conjunto com uma rede de comunicação. Sistemas poderosos de simulação existem para a simulação de SEPs ou redes de comunicação, mas nenhum *software* disponível é capaz de realizar a simulação em paralelo de um SEP com uma rede de comunicação. Ela nasceu a partir dos esforços conjuntos entre o aluno de doutorado Renan Giovanini do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo – campus São Carlos e do aluno de doutorado Kenneth M. Hopkinson do Departamento de Computação da Universidade de Cornell – EUA.

Os autores desta plataforma inicialmente desejavam um sistema que fosse capaz de simular um SEP simples em conjunto com uma rede de comunicação. Conforme exposto em (Wang et al., 2002a), um esboço inicial deste tipo de simulação já era realizada, porém a tarefa de migração para um novo caso de estudo revelou-se extremamente difícil, o que levou os alunos em questão a explorarem novas técnicas computacionais para superar este problema. A tarefa de integração de diferentes simuladores constitui um ramo próprio da pesquisa em Ciência da Computação, e os resultados obtidos com o desenvolvimento da plataforma EPOCHS acabou levando estes alunos a publicarem seus resultados em uma área diferente da área principal de suas respectivas pesquisas (Hopkinson et al., 2003).

Atualmente a plataforma EPOCHS encontra-se num estágio maduro de desenvolvimento, porém necessita um grande conhecimento de seu funcionamento para sua correta operação. Esforços adicionais ainda são necessários para que esta plataforma atinja um nível onde seu usuário possa utilizá-la transparentemente.

6.3 Trabalhos Relacionados

Existem muitos outros sistemas que combinam simuladores em grupos, ou federações, usando uma RTI como empregada pelo EPOCHS. Gary Bundy et al (Bundy et al., 1996) da MITRE Corporation foi o autor de uma das primeiras publicações a combinar simuladores quando ele criou uma plataforma de simulação de aeronaves de combate composta pelos simuladores AWSIM e ModSAF. A interação e sincronização dos modelos de aeronaves foram feitos utilizando um ambiente de gerenciamento conhecido como ALSP (*Aggregate Level Simulation Protocol*). O projeto foi motivado

pelo fato que tanto o AWSIM como o ModSAF existiam para a simulação de combates, mas cada um incluía níveis diferentes de detalhamento que não existiam no outro. Foi decidido então que a maneira mais econômica para incluir todas, ou pelo menos a maioria das funcionalidades dos dois, seria o acoplamento de ambos simuladores. O produto final não foi totalmente inter-operável, mas contornos foram encontrados para as mais importantes funcionalidades, permitindo assim o sucesso do produto final.

O instituto EPRI (*Electric Power Research Institute*) financiou uma iniciativa conjunta entre a Honeywell e a Universidade de Minnesota para criar o simulador SEPIA (*Simulator for Electric Power Industry Agents*). O SEPIA permite a pesquisadores estudarem os efeitos dos agentes quando usados em mercados de energia dentro de um ambiente desregulamentado. O projeto permite a investigação de complexos cenários de agentes e inclui uma interface intuitiva. A comunicação de rede não foi incluída nos parâmetros simulados, uma vez que o foco do trabalho era a avaliação dos agentes para leilões de energia (Samad et al., 1999).

Trabalhos recentes centralizados em combinar, ou federar, sistemas simuladores têm focado principalmente no uso da HLA (*High Level Architecture*). A HLA é uma arquitetura que pode ser usada para combinar simuladores individuais, denominados federados, em uma simulação combinada denominada como federação. A “cola” que segura todos esses componentes juntos é o componente central conhecido como RTI. A RTI roteia todas as mensagens entre os diversos federados e é responsável por manter consistente os passos de simulação deles. As principais desvantagens para esta abordagem são primeiramente que pode ser muito difícil conformar simuladores existentes para a especificação da HLA. Isto pode ser particularmente verdade se o código-fonte não estiver disponível como é o caso da grande maioria dos simuladores comerciais. Em segundo lugar, a HLA pode ser um meio ineficiente de se combinar federados. O sistema é baseado num sistema de assinaturas onde qualquer federado assinante de outro federado irá receber todos os dados atualizados deste caso estes dados sejam necessários ou não.

Existem vários artigos descrevendo métodos de como adaptar simuladores para uso pela HLA ou ambientes similares, mas apenas alguns projetos descrevem a integração de simuladores para casos onde não há disponibilidade do código-fonte. Em Sudra et al (Sudra et al., 2000) sistemas comerciais são acoplados para a simulação de sistemas de manufatura automotiva através da arquitetura denominada GRIDS (*Generic Runtime Infrastructure for Distributed Simulation*). Eles utilizam agentes localizados

em cada servidor para tarefas como filtragem de dados, predição de valores e gerenciamento de assinaturas. Uma infraestrutura composta por sistemas comerciais para simulação de manufatura também é apresentada por McLean e Riddick em (McLean e Riddick, 2001).

O próprio processo de desenvolvimento da plataforma EPOCHS revela-se como fonte de referência para a tarefa de integração de diferentes simuladores para realização de um objetivo específico. Durante o seu desenvolvimento, dois artigos foram publicados (Wang et al., 2002a) e (Hopkinson et al., 2003). Adicionado a estes dois artigos, um capítulo do livro “Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation” (Thorp et al., 2003) foi escrito descrevendo a plataforma EPOCHS. Este livro foi recentemente publicado pela editora Springer-Verlag.

6.4 Descrição da Plataforma EPOCHS

A plataforma EPOCHS é formada por cinco componentes:

- PSCAD/EMTDC (*Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients for DC*)

O PSCAD/EMTDC é usado para a simulação de transitórios eletromagnéticos. O EMTDC é um pacote para simulação de SEPs. Uma de suas principais qualidades é a sua habilidade em simular precisamente transitórios eletromagnéticos de curta duração no domínio do tempo. O PSCAD é uma interface gráfica que é usada para facilitar o desenvolvimento de cenários para o EMTDC. Este produto é desenvolvido pela *Manitoba HVDC Research Centre* (Manitoba HVDC Research Centre, 1998). O EMTDC simula cenários de transitórios eletromagnéticos, resolvendo uma série de equações diferenciais baseadas em um passo de tempo pré-determinado. Ele possui diversos modelos elétricos detalhados, apresentando-se como uma ferramenta ideal para este tipo de investigação.

- PSLF (*Positive Sequence Load Flow*)

PSLF é usado para simulações de transitórios eletromecânicos. Ele pode simular SEPs com dezenas de milhares de nós e é largamente utilizado pelas indústrias do setor elétrico para modelagem de cenários com estabilidade eletromecânica (General

Electric, 2003). O PSLF modela sistemas elétricos grandes com menos detalhes que o PSCAD/EMTDC, e assim como este, realiza as suas simulações baseadas em um passo de tempo pré-determinado. Ele é um produto desenvolvido pela GE (*General Electric*).

- NS2 (*Network Simulator version 2*)

O NS2 é um simulador de redes de comunicação orientado a eventos criado pelo esforço conjunto entre a Universidade da Califórnia em Berkley, o Lawrence Berkeley Labs, a Universidade do Sul da Califórnia, e a Xerox PARC. O NS2 é um simulador de alta-qualidade que permite a criação de uma extensa variedade de casos de estudo. Ele possui suporte embutido para a maioria dos protocolos de rede utilizados e para a maioria dos protocolos em estudo. Essa ferramenta é particularmente valiosa para estudos do comportamento TCP/IP dentro de redes baseadas em IP (University of Berkeley, 2003).

- AgentHQ (*Agent Headquarter*)

AgentHQ é um módulo desenvolvido neste projeto com a função de apresentar um ambiente unificado para nossos agentes e atuar como um procurador para esses agentes quando interagindo com outros componentes do EPOCHS.

- RTI (*Runtime Infrastructure*)

A RTI é o módulo responsável pelos pontos de sincronização e pelo roteamento de mensagens entre os componentes. Ele foi criado como parte do processo de desenvolvimento do EPOCHS.

6.5 Arquitetura e Funcionamento da Plataforma EPOCHS

A relação lógica entre os componentes da plataforma EPOCHS é ilustrada na Figura 19. Conforme podemos notar, todos os componentes possuem uma interface com a RTI. A lógica de funcionamento de todas as interfaces e de seus respectivos componentes é explicada nos tópicos a seguir.

Figura 19 - O relacionamento entre os 5 componentes do EPOCHS

6.5.1 A RTI

A RTI age como uma “cola” entre todos os componentes. Ela é responsável pela sincronização da simulação e pelo roteamento das mensagens entre os componentes do EPOCHS. A sincronização dos componentes emprega um modelo baseado em passos de tempo durante a execução do EPOCHS. Estes passos são definidos pelo usuário e são escolhidos em função da especificidade do caso estudado. As simulações podem usar passos de tempo pequenos para compensar os erros introduzidos pela abordagem desacoplada da simulação ou podem usar passos de tempo maiores para uma execução mais rápida.

O modelo de sincronização utilizado neste projeto nos permite usar uma alternativa conveniente à modificação do código original dos aplicativos. O PSCAD/EMTDC, PSLF e NS2 permitem o uso de extensões definidas pelo usuário. Isto é, um caso de estudo do PSCAD/EMTDC pode incluir bibliotecas definidas pelo usuário escritas na linguagem C, adicionando novas funcionalidades que originalmente não estavam presentes no aplicativo. O PSLF similarmente permite a inclusão de novos modelos de equipamentos através de sua própria linguagem EPCL. O NS2 também apresenta procedimentos específicos para a adição de novos protocolos de comunicação em C++ para seu código-base. Observadas estas características, decidimos criar um canal de comunicação entre cada componente e a RTI com o propósito específico de sincronização dos componentes. Este processo é simplificado pelo fato que o PSCAD/EMTDC, o PSLF e o NS2 são todos sistema *single-thread*, possibilitando

assim a interrupção de qualquer um deles quando um ponto de sincronização surge. Esforços adicionais seriam necessários se esse não fosse o caso.

A sincronização entre os vários componentes segue um algoritmo simples. Todos os componentes são travados no instante 0. No início de cada passo, a RTI espera por mensagens de sincronização do simulador de SEPs e do NS2. Então, a RTI libera o controle para a AgentHQ. A AgentHQ passa então o controle para os agentes, um a um, até que todos os agentes tenham tido de executar as suas funções. Durante esta fase, os agentes são capazes de enviar mensagens e receber/ajustar variáveis do SEP. Uma vez que todos os agentes estiverem prontos, a AgentHQ retorna o controle de volta para a RTI. Finalmente, a RTI notifica o NS2 e o simulador do SEP que o passo atual está terminado. Neste ponto, os dois simuladores rodam um passo de tempo. Uma atenção especial deve ser tomada com o NS2. Mensagens podem ser recebidas durante dois pontos de sincronização. Se uma mensagem chegar neste intervalo, o NS2 a passará automaticamente para a RTI, que por sua vez a passará para a AgentHQ, e que finalmente entregará ao agente correspondente. O agente então terá a oportunidade de processar a mensagem e enviar outra, caso necessite. Se a mensagem enviada consistir em uma leitura ou comando para o SEP, então esta mensagem será armazenada até o próximo ponto de sincronização.

6.5.2 A Interface Elétrica

A interface elétrica da plataforma EPOCHS é o gerenciador dos simuladores de SEPs. Os dois simuladores usam uma abordagem direta em suas simulações. Eles rodam através de um laço e para cada passo de tempo eles calculam os valores dos diversos equipamentos. Para ambos os simuladores, nós criamos uma biblioteca personalizada que faz uma chamada à RTI para cada passo de tempo. A biblioteca do PSCAD/EMTDC começa lendo todos os valores dos equipamentos acessíveis ao usuário. A biblioteca do PSLF possui acesso direto aos valores das variáveis internas, fazendo esse passo desnecessário. Em seguida, o componente elétrico contata a RTI e notifica que o fim de um passo de tempo foi alcançado. Durante esta fase, os agentes podem solicitar ou ajustar valores no SEP. Ao fim de um ciclo de execução dos agentes, uma mensagem de finalização é enviada da RTI para o componente elétrico. A biblioteca então libera a execução dos simuladores, e eles rodam até atingirem um novo

ponto de execução. Um fluxograma exibindo o funcionamento da interface elétrica é visto na Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma da interface elétrica

6.5.3 A Interface de Comunicação em Rede

A interface de comunicação em rede é relativamente simples. Um novo protocolo de transporte foi adicionado ao NS2 servindo como elo à RTI. Uma chamada periódica é adicionada ao *script* de simulação invocando o novo protocolo que interrompe a execução do NS2 e interage com a RTI uma vez a cada passo de tempo. A duração do passo de tempo pode assumir qualquer valor contanto que esse valor seja o mesmo utilizado pelo simulador de SEPs. O NS2 não possui a habilidade de rastrear o conteúdo das mensagens sob a maioria das circunstâncias quando usando TCP. Nós usamos o módulo TCPApp, a exceção da regra, para o rastreamento das mensagens.

Todos os agentes possuem métodos *send* e *recv* que funcionam como ponto de interação para a comunicação em rede entre os agentes e a AgentHQ, que por sua vez passa/recebe as mensagens para o NS2 via RTI. O UDP, ao contrário, possui habilidade para transmitir dados e baseado neste módulo nós criamos um módulo personalizado chamado UDPApp. Como visto, a escolha do NS2 nos permitiu uma grande flexibilidade em termos de protocolo de comunicação uma vez que conseguimos enviar e receber dados através de chamadas simples a funções do NS2. Um fluxograma da interface de comunicação em rede pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 - Fluxograma da interface de comunicação em rede

6.5.4 O Componente AgentHQ

A AgentHQ é acionada a cada ponto de sincronização e atua como um procurador entre os agentes, a rede de comunicação e os simuladores de SEP. A cada ponto de sincronização, a AgentHQ chama o método *action* de todos os agentes dando oportunidade a eles de calcular seus conjuntos de operações para o próximo passo. Os agentes podem receber ou ajustar valores no SEP usando chamadas a métodos que passam através da AgentHQ. A AgentHQ espera por um valor de retorno e então passa a resposta de volta ao agente solicitante. Os agentes também podem enviar mensagens uns para os outros durante a execução do método *action*. Essas mensagens são enviadas inicialmente a AgentHQ que então as repassa para a RTI, que finalmente as envia ao NS2. Um fluxograma dos eventos da AgentHQ pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma do Componente AgentHQ

Se uma mensagem for recebida dentro do NS2, ela será direcionada para a AgentHQ que subseqüentemente irá retransmiti-la para o método *recv* do agente destinatário. O agente poderá então realizar o processamento da mensagem e mandar novas mensagens para os outros agentes. Uma limitação encontrada na corrente implementação do sistema EPOCHS é que os agentes não podem receber ou ajustar variáveis do SEP ao receber uma mensagem, pois o componente elétrico se encontrará no meio de um ciclo de execução. O agente pode compensar esta limitação colocando a mensagem dentro de uma fila que será lida no começo do próximo período de sincronização. Um fluxograma com este processo pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Recebimento de uma Mensagem

6.6 Implementação e Otimização

A Figura 24 mostra o relacionamento entre os diversos componentes da plataforma EPOCHS em sua implementação. Na versão atual do EPOCHS, o NS2, a RTI, a AgentHQ e todos os agentes estão combinados em um único arquivo executável. Cada componente é logicamente separado dentro do código-fonte e a RTI é implementada como um protocolo dentro do NS2. Esta combinação foi utilizada puramente para melhora do desempenho da execução do EPOCHS. O código-fonte final do sistema EPOCHS fez um total aproximado de 5.200 linhas em linguagem C e C++.

Figura 24 - Relacionamento entre os componentes do EPOCHS na sua implementação

O EPOCHS foi utilizado na investigação de diversas situações de um SEP, porém nenhuma delas usou o PSLF e o PSCAD/EMTDC ao mesmo tempo. Todos resultados que aqui serão apresentados utilizaram apenas o simulador PSCAD/EMTDC. Em um estudo anterior (Thorp et al., 2003), o simulador PSLF foi utilizado. É tecnicamente possível utilizar o EPOCHS com os dois simuladores elétricos ao mesmo tempo, porém não encontramos nenhum exemplo onde isso seria benéfico. Como resultado, nós não permitimos a operação do PSLF e do PSCAD/EMTDC simultaneamente. Pequenas modificações seriam necessárias caso assim desejássemos.

6.7 Scripts de Simulação

Cada simulação de agentes possui três partes. A estrutura do SEP e todas as suas características elétricas devem ser construídas dentro do PSCAD/EMTDC ou do PSLF. O *layout* do sistema de comunicação e os protocolos de comunicação usados devem ser especificados em um *script* TCL/TK para o NS2. Finalmente, os tipos de agentes e suas localizações são adicionadas ao *script* do NS2 para serem utilizadas pela AgentHQ. Se o componente de agentes fosse separado do NS2 um terceiro arquivo de configuração seria necessário ao sistema EPOCHS. Esta é uma limitação herdada no processo de combinação de simuladores. Cada simulador deve ser iniciado a sua maneira. Uma outra desvantagem neste tipo de integração de simuladores é o *overhead* necessário para o processo de comunicação e gerenciamento entre os componentes da simulação. O *script* TCL/TK final do sistema EPOCHS fez um total aproximado 10.500 linhas.

6.8 Resumo

Neste capítulo apresentamos o desenvolvimento e a lógica de funcionamento da plataforma EPOCHS. Esta plataforma será responsável por todas as simulações a serem realizadas neste trabalho envolvendo a presença de SEPs e sistemas de comunicação baseada em uma intranet. Ela foi desenvolvida através da integração de diferentes *softwares* para sistemas de potência e comunicação permitindo assim a análise dos sistemas agentes para proteção desenvolvidos neste trabalho. Nos próximos capítulos apresentaremos exemplos desta tecnologia utilizando a plataforma EPOCHS.

O Sistema Elétrico de Potência Utilizado e a Rede de Comunicação Intranet

7.1 Introdução

Uma tarefa de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho foi a definição de um SEP base para análise e testes dos agentes. Conforme pode ser evidenciado pelas publicações iniciais, os primeiros testes realizados com a plataforma EPOCHS concentravam-se em SEPs simples: SEP com duas barras (Wang et al., 2002b) e SEP com 4 barras (linha de transmissão com três terminais) (Giovanini e Coury, 2002). Estes sistemas revelaram-se de grande ajuda no desenvolvimento inicial do sistema EPOCHS, porém uma análise mais completa dos agentes seria prejudicada, devido principalmente a simplicidade da rede de comunicação e pela pequena quantidade de agentes presentes nestes sistemas. Estes SEPs simples encontram-se completamente descritos nas publicações citadas, porém decidimos por não relatá-los neste trabalho, uma vez que o SEP a ser definido neste capítulo proporciona todas as análises efetuadas anteriormente, adicionando novas características e desafios aos agentes propostos.

A simplicidade dos SEPs estudados inicialmente revelou-se uma deficiência a longo prazo. Normalmente na literatura sobre proteção encontramos estudos com SEPs simples obtidos através de equivalentes de SEPs maiores. SEPs mais complexos usualmente são utilizados para estudos de fluxo de carga e estabilidade, e carecem, portanto, de informações tais como impedância de sequência zero para LTs e geradores por exemplo, fato que impossibilita a simulação de faltas para terra. Os próprios sistemas IEEE tradicionais não satisfazem esta característica, sendo normalmente utilizados para estudos de fluxo de carga e estabilidade.

Mesmo com os problemas citados, optamos por escolher o sistema IEEE de 14 barras como sistema base para nossos testes. Como já indicado, este sistema não apresenta as impedâncias de sequência zero para nenhum de seus elementos. Uma alternativa que poderia ser tomada seria a utilização de um valor típico para a razão entre (sequência positiva) / (sequência zero). Ao invés disso, optamos por apenas simularmos faltas trifásicas pois consideramos que a nossa análise concentrar-se-ia mais na interação dos agentes entre si e com a rede de comunicação do que na tarefa de identificação do tipo de falta. Com isto em mente, o sistema IEEE 14 barras satisfaz plenamente nossos estudos.

7.2 Sistema de Potência

Para o desenvolvimento e testes dos agentes e da rede de comunicação através da plataforma EPOCHS, tomou-se como base o sistema IEEE de 14 barras, conforme destacado na Figura 25. O conjunto completo de dados para este sistema pode ser visualizado nas Tabela 4 e Tabela 5. Todas as linhas de transmissão foram modeladas segundo o modelo PI, e todas as fontes foram modeladas como fontes de potência constante.

Tabela 4 – Dados das barras

Barra	P Gera- do (p.u.)	Q Gera- do (p.u.)	P Carga (p.u.)	Q Carga (p.u.)	Tipo da Barra *	Q Gera- do máx. (p.u.)	Q Gera- do mín. (p.u.)
1	2,32	0	0	0	2	10,0	-10,0
2	0,4	-0,424	0,3038	0,1778	1	0,5	-0,4
3	0,00	0,00	1,3188	0,266	2	0,4	0,00
4	0,00	0,00	0,6692	0,00	3	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,1064	0,0224	3	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,1568	0,1050	2	0,24	-0,06
7	0,00	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	2	0,24	-0,06
9	0,00	0,00	0,413	0,2324	3	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,126	0,0812	3	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,049	0,0252	3	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,0854	0,0224	3	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,189	0,0812	3	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,2086	0,0700	3	0,00	0,00

* Tipo de Barra: 1 → barra *slack* (P0), 2 → barra de gerador (PV) e 3 → barra de carga (PQ)

Tabela 5 – Dados das LTs

Barra Origem	Barra Destino	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Carregamento da Linha (p.u.)	Tap
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	1
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	1
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	1
2	4	0,05811	0,17632	0,0374	1
2	5	0,05695	0,17388	0,034	1
3	4	0,06701	0,17103	0,0346	1
4	5	0,01335	0,04211	0,0128	1
4	7	0,00	0,20912	0,00	0,978
4	9	0,00	0,55618	0,00	0,969
5	6	0,00	0,25202	0,00	0,932
6	11	0,09498	0,1989	0,00	1
6	12	0,12291	0,25581	0,00	1
6	13	0,06615	0,13027	0,00	1
7	8	0,00	0,17615	0,00	1
7	9	0,00	0,11001	0,00	1
9	10	0,03181	0,08450	0,00	1
9	14	0,12711	0,27038	0,00	1
10	11	0,08205	0,19207	0,00	1
12	13	0,22092	0,19988	0,00	1
13	14	0,17093	0,34802	0,00	1

Com relação às características dos relés projetados, utilizamos as recomendações propostas em (Phadke e Thorp, 1988). Para obtenção das ondas de tensão e corrente utilizadas pelos relés foram utilizados TP's e TC's ideais, isto é, apenas a relação de transformação destes elementos foi utilizada e características como o efeito de saturação foram desprezadas. Após a obtenção das ondas de tensão e corrente em valores próprios para a utilização pelo relé, utilizou-se um filtro Butterworth de 3ª ordem com frequência de corte igual a 400 Hz para evitar-se o efeito conhecido como sobreposição de espectro (efeito *anti-aliasing*). Finalmente as ondas de tensão e corrente são amostradas numa frequência de 1 KHz e convertidas por um conversor A/D de 12 bits.

7.3 Sistema de Comunicação

Os enlaces de comunicação foram instalados no topo das linhas de transmissão, resultando em um sistema de comunicação com a mesma topologia do sistema de transmissão. Todos os enlaces foram configurados como tipo *full-duplex*, com tempo de atraso de 2 ms, e inicialmente com uma largura de banda de 100 Mb/s. Toda a comunicação foi realizada através dos protocolos UDP/IP.

O roteamento da rede de comunicação foi baseado no algoritmo *Link State Routing*, utilizando-se como métrica para roteamento o menor número de saltos entre dois roteadores quaisquer. Outras métricas alternativas tais como maximização da largura de banda de todos os enlaces poderia ser utilizada porém, como estamos tratando problemas de engenharia de proteção onde o fator tempo é crucial, optamos pela métrica que melhor minimiza o tempo de comunicação entre dois roteadores quaisquer. O algoritmo *Link State* utiliza-se da teoria de grafos para o cálculo do menor caminho entre dois nós. Este algoritmo é um algoritmo tradicional para roteamento de redes, sendo largamente utilizado pelas redes de computadores atuais através do protocolo OSPF (*Open Shortest Path First*). Maiores detalhes sobre *Link State Routing* e OSPF podem ser encontradas em (Tanenbaum, 1996b).

Um fato que deve ser salientado em relação ao sistema de comunicação refere-se ao fato dos nós da rede de comunicação não possuírem a mesma numeração que as barras do SEP. Isto aconteceu porque as barras 5 e 6, e as barras 4, 8 e 9 delimitam um transformador e não uma linha de transmissão. Para estes casos, nós assumimos que barras localizadas dentro duma mesma subestação determinam apenas um nó no sistema de comunicação. Este sistema pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 25 – Sistema IEEE 14 barras

Figura 26 – Sistema de Comunicação

7.4 Agentes

Como foram apresentadas no capítulo 2, três diferentes categorias de agentes foram projetadas: agentes primários, agentes de retaguarda e agentes de carga. Para o SEP apresentado na Figura 25, um conjunto de 76 agentes foi projetado (30 agentes primários, 30 agentes de retaguarda e 16 agentes de carga).

Para nomenclatura dos diversos agentes foi estabelecida uma regra fixa. Para cada tipo de agente, diferentes prefixos foram estabelecidos: PRIM para agentes primários, RET para agentes de retaguarda e GERADOR, COMPENSADOR e CARGA para os agentes de carga. Os agentes com prefixo “GERADOR”, “COMPENSADOR” e “CARGA” compartilham o mesmo código computacional, e são portanto categorizados dentro do tipo “CARGA”. Escolhemos apenas apresentar três prefixos ao invés de um pois existem casos onde existem mais de um agente de carga em uma mesma localidade. Após a utilização de um prefixo para categorização do agente, um conjunto de dezenas é utilizado dentro do nome do agente. A primeira dezena indica a barra onde o agente se encontra, e as dezenas subsequentes indicam a localização dos agentes com os quais o agente deve se comunicar para realizar a proteção.

Como exemplo podemos citar a proteção primária da LT 01-02. Para isso são utilizados os agentes primários PRIM_01-02 (agente primário localizado na barra 01 que se comunica com agente primário na barra 02) e o agente primário PRIM_02-01 (agente primário localizado na barra 02 que se comunica com agente primário na barra 01). Como outro exemplo podemos citar a proteção de retaguarda desta mesma linha de transmissão, a LT 01-02. Para isso são utilizados os agentes RET_05-01G-02, RET_02-01G-05 e GERADOR_01G.

Baseado então nesta nomenclatura, os 76 agentes são definidos como:

- 30 agentes primários: PRIM_01-02, PRIM_01-05, PRIM_02-01, PRIM_02-03, PRIM_02-04, PRIM_02-05, PRIM_03-02, PRIM_03-04, PRIM_04-02, PRIM_04-03, PRIM_04-05, PRIM_05-01, PRIM_05-02, PRIM_05-04, PRIM_06-11, PRIM_06-12, PRIM_06-13, PRIM_09-10, PRIM_09-14, PRIM_10-09, PRIM_10-11, PRIM_11-06, PRIM_11-10, PRIM_12-06, PRIM_12-13, PRIM_13-06, PRIM_13-12, PRIM_13-14, PRIM_14-09, PRIM_14-13;

- 30 agentes de retaguarda: RET_01-02G-02L-03-04-05, RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13, RET_02-01G-05, RET_02-03C-03L-04, RET_02-03-04L-05-08C-09L-10-14, RET_02-01-04-05L-06C-06L-11-12-13, RET_03-01-02G-02L-04-05, RET_03-02-04L-05-08C-09L-10-14, RET_04-01-02G-02L-03-05, RET_04-03C-03L-02, RET_04-01-02-05L-06C-06L-11-12-13, RET_05-01G-02, RET_05-01-02G-02L-03-04, RET_05-02-03-04L-08C-09L-10-14, RET_06-10-11L, RET_06-12L-13, RET_06-12-13L-14, RET_09-10L-11, RET_09-13-14L, RET_10-02-03-04L-05-08C-09L-14, RET_10-06-11L, RET_11-01-02-04-05L-06C-06L-12-13, RET_11-09-10L, RET_12-01-02-04-05L-06C-06L-11-13, RET_12-06-13L-14, RET_13-01-02-04-05L-06C-06L-11-12, RET_13-06-12L, RET_13-09-14L, RET_14-02-03-04L-05-08C-09L-10, RET_14-06-12-13L;
- 16 agentes de carga: GERADOR_01G, GERADOR_02G, COMPENSADOR_03C, COMPENSADOR_06C, COMPENSADOR_08C, CARGA_02L, CARGA_03L, CARGA_04L, CARGA_05L, CARGA_06L, CARGA_09L, CARGA_10L, CARGA_11L, CARGA_12L, CARGA_13L, CARGA_14L.

A localização de todos os agentes dentro do sistema IEEE 14 barras pode ser visualizada na Figura 27. A função de cada tipo de agente e sua lógica de funcionamento será oportunamente abordada nos capítulos 8 e 9.

Figura 27 – Localização dos Agentes

7.5 Resumo

Apresentamos neste capítulo os detalhes pertinentes à topologia e modelagem do SEP e dos relés para testes dos agentes. Em conjunto a estes dados, apresentamos também a topologia e configuração do sistema de comunicação proposto. A análise e definição destas informações são de extrema importância, pois elas configuram os parâmetros de entrada aos *softwares* PSCAD e NS2, responsáveis respectivamente pela simulação do sistema elétrico de potência e pelo sistema de comunicação respectivamente. No próximo capítulo, apresentaremos os testes relacionados à rede de comunicação.

Capítulo 8

Determinação e Avaliação do Desempenho do Sistema de Comunicação

8.1 Introdução

Os estudos relativos aos agentes para proteção primária e de retaguarda foram divididos em três capítulos. Neste capítulo abordaremos os parâmetros da rede de comunicação e o seu desempenho frente a diferentes situações operacionais e ao volume de tráfego presente nos enlaces. No próximo capítulo abordaremos o esquema de proteção diferencial utilizado pelos agentes de proteção primária e finalmente no capítulo 10 apresentamos o estudo dos agentes para proteção de retaguarda e a interação destes agentes com os agentes para proteção primária previamente desenvolvidos.

Devemos nos lembrar que a rede de comunicação e os agentes estão interligados. A mudança em um parâmetro da rede de comunicação afeta o desempenho dos agentes e vice-versa. O projeto dos agentes deve ser realizado concomitantemente ao projeto da rede de comunicação. Se um parâmetro de um for alterado, o outro deve ser reavaliado para que a precisão e velocidade do sistema de proteção sejam mantidas.

8.2 Características da Rede de Comunicação

8.2.1 Largura de Banda e Tempo de Trânsito

A primeira característica que devemos nos preocupar em agentes baseados em comunicação é na própria rede de comunicação. Falhas em enlaces podem levar a atrasos na transmissão dos pacotes de informação ou ao aumento do tráfego a níveis inaceitáveis, com conseqüente perda de pacotes e inviabilização do processo de comunicação. O sistema de comunicação deverá ser projetado, portanto, para suportar a perda de um ou mais enlaces, garantindo assim o funcionamento do processo de comunicação, mesmo em situações anormais.

Uma possível solução para esta situação seria a duplicação de todos os enlaces. Entretanto, mesmo com esta configuração, um blecaute da subestação poderia desligar seu roteador e causar a interrupção na comunicação desta subestação com o exterior. Outra solução seria definir uma quantidade suficiente de largura de banda para comportar situações onde um ou mais enlaces estejam inoperantes, e o tráfego afetado seja re-roteado para os enlaces não afetados. Como exemplo desta situação, apresentamos as próximas duas figuras. Na Figura 28 apresentamos uma situação onde o sistema de comunicação funciona corretamente. Nele, a largura de banda utilizada é a menor possível. Durante a situação normal, sete conexões diferentes passam pelo enlace 2-3. Por simplicidade, apenas os tráfegos das conexões relacionadas à proteção primária das linhas de transmissão 2-3, 2-4 e 3-4 são apresentados. As larguras de banda total utilizada pelos enlaces associados (enlaces 2-3, 3-2, 2-4, 4-2, 3-4 e 4-3) são mostradas na Tabela 6.

Figura 28 – Sistema de comunicação funcionando corretamente

Na figura seguinte, Figura 29, os enlaces 2-3 e 3-2 estão inoperantes. Nesta situação, os roteadores localizados nos nós 2 e 3 detectam esta situação, e através de um algoritmo padrão de roteamento, eles reconstroem sua tabela de roteamento. Após este procedimento, se o roteador 2 quer enviar uma mensagem para o roteador 3, ele a envia primeiramente ao roteador 4 pelo enlace 2-4 e o roteador 4 a re-encaminha pelo enlace 4-3. A nova quantidade de tráfego para esta situação é mostrada na Tabela 6. Como podemos ver, o sistema ainda funciona corretamente pois existe quantidade suficiente de largura de banda presente nos enlaces. Caso este não fosse o caso, a quantidade de

tráfego gerada pelos agentes iria sobrecarregar a capacidade dos enlaces, causando a perda de pacotes.

Tabela 6 – Largura de banda

enlace	situação normal (Mb/s)	enlaces 2-3 e 3-2 inoperantes (Mb/s)
2-3	4,928	0
2-4	6,336	9,856
3-2	4,928	0
3-4	4,224	9,152
4-2	7,040	7,040
4-3	4,928	4,928

Figura 29 – Enlaces 2-3 e 3-2 estão inoperantes

A partir deste exemplo podemos concluir dois fatos. Primeiro, se uma quantidade suficiente de largura de banda estiver disponível, os agentes podem comunicar-se uns com os outros mesmo se um ou mais enlaces (mas não todos) conectados a um mesmo nó estiverem inoperantes ao mesmo tempo. Segundo, se todos os enlaces conectados a um mesmo nó estiverem inoperantes, a comunicação torna-se impossível, e os agentes devem alterar sua lógica de proteção para alguma lógica baseada apenas em informações locais (*standalone*).

Outro aspecto que devemos nos ater é o tempo de trânsito da mensagem. Quando um enlace torna-se inoperante, ele apenas não afeta a largura de banda nos enlaces restantes, mas também muda o tempo que algumas mensagens levam para trafegar entre um nó e outro. Tomando o caso anterior como exemplo, todas as mensagens que

eram roteadas através dos enlaces 2-3 e 3-2 foram re-roteadas após a queda desses enlaces. Como podemos ver na Tabela 7, todas as mensagens em uma situação normal levam 2,007 ms para transitar entre dois nós adjacentes. Após o re-roteamento, as mensagens do nó 2 ao nó 3 e do nó 3 ao nó 2 levam mais que o dobro do tempo anterior. As mensagens do nó 2 ao nó 4, 3 ao 4, 4 a 2 e de 4 a 3 não são afetadas.

Tabela 7 – Tempo de trânsito

Nós	Situação Normal (ms)	Enlaces 2-3 e 3-2 Inoperantes (ms)
2-3	2,007	4,042
2-4	2,007	2,007
3-2	2,007	4,063
3-4	2,007	2,007
4-2	2,007	2,007
4-3	2,007	2,007

8.2.2 A Estrutura das Mensagens

Outro aspecto que merece atenção refere-se ao tamanho (em bytes) das mensagens trafegadas. O tamanho dos pacotes que trafegam pela rede constituem um dos parâmetros da simulação do sistema de comunicação e está diretamente ligado a quantidade de informação que os agentes estão utilizando para se comunicar. Para os agentes projetados assumimos que as mensagens possuem uma das seguintes formas:

Como pode ser visto, todas as mensagens compartilham os dois primeiros e os dois últimos campos. O primeiro campo refere-se ao tipo de mensagem. Ele pode ser um comando para acionamento de um disjuntor (SET), uma mensagem contendo os fasores de corrente de agentes remotos (GET_RESPONSE), ou os três diferentes tipos de *trips* (INTERTRIP, BACKUP_TRIP ou NEIGHBOR_TRIP). O segundo campo de todas as mensagens contém o instante que a mensagem foi criada. Já os últimos dois campos referem-se ao protocolo UDP/IP. O penúltimo campo contém o cabeçalho UDP e o último campo contém o cabeçalho relativo ao protocolo IP versão 4.

A mensagem nº 1 possui 46 bytes e é o comando para acionamento do disjuntor. O campo número 3 possui a identificação do disjuntor e o campo número 4 possui o comando a ser efetuado (OPEN ou CLOSE). A mensagem nº 2 possui 88 bytes é a principal mensagem utilizada pela lógica diferencial. Ela contém os valores dos fasores de corrente A, B e C vistos pelos agentes. As últimas 3 mensagens possuem 41 bytes e correspondem aos 3 diferentes tipos de *trip* que existem neste sistema. O primeiro campo determina qual é o tipo de *trip*, enquanto os outros campos possuem significado semelhante aos campos da mensagem nº 1.

8.3 Determinação da Largura de Banda da Rede de Comunicação e o Fenômeno da Queda de Enlaces

Tendo em mente todos os fatos denotados anteriormente, percebemos que a decisão sobre a largura de banda é extremamente importante para o funcionamento rápido e correto do sistema de proteção. Para o processo de determinação da largura de banda ideal, nós assumimos inicialmente que todos os enlaces possuíam uma largura de banda muito alta para que fenômenos como a perda de pacotes devido ao excesso de tráfego não acontecessem. Tomando como base o sistema de comunicação apresentado na Figura 26, configuramos todos os enlaces para uma largura de banda igual a 100 Mb/s. Feito isso, foram simuladas 119 situações de perdas de enlaces, e foram medidas as quantidades de tráfegos presentes em todos eles após o processo de re-roteamento. Salientamos que o como os enlaces são *full-duplex*, o volume de tráfego no sentido 1→2 não é necessariamente o mesmo do sentido 2→1. Os casos que foram simulados referem-se basicamente as seguintes contingências:

- Queda de 1 enlace;
- Queda de 2 enlaces conectados ao mesmo nó;

- Queda de 3 enlaces conectados ao mesmo nó;
- Queda de 4 enlaces conectados ao mesmo nó;
- Queda de 5 enlaces conectados ao mesmo nó;
- Queda de 6 enlaces conectados ao mesmo nó;

Durante este conjunto de testes, assumimos que enlaces que não compartilhassem a mesma origem nunca se tornariam inoperantes ao mesmo tempo. Exemplo: enlaces 2-3 e 2-4 inoperantes é um caso de queda de dois enlaces, enquanto enlaces 2-4 e 5-7 inoperantes não configura um caso pertencente ao conjunto de testes. Apresentamos os resultados pertinentes a estes testes a seguir.

8.3.1 Queda de 1 Enlace

Inicialmente apresentamos as simulações relativas à queda de 1 enlace. Este tipo de situação corresponde à contingência mais simples que o sistema de comunicação pode sofrer e nos indica a largura de banda mínima que a rede de comunicação deve possuir para enfrentar tal situação. Para esta contingência, 15 diferentes situações são descritas a seguir:

Tabela 8 – Situações possíveis para queda de 1 enlace

Nó	Enlace
1 $\Rightarrow$	(1 – 2), (1 – 5)
2 $\Rightarrow$	(2 – 3), (2 – 4), (2 – 5)
3 $\Rightarrow$	(3 – 4)
4 $\Rightarrow$	(4 – 5), (4 – 6), (4 – 10)
5 $\Rightarrow$	(5 – 7), (5 – 8), (5 – 9)
6 $\Rightarrow$	(6 – 7)
8 $\Rightarrow$	(8 – 9)
9 $\Rightarrow$	(9 – 10)

Tomando a Tabela 8 como referência, percebemos que existem duas situações possíveis de queda de 1 enlace para o nó 1 (queda do enlace (1–2) ou do enlace (1–5)) enquanto existem três diferentes situações para o nó 4 (queda do enlace (4–5), enlace (4–6) ou enlace (4–10)).

Considerando então as 15 possíveis situações descritas anteriormente, apresentamos na Figura 30 o volume de tráfego normal e o volume máximo de tráfego para queda de 1 enlace para o conjunto de testes.

Figura 30 - Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 1 enlace

Nesta figura, podemos perceber o volume normal de tráfego e o volume máximo de tráfego obtido para o conjunto de 15 situações descritas anteriormente para cada enlace. Conforme podemos ver, os enlaces da rede de comunicação possuem volumes de tráfegos distintos tanto para a situação normal quanto após a queda de 1 enlace. Durante a situação normal os enlaces (4-5) e (5-4) possuem um volume de tráfego igual a 9,856 Mb/s, sendo os enlaces mais exigidos nesta situação. Por outro lado, os enlaces (6-7) e (7-6) apresentam um volume igual a 1,408 Mb/s, sendo os menos exigidos. Uma rápida conclusão que poderíamos tirar, porém errônea, seria o fato de assumirmos que os enlaces mais exigidos durante a situação normal seriam também os mais exigidos durante uma situação de contingência. Conforme podemos notar, os enlaces que apresentam o maior volume de tráfego após a queda de um enlace são os enlaces (4-6), (5-2), (5-7) e (5-9), todos apresentando um volume igual a 13,38 Mb/s, enquanto os enlaces com maior volume de tráfego para a situação normal são os enlaces 4-5 e 5-4.

A Figura 30 nos apresenta uma ótima alternativa gráfica para comparação dos volumes de tráfegos normal e máximo, porém ela nos omite um importante detalhe:

a situação na qual ocorre o tráfego máximo. Com isto em mente, apresentamos a Tabela 9.

Tabela 9 – Volume de tráfego máximo e indicação da situação correspondente para todos os enlaces relativa à queda de 1 enlace

Enlace	Volume Normal (Mb/s)	Volume Máximo (Mb/s)	Enlace Inoperante
(1-2)	4,224	10,56	(2-5)
(1-5)	4,224	9,856	(2-5)
(2-1)	4,928	10,56	(1-5)
(2-3)	4,928	9,856	(2-4) ou (4-5)
(2-4)	6,336	10,56	(3-4)
(2-5)	7,04	11,26	(1-5)
(3-2)	4,928	10,56	(2-4)
(3-4)	4,224	9,152	(2-3) ou (2-4)
(4-2)	7,04	11,97	(3-4)
(4-3)	4,928	10,56	(2-4)
(4-5)	9,856	11,97	(4-6) ou (4-10) ou (9-10)
(4-6)	6,336	13,38	(5-7)
(4-10)	6,336	8,448	(9-10)
(5-1)	5,632	11,97	(2-5)
(5-2)	7,744	13,38	(1-5)
(5-4)	9,856	12,67	(5-7)
(5-7)	7,04	13,38	(4-6)
(5-8)	6,336	11,97	(5-9)
(5-9)	7,04	13,38	(4-10) ou (5-8)
(6-4)	4,928	10,56	(5-7)
(6-7)	1,408	8,448	(5-7)
(7-5)	5,632	10,56	(4-6)
(7-6)	1,408	7,744	(4-6)
(8-5)	4,928	8,448	(5-9)
(8-9)	2,816	8,448	(5-9)
(9-5)	5,632	10,56	(4-10) ou (9-5)
(9-8)	2,816	9,152	(5-8)
(9-10)	2,112	8,448	(4-10)
(10-4)	4,928	7,04	(5-9) ou (9-10)
(10-9)	2,112	7,04	(4-10)

A partir então desta tabela podemos ainda destacar mais dois fatos para este conjunto de testes. Um refere-se aos valores máximos de volume de tráfego nos enlaces (4-6), (5-2), (5-7) e (5-9). Enquanto para o enlace (4-6) o volume máximo acontece quando o enlace (5-7) está fora do sistema, os enlaces (5-2), (5-7) e (5-9) observam a maior quantidade de tráfego quando os enlaces (1-5), (4-6) e (4-10) estão inoperantes respectivamente. O segundo fato que podemos destacar é o fato de um volume máximo de tráfego aparecer para contingências distintas. Conforme já vimos, o enlace (5-9) transporta a quantidade máxima de tráfego quando os enlaces (4-10) ou (5-8) estão inoperantes.

8.3.2 Queda de 2 Enlaces

Seguindo a lógica anteriormente apresentada, simulamos todas as situações possíveis envolvendo a queda de 2 enlaces conectados ao mesmo nó da rede de comunicação. Para esta situação, 40 possíveis casos foram simulados:

Tabela 10 - Situações possíveis para queda de 2 enlaces

Nó	Enlaces				
1 $\Rightarrow$	(1-2;1-5),				
2 $\Rightarrow$	(2-1;2-3), (2-4;2-5);	(2-1;2-4),	(2-1;2-5),	(2-3;2-4),	(2-3;2-5),
3 $\Rightarrow$	(3-2;3-4)				
4 $\Rightarrow$	(4-2;4-3), (4-3;4-6),	(4-2;4-5), (4-3;4-10),	(4-2;4-6), (4-5;4-6),	(4-2;4-10), (4-5;4-10),	(4-3;4-5), (4-6;4-10)
5 $\Rightarrow$	(5-1;5-2), (5-2;5-4), (5-4;5-8),	(5-1;5-4), (5-2;5-7), (5-4;5-9),	(5-1;5-7), (5-2;5-8), (5-7;5-8),	(5-1;5-8), (5-2;5-9), (5-7;5-9),	(5-1;5-9), (5-4;5-7), (5-8;5-9)
6 $\Rightarrow$	(6-4;6-7)				
7 $\Rightarrow$	(7-5;7-6)				
8 $\Rightarrow$	(8-5;8-9)				
9 $\Rightarrow$	(9-5;9-8),	(9-5;9-10),	(9-8;9-10)		
10 $\Rightarrow$	(10-4;10-9)				

Através desta tabela percebemos que para o nó 1 existe apenas uma situação possível de queda de dois enlaces (enlaces 1-2 e 1-5), enquanto para o nó 9 existem três situações possíveis (enlaces 9-5 e 9-8, ou 9-5 e 9-10, ou 9-8 e 9-10).

Na Figura 31 apresentamos o volume de tráfego para a situação normal e o volume máximo para a queda de 2 enlaces conectados ao mesmo nó.

Figura 31 - Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 2 enlaces

Para esta nova situação, notamos que o volume máximo de tráfego aumenta consideravelmente se compararmos ao caso da queda de 1 enlace. Enquanto anteriormente o volume máximo de tráfego situava-se na faixa de 8 – 12 Mb/s para a maioria dos enlaces, agora apenas 3 enlaces - (6-7), (7-6) e (9-8) - possuem um volume máximo de tráfego menor que 10 Mb/s. Neste novo conjunto de testes, os enlaces (4-5) e (5-4) são os enlaces mais exigidos da rede, apresentando volumes máximos de tráfego de 21,82 e 23,23 Mb/s respectivamente.

Na Tabela 11 podemos ver o valor máximo de tráfego para todos os enlaces, assim como a situação que ocasionou tal valor. Uma constatação interessante que podemos abstrair desta tabela é o fato do volume máximo de tráfego relativo a um enlace não possuir relação com a origem ou destino do enlace em si. Por exemplo, o enlace (4-6) recebe tráfego máximo quando os enlaces (5-1,5-7) estão inoperantes.

Tabela 11 - Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 2 enlaces

Enlace	Volume Máximo (Mb/s)	Enlaces Inope- rantes
(1-2)	15,49	(5-2;5-4)
(1-5)	14,78	(5-2;5-4)
(2-1)	15,49	(5-2;5-4)
(2-3)	14,78	(4-2;4-5)
(2-4)	16,9	(5-4;5-7)
(2-5)	16,9	(4-5;4-6)
(3-2)	15,49	(4-2;4-5)
(3-4)	14,08	(4-2;4-5)
(4-2)	19,01	(5-1;5-2)
(4-3)	15,49	(4-2;4-5)
(4-5)	21,82	(2-1;2-5)
(4-6)	13,38	(5-1;5-7)
(4-10)	19,71	(5-8;5-9)
(5-1)	16,9	(5-2;5-4)
(5-2)	18,3	(4-2;4-3)
(5-4)	23,23	(5-1;5-2)
(5-7)	13,38	(4-2;4-6)
(5-8)	15,49	(9-5;9-10)
(5-9)	13,38	(4-2;4-10)
(6-4)	10,56	(5-1;5-7)
(6-7)	8,448	(5-1;5-7)
(7-5)	10,56	(4-2;4-6)
(7-6)	7,744	(4-2;4-6)
(8-5)	12,67	(9-5;9-10)
(8-9)	10,56	(9-5;9-10)
(9-5)	10,56	(4-2;4-10)
(9-8)	9,152	(5-1;5-8)
(9-10)	12,67	(5-8;5-9)
(10-4)	15,49	(5-8;5-9)
(10-9)	15,49	(5-8;5-9)

8.3.3 Queda de 3 Enlaces

Neste item, apresentamos a análise de todos casos relativos à queda de 3 enlaces conectados ao mesmo nó. Para tal situação, existem 35 possíveis condições:

Tabela 12 - Situações possíveis para queda de 3 enlaces

Nó	Enlaces			
2 ⇒	(2-3;2-4;2-5),	(2-1;2-4;2-5),	(2-1;2-3;2-5),	(2-1;2-3;2-4)
4 ⇒	(4-2;4-3;4-5), (4-2;4-5;4-10), (4-3;4-6;4-10),	(4-2;4-3;4-6), (4-2;4-5;4-10), (4-5;4-6;4-10)	(4-2;4-3;4-10), (4-3;4-5;4-6),	(4-2;4-5;4-6), (4-3;4-5;4-10),
5 ⇒	(5-1;5-2;5-4), (5-1;5-4;5-7), (5-1;5-7;5-9), (5-2;5-4;5-9), (5-4;5-7;5-8),	(5-1;5-2;5-7), (5-1;5-4;5-8), (5-1;5-8;5-9), (5-2;5-7;5-8), (5-4;5-7;5-9),	(5-1;5-2;5-8), (5-1;5-4;5-9), (5-2;5-4;5-7), (5-2;5-7;5-9), (5-4;5-8;5-9),	(5-1;5-2;5-9), (5-1;5-7;5-8), (5-2;5-4;5-8), (5-2;5-8;5-9), (5-7;5-8;5-9)
9 ⇒	(9-5;9-8;9-10)			

Na Figura 32 apresentamos o volume de tráfego para a situação normal e o volume máximo para a queda de 3 enlaces conectados ao mesmo nó.

Figura 32 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 3 enlaces

Mais uma vez, a queda de um número maior de enlaces leva os enlaces restantes a transportar um volume máximo maior de tráfego. Nesta nova situação, 19 enlaces possuem tráfegos máximos maiores que 18 Mb/s e apenas 3 enlaces possuem volumes máximos menores que 10 Mb/s. Um fato que devemos destacar é o comportamento do tráfego nesta situação relativa aos enlaces (6-7) e (7-6). Enquanto para a situação normal estes enlaces apresentam um volume de tráfego de 1,408 Mb/s, e para as situa-

ções de queda de 1 enlace e 2 enlaces eles apresentaram um volume máximo em torno de 8 Mb/s, agora eles possuem um volume máximo de 18,3 Mb/s, correspondendo a um aumento de aproximadamente 13 vezes. A descrição de todos os valores máximos de tráfego assim como as condições correspondentes encontram-se descritos na Tabela 13.

Tabela 13 – Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 3 enlaces

Enlace	Volume Máximo (Mb/s)	Enlaces Inoperantes
(1-2)	19,71	(5-2;5-4;5-7)
(1-5)	19,71	(2-3;2-4;2-5)
(2-1)	18,3	(5-2;5-4;5-7)
(2-3)	18,3	(4-2;4-5;4-10)
(2-4)	21,12	(5-4;5-8;5-9)
(2-5)	22,53	(4-5;4-6;4-10)
(3-2)	20,42	(4-2;4-5;4-10)
(3-4)	19,71	(2-1;2-4;2-5)
(4-2)	19,01	(4-3;4-5;4-6)
(4-3)	21,12	(2-1;2-4;2-5)
(4-5)	22,53	(4-2;4-3;4-6)
(4-6)	18,3	(5-1;5-2;5-4)
(4-10)	19,71	(5-1;5-8;5-9)
(5-1)	22,53	(2-3;2-4;2-5)
(5-2)	21,12	(5-1;5-4;5-7)
(5-4)	24,64	(5-1;5-2;5-7)
(5-7)	19,71	(4-2;4-3;4-5)
(5-8)	11,97	(5-1;5-4;5-9)
(5-9)	13,38	(4-2;4-3;4-10)
(6-4)	19,01	(5-1;5-2;5-4)
(6-7)	18,3	(4-2;4-3;4-5)
(7-5)	19,71	(4-2;4-3;4-5)
(7-6)	18,3	(5-1;5-2;5-4)
(8-5)	9,152	(5-2;5-4;5-9)
(8-9)	9,856	(5-2;5-4;5-9)
(9-5)	10,56	(4-2;4-3;4-10)
(9-8)	9,152	(5-1;5-2;5-8)
(9-10)	12,67	(5-1;5-8;5-9)
(10-4)	15,49	(5-1;5-8;5-9)
(10-9)	15,49	(5-1;5-8;5-9)

8.3.4 Queda de 4 Enlaces

Neste item, apresentamos a análise de todos casos relativos à queda de 4 enlaces conectados ao mesmo nó. Para tal situação, existem 21 possíveis condições:

Tabela 14 - Situações possíveis para queda de 4 enlaces

Nó	Enlaces	
2 ⇒	(2-1;2-3;2-4;2-5)	
4 ⇒	(4-3;4-5;4-6;4-10),	(4-2;4-5;4-6;4-10),
	(4-2;4-3;4-6;4-10),	(4-2;4-3;4-5;4-10),
5 ⇒	(4-2;4-3;4-5;4-6)	
	(5-1;5-2;5-4;5-7),	(5-1;5-2;5-4;5-8),
	(5-1;5-2;5-4;5-9),	(5-1;5-2;5-7;5-8),
	(5-1;5-2;5-7;5-9),	(5-1;5-2;5-8;5-9),
	(5-1;5-4;5-7;5-8),	(5-1;5-4;5-7;5-9),
	(5-1;5-4;5-8;5-9),	(5-1;5-7;5-8;5-9),
	(5-2;5-4;5-7;5-8),	(5-2;5-4;5-7;5-9),
	(5-2;5-4;5-8;5-9),	(5-2;5-7;5-8;5-9),
	(5-4;5-7;5-8;5-9)	

Na Figura 33 apresentamos o volume de tráfego para a situação normal e o volume máximo para a queda de 4 enlaces conectados ao mesmo nó.

Figura 33 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 4 enlaces

Novamente a queda de um número maior de enlaces, leva ao surgimento de um volume maior de tráfego nos enlaces restantes. Nesta situação, 23 enlaces apresentam tráfegos máximos maiores que 20 Mb/s, dos quais 4 possuem tráfegos maiores que 25 Mb/s. A descrição de todos os valores máximos de tráfego assim como as condições correspondentes encontram-se descritos na Tabela 15.

Tabela 15 - Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 4 enlaces

Enlace	Volume Máximo (Mb/s)	Enlaces Inoperantes
(1-2)	23,94	(5-2;5-4;5-8;5-9)
(1-5)	17,6	(5-2;5-4;5-8;5-9)
(2-1)	21,12	(5-2;5-4;5-8;5-9)
(2-3)	21,12	(4-2;4-5;4-6;4-10)
(2-4)	26,75	(5-4;5-7;5-8;5-9)
(2-5)	22,53	(4-3;4-5;4-6;4-10)
(3-2)	24,64	(4-2;4-5;4-6;4-10)
(3-4)	17,6	(4-2;4-5;4-6;4-10)
(4-2)	23,23	(5-4;5-7;5-8;5-9)
(4-3)	21,82	(4-2;4-5;4-6;4-10)
(4-5)	21,82	(4-2;4-3;4-6;4-10)
(4-6)	21,82	(4-2;4-3;4-5;4-10)
(4-10)	24,64	(5-1;5-2;5-4;5-7)
(5-1)	22,53	(5-2;5-4;5-8;5-9)
(5-2)	22,53	(5-1;5-4;5-8;5-9)
(5-4)	26,75	(5-1;5-2;5-8;5-9)
(5-7)	23,94	(4-2;4-3;4-5;4-10)
(5-8)	11,26	(5-1;5-4;5-7;5-9)
(5-9)	23,23	(4-2;4-3;4-5;4-6)
(6-4)	19,01	(5-1;5-2;5-4;5-8)
(6-7)	23,94	(4-2;4-3;4-5;4-10)
(7-5)	25,34	(4-2;4-3;4-5;4-10)
(7-6)	21,12	(4-2;4-3;4-5;4-10)
(8-5)	7,744	(5-2;5-4;5-7;5-9)
(8-9)	10,56	(5-1;5-2;5-4;5-9)
(9-5)	24,64	(4-2;4-3;4-5;4-6)
(9-8)	9,152	(5-1;5-2;5-4;5-8)
(9-10)	26,75	(5-1;5-2;5-4;5-7)
(10-4)	26,75	(5-1;5-2;5-4;5-7)
(10-9)	24,64	(4-2;4-3;4-5;4-6)

8.3.5 Queda de 5 Enlaces

Neste item, apresentamos a análise de todos casos relativos à queda de 5 enlaces conectados ao mesmo nó. Para tal situação, existem 7 possíveis condições:

Tabela 16 - Situações possíveis para queda de 5 enlaces

Nó	Enlaces
4 ⇒	(4-2;4-3;4-5;4-6;4-10)
5 ⇒	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9), (5-1;5-4;5-7;5-8;5-9), (5-1;5-2;5-7;5-8;5-9), (5-1;5-2;5-4;5-8;5-9), (5-1;5-2;5-4;5-7;5-9), (5-1;5-2;5-4;5-7;5-8)

Na Figura 34 apresentamos o volume de tráfego para a situação normal e o volume máximo para a queda de 5 enlaces conectados ao mesmo nó.

Figura 34 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 5 enlaces

Nesta situação, dois fatos chamam a atenção. Primeiramente, este caso corresponde ao caso que apresenta o maior volume de tráfego de todos os testes realizados. Nele, o enlace (6-4) apresenta um volume máximo de tráfego igual a 28,86 Mb/s para a queda dos enlaces (5-1;5-2;5-4;5-8;5-9). Ao mesmo tempo em que este caso apresenta o maior volume de tráfego, ele também apresenta o menor acréscimo de tráfego para todos os casos vistos até então. Conforme podemos notar, os enlaces (2-3), (3-2), (3-4) e (4-3) apresentam um pequeno acréscimo em seu volume de tráfego para situações anormais. Isto acontece pois estes enlaces são pouco exigidos após o estabelecimento de novas rotas para as mensagens após a queda de 5 enlaces. A descrição de todos os valores máximos de tráfego assim como as condições correspondentes encontram-se descritos na Tabela 17.

Tabela 17 – Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 5 enlaces

Enlace	Volume Máximo (Mb/s)	Enlaces Inoperantes
(1-2)	28,16	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(1-5)	19,01	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(2-1)	23,94	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(2-3)	6,336	(4-2;4-3;4-5;4-6;4-10)
(2-4)	26,75	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(2-5)	19,01	(5-1;5-4;5-7;5-8;5-9)
(3-2)	6,336	(4-2;4-3;4-5;4-6;4-10)
(3-4)	5,632	(5-1;5-2;5-7;5-8;5-9)
(4-2)	23,23	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(4-3)	6,336	(5-1;5-2;5-7;5-8;5-9)
(4-5)	19,01	(5-1;5-2;5-7;5-8;5-9)
(4-6)	25,34	(5-1;5-2;5-4;5-8;5-9)
(4-10)	24,64	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(5-1)	25,34	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(5-2)	25,34	(5-1;5-4;5-7;5-8;5-9)
(5-4)	25,34	(5-1;5-2;5-7;5-8;5-9)
(5-7)	25,34	(5-1;5-2;5-4;5-8;5-9)
(5-8)	25,34	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(5-9)	25,34	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8)
(6-4)	28,86	(5-1;5-2;5-4;5-8;5-9)
(6-7)	23,23	(5-1;5-2;5-4;5-8;5-9)
(7-5)	19,01	(5-1;5-2;5-4;5-8;5-9)
(7-6)	28,16	(5-1;5-2;5-4;5-8;5-9)
(8-5)	19,01	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(8-9)	27,46	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(9-5)	19,01	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8)
(9-8)	22,53	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(9-10)	26,75	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(10-4)	26,75	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(10-9)	23,23	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)

8.3.6 Queda de 6 Enlaces

Finalmente, apresentamos a última situação possível de queda de enlaces, a queda de 6 enlaces. Esta situação corresponde à queda de todos os enlaces ligados ao nó 5 da rede de comunicação:

Tabela 18 - Situações possíveis para queda de 6 enlaces

Nó	Enlaces
5 ⇒	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)

Na Figura 35 apresentamos o volume de tráfego para a situação normal e o volume máximo para a queda de 6 enlaces conectados ao nó 5.

Figura 35 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação após a queda de 6 enlaces

Ao contrário das outras situações onde o aumento de enlaces inoperantes levava ao aumento do tráfego máximo, esta situação possui níveis de tráfego máximo menores que os casos anteriores. Isto acontece pois a queda dos 6 enlaces conectados ao nó 5 da rede de comunicação corresponde ao isolamento, em termos de comunicação, da subestação que compreende as barras 5 e 6 do SEP. Com isso, todos os agentes localizados nesta subestação (15 agentes) deixam de se comunicar, reduzindo a quantidade de pacotes na rede de comunicação, e conseqüentemente, o nível máximo de tráfego observado. Nesta situação, 13 enlaces possuem os seus níveis de tráfegos inalterados. A descrição de todos os valores máximos de tráfego assim como as condições correspondentes encontram-se descritos na Tabela 19.

Tabela 19 – Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para a queda de 6 enlaces

Enlace	Volume Máximo (Mb/s)	Enlaces Inoperantes
(1-2)	6,336	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(1-5)	4,224	—
(2-1)	7,04	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(2-3)	4,928	—
(2-4)	10,56	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(2-5)	7,04	—
(3-2)	4,928	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(3-4)	4,224	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(4-2)	11,26	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(4-3)	4,928	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(4-5)	9,856	—
(4-6)	9,152	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(4-10)	11,26	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(5-1)	5,632	—
(5-2)	7,744	—
(5-4)	9,856	—
(5-7)	7,04	—
(5-8)	6,336	—
(5-9)	7,04	—
(6-4)	9,152	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(6-7)	5,632	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(7-5)	5,632	—
(7-6)	5,632	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(8-5)	4,928	—
(8-9)	5,632	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(9-5)	5,632	—
(9-8)	5,632	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(9-10)	8,448	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(10-4)	11,26	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(10-9)	8,448	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)

8.3.7 Análise Global

Uma vez feita a análise individual de cada possível situação de contingência, apresentamos uma síntese destes testes na Figura 36, destacando os volumes de tráfego máximo utilizados por todos os enlaces para o conjunto completo de 119 testes.

Figura 36 – Volume de tráfego máximo presente nos enlaces da rede de comunicação relativo ao conjunto total de testes

A Figura 36 apresenta algumas características importantes. O enlace (8-5) apresenta o menor valor de tráfego máximo dentre todos os enlaces com 19,01 Mb/s. O enlace (7-6) apresenta o maior crescimento de volume de tráfego frente às diversas contingências. Durante a situação normal este enlace possui um volume de tráfego igual a 1,408 Mb/s passando para 28,16 Mb/s durante a queda dos enlaces (5-1;5-2;5-4;5-8;5-9), um aumento de 20 vezes. Este é um fato que devemos ter muita atenção durante o projeto da rede de comunicação. Caso tivéssemos assumido que qualquer enlace devesse comportar um acréscimo de 100% da sua quantidade normal de tráfego, teríamos a falha total do sistema, visto a grande quantidade de tráfego que é re-roteada para o caso em questão.

Conforme já havíamos notado, o volume máximo de tráfego é igual a 28,86 Mb/s apresentado pelo enlace (6-4) para a queda dos enlaces (5-1;5-2;5-4;5-8;5-9). Uma das características que notamos ao longo desta bateria de testes foi que o aumento do número de enlaces inoperantes sempre levou ao aumento do volume máximo de tráfego. Esta afirmação é verdadeira quando analisamos os enlaces em termos globais, isto é, estamos apenas procurando o valor de tráfego máximo. Porém, quando olhamos os enlaces individualmente, percebemos que situações como a queda de 3 enlaces levou a um valor de tráfego máximo maior para certos enlaces. Isto fica evidente ao analisarmos a Tabela 20. Como podemos ver, por exemplo, o enlace (1-5) apresenta seu volume de tráfego máximo (19,71 Mb/s) para uma queda de 3 enlaces. Para os casos de queda de 4

e 5 enlaces, este valor é igual a 17,6 e 19,01 Mb/s respectivamente. Os enlaces (2–5), (3–4) e (4–5) apresentaram comportamento semelhante. Baseado nesta constatação, podemos afirmar então que a procura pelo valor de tráfego máximo para determinação da largura de banda ideal da rede de comunicação deve ser realizada de maneira cuidadosa, levando-se em conta as diferentes situações de contingência que a rede de comunicação pode sofrer.

Tabela 20 – Volume de tráfego máximo e indicação da contingência correspondente para todos os enlaces para o conjunto completo de testes

Enlace	Volume Máximo (Mb/s)	Enlaces Inoperantes
(1–2)	28,16	(5–2;5–4;5–7;5–8;5–9)
(1–5)	19,71	(2–3;2–4;2–5)
(2–1)	23,94	(5–2;5–4;5–7;5–8;5–9)
(2–3)	21,12	(4–2;4–5;4–6;4–10)
(2–4)	26,75	(5–4;5–7;5–8;5–9)
(2–5)	22,53	(4–5;4–6;4–10)
(3–2)	24,64	(4–2;4–5;4–6;4–10)
(3–4)	19,71	(2–1;2–4;2–5)
(4–2)	23,23	(5–4;5–7;5–8;5–9)
(4–3)	21,82	(4–2;4–5;4–6;4–10)
(4–5)	22,53	(4–2;4–3;4–6)
(4–6)	25,34	(5–1;5–2;5–4;5–8;5–9)
(4–10)	24,64	(5–1;5–2;5–4;5–7)
(5–1)	25,34	(5–2;5–4;5–7;5–8;5–9)
(5–2)	25,34	(5–1;5–4;5–7;5–8;5–9)
(5–4)	26,75	(5–1;5–2;5–8;5–9)
(5–7)	25,34	(5–1;5–2;5–4;5–8;5–9)
(5–8)	25,34	(5–1;5–2;5–4;5–7;5–9)
(5–9)	25,34	(5–1;5–2;5–4;5–7;5–8)
(6–4)	28,86	(5–1;5–2;5–4;5–8;5–9)
(6–7)	23,94	(4–2;4–3;4–5;4–10)
(7–5)	25,34	(4–2;4–3;4–5;4–10)
(7–6)	28,16	(5–1;5–2;5–4;5–8;5–9)
(8–5)	19,01	(5–1;5–2;5–4;5–7;5–9)
(8–9)	27,46	(5–1;5–2;5–4;5–7;5–9)
(9–5)	24,64	(4–2;4–3;4–5;4–6)
(9–8)	22,53	(5–1;5–2;5–4;5–7;5–9)
(9–10)	26,75	(5–1;5–2;5–4;5–7)
(10–4)	26,75	(5–1;5–2;5–4;5–7)
(10–9)	24,64	(4–2;4–3;4–5;4–6)

A descrição de todos os valores calculados neste conjunto de testes encontra-se relacionada na Tabela 44 do Apêndice C.

8.4 Avaliação do Tempo de Trânsito dos Pacotes entre os Nós da Rede de Comunicação

Baseado na bateria de testes realizada anteriormente, todos os enlaces da rede de comunicação foram configurados para uma largura de banda de 30 Mb/s. Uma vez que a largura de banda foi determinada, precisamos agora analisar o tempo máximo de trânsito dos pacotes observado na rede de comunicação. Como já levantado, uma largura de banda mínima é necessária para o sistema de comunicação sobreviver a situações anormais. Entretanto, não há sentido em ter-se largura de banda suficiente, se a topologia da rede não for redundante o suficiente durante situações anormais. Se após um defeito uma mensagem levar um tempo muito maior para alcançar seu destino, a duplicação ou a inserção de novos enlaces na topologia da rede deve ser considerada.

Para esta análise, mais uma vez, utilizamos o conjunto de 119 testes já relacionados anteriormente, porém com todos os enlaces ajustados para uma largura de banda de 30 Mb/s. O tempo de trânsito entre nós adjacentes foi calculado e é apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Tempo de trânsito máximo entre os nós adjacentes da rede de comunicação relativo ao conjunto total de testes

Tabela 21 – Tempo de trânsito máximo e indicação da contingência correspondente para todos os nós adjacentes da rede de comunicação para o conjunto completo total de testes

Nós	Tempo de Trânsito Normal (ms)	Tempo de Trânsito Máximo (ms)	Enlaces Inoperantes
(1-2)	2,023	8,555	(2-1;2-4;2-5)
(1-5)	2,023	12,700	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(2-1)	2,023	8,393	(2-1;2-4;2-5)
(2-3)	2,023	8,358	(2-3;2-4;2-5)
(2-4)	2,023	8,371	(4-2;4-3;4-5;4-10)
(2-5)	2,023	10,420	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(3-2)	2,023	8,604	(2-3;2-4;2-5)
(3-4)	2,023	10,660	(4-2;4-3;4-5;4-10)
(4-2)	2,023	8,250	(4-2;4-3;4-5;4-10)
(4-3)	2,023	10,280	(4-2;4-3;4-5)
(4-5)	2,023	8,192	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(4-6)	2,023	10,280	(4-2;4-5;4-6;4-10)
(4-10)	2,023	10,280	(4-2;4-5;4-6;4-10)
(5-1)	2,023	12,300	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(5-2)	2,023	10,260	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(5-4)	2,023	8,244	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(5-7)	2,023	12,310	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(5-8)	2,023	12,320	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(5-9)	2,023	10,300	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(6-4)	2,023	10,590	(4-2;4-5;4-6;4-10)
(6-7)	2,023	6,259	(6-7)
(7-5)	2,023	12,580	(5-1;5-2;5-4;5-7;5-9)
(7-6)	2,023	6,235	(6-7)
(8-5)	2,023	12,690	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(8-9)	2,023	8,383	(9-5;9-8)
(9-5)	2,023	10,550	(5-2;5-4;5-7;5-8;5-9)
(9-8)	2,023	8,266	(9-5;9-8)
(9-10)	2,023	8,258	(9-5;9-10)
(10-4)	2,023	10,550	(4-2;4-5;4-6;4-10)
(10-9)	2,023	8,411	(9-5;9-10)

Como podemos observar, o tempo de trânsito entre dois nós adjacentes pode aumentar em até 6 vezes para este sistema de comunicação (enlaces (1-5) e (5-1)). Para este caso, o tempo normal de trânsito de um pacote do nó 1 ao nó 5 é de 2,023 ms, subindo para 12,700 ms quando os enlaces (5-1;5-2;5-4;5-7;5-9) estão inoperantes. Anderson (Anderson, 1998) sugere que sistemas de teleproteção devem possuir um tempo máximo de atraso de 30 ms, fato que nos leva a concluir que a topologia do sistema de comunicação é suficiente para atender as exigências de aplicações em tempo-real mesmo em situações anormais. Caso esta sugestão não fosse atendida, enlaces alternativos deveriam ser adicionados à rede de comunicação para provimento da redundância necessária e conseqüentemente, um tempo menor de trânsito. A descrição de todos os testes encontra-se na Tabela 45 presente no Apêndice C.

8.5 Resumo

Neste capítulo, apresentamos a primeira sequência de testes para os agentes para proteção de SEPs. Nela nós nos concentramos na análise e determinação da rede de comunicação a ser utilizada pelos agentes. A rede de comunicação projetada consiste numa rede de comunicação com a mesma topologia das LTs do SEP. Ela baseia-se nos protocolos UDP / IP e após uma sequência de 119 testes, determinamos que esta rede deve apresentar uma largura de banda de 30 Mb/s. Conforme destacamos, esta largura de banda é suficiente para manter ativa a comunicação entre os agentes para situações onde um ou mais enlaces estejam inoperantes. Após o cálculo desta largura de banda, procedemos para o cálculo do tempo máximo de trânsito dos pacotes entre nós adjacentes. Este cálculo é importantíssimo pois conforme veremos, este valor estará diretamente relacionado ao tempo de detecção da falta por parte dos agentes. A rede de comunicação em questão apresentou um tempo máximo de trânsito de 12,700 ms, valor condizente aos valores sugeridos aos modernos sistemas de teleproteção. Para o próximo capítulo, apresentaremos os primeiros testes relativos aos agentes para proteção primária.

Capítulo 9

A Utilização de Agentes para Proteção Primária de Linhas de Transmissão

9.1 Introdução

Este capítulo descreve a utilização de agentes para a proteção primária de linhas de transmissão através de uma rede intranet. Como será mostrado, agentes localizados em IEDs podem usar a comunicação para assegurar a proteção primária de linhas de transmissão sob uma grande quantidade de situações operacionais.

9.2 Trabalhos Relacionados

Poucas publicações relativas ao uso de agentes para a área de proteção de SEPs são encontrados na literatura. Conforme citado no capítulo 2, Tomita et al (Tomita et al., 1998) foram os primeiros a propor um sistema de proteção cooperativo utilizando agentes. Estes agentes cooperaram para melhorar as proteções primária, de retaguarda e adaptativa tradicionais. Coury et al (Coury et al., 2001) e (Wang et al., 2002b) discutem o uso de relés agentes diferenciais para a proteção primária de linhas multi-terminais. Os trabalhos em questão visam a aplicação de um novo conceito baseado em relés agentes para melhoria da proteção de sistemas elétricos. A aplicação de agentes atuando com uma rede de comunicação para a adaptação de ajustes de relés para linhas com três terminais foi apresentado. Os resultados mostraram que a nova proposta altera os ajustes do relé para assegurar um correto desempenho sob uma grande variedade de condições operacionais, o que é uma melhoria se comparado aos relés com ajuste fixo. Além disso, uma diminuição considerável no tempo de extinção da falta foi observado.

Relés diferenciais de corrente são largamente utilizados para a proteção de barramentos, geradores e transformadores. Porém, quando estes são aplicados a linhas de transmissão, problemas surgem devido à distância entre os terminais das linhas, fa-

zendo com que um canal de comunicação seja necessário. Os canais geralmente usados para este propósito são OPLAT, microondas, cabos de comunicação ou fibras ópticas (Elmore, 2000a). A técnica diferencial se baseia no fato que sob condições normais a soma das correntes entrando em uma fase de uma linha de transmissão é igual a corrente de carregamento para esta fase. Se a soma exceder um limite pré-determinado, uma falta pode existir dentro da zona de proteção.

Problemas adicionais podem surgir devido a uma sincronização imprópria dos dados provenientes dos terminais de uma linha quando um enlace de comunicação é utilizado (Kwong, 1988). Algumas publicações recentes, relacionadas a proteção diferencial de linhas de transmissão, tentam solucionar este problema. Redfern et al (Redfern e Chiwaya, 1994) propõem um sistema de proteção de diferencial de corrente usando as capacidades limitadas de um canal de comunicação de voz com resultados satisfatórios. Li et al (Li et al., 1997) propõem o uso do sistema de posicionamento global (GPS) para a sincronização de dados. Os resultados mostram um sistema de proteção diferencial preciso

9.3 A Arquitetura do Agente para Proteção Diferencial

A Figura 38 ilustra o agente para proteção diferencial. Deve ser enfatizado que, como uma rede de comunicação está disponível, a lógica diferencial é considerada como o principal método para a proteção da linha de transmissão. A lógica interna deste agente pode ser vista como um sistema dividido em um esquema básico para o cálculo da corrente diferencial acrescido de algumas características complementares.

Figura 38 - O mecanismo dos agentes para a proteção diferencial

9.3.1 Esquema para o Cálculo da Corrente Diferencial

Após passarem através de transformadores de corrente (TCs), como mostrado na Figura 38, as três correntes de fase são digitalizadas em 1 kHz. Os sinais digitalizados são então processados usando a Transformada Discreta de Fourier (TDF) de um ciclo para extração do componente de 60 Hz das correntes. Após o processamento dos valores amostrados, os fasores de corrente são transmitidos através da rede de comunicação em direções opostas e a lógica diferencial é calculada em todos os terminais da linha. Se uma falta interna for detectada, os disjuntores associados com os agentes serão acionados para isolar a linha de transmissão protegida.

Como podemos ver, o método proposto transmite os fasores das correntes ao invés dos valores amostrados. A maior vantagem desta abordagem é que se alguns valores de fasores forem perdidos no processo de transmissão, o método diferencial não será invalidado nos terminais da linha.

Para a implementação da lógica diferencial, utilizamos a lógica diferencial percentual. Os relés envolvidos neste tipo de proteção comparam uma corrente de operação (também chamada de corrente diferencial) com uma corrente de restrição. A corrente de operação, I_{OP_prim} , é definida como a magnitude da soma dos fasores das correntes que entram na linha de transmissão:

$$I_{OP_prim} = |\vec{I}_X + \vec{I}_Y| \quad (1)$$

I_{OP_prim} é proporcional a corrente de falta para faltas internas à LT e aproxima-se idealmente de zero para qualquer outra condição. Na prática esta corrente possui um pequeno valor que é correspondente à corrente de carregamento da LT.

A corrente de restrição é calculada segundo a próxima equação:

$$I_{RT_prim} = K(|\tilde{I}_X| + |\tilde{I}_Y|) \quad (2)$$

As correntes $\tilde{I}_X$ e $\tilde{I}_Y$ podem ser visualizadas na Figura 39.

Figura 39 – Proteção Diferencial de uma LT

Baseado nas correntes I_{OP_prim} e I_{RT_prim} , definimos a condição de operação do relé como:

$$I_{OP_prim} \geq K I_{RT_prim} \quad (3)$$

onde K é um coeficiente constante que representa a inclinação da característica do relé. Adicionada a esta característica, acrescentamos uma condição para que o relé somente atue com uma mínima corrente de disparo, K_0 :

$$I_{OP_prim} = K_0 \quad (4)$$

A Figura 40 mostra a característica diferencial percentual de operação do relé resultante das equações 3 e 4.

Figura 40 – Característica percentual diferencial

9.3.2 Características Complementares

Algumas características complementares para o relé baseado em agentes são apresentadas abaixo:

- O sistema agente de proteção diferencial deve trabalhar simultaneamente com um esquema de proteção de distância. Isto significa que os agentes devem constantemente trocar informações relativas ao estado da rede de comunicação, e caso esta rede venha a falhar, os agentes devem alterar a sua lógica de funcionamento para a proteção de distância tradicional.
- O sistema agente deve ser capaz de detectar falhas de equipamentos (TPs, TCs, disjuntores, etc.) através de medidas. No caso de falha de um equipamento local, o agente deve coletar/enviar informações de/para outros equipamentos através da rede de comunicação. Se um disjuntor falhar, por exemplo, um sinal de abertura deve ser enviado pela rede de comunicação para os terminais mais próximos para que os agentes responsáveis por esses terminais abram seus respectivos disjuntores.
- O sistema agente deve ser capaz de detectar falhas no canal de comunicação assim como falhas do sistema GPS. Em situações extremas relativas ao primeiro caso, a troca para um sistema tradicional de distância deve ser feita. No segundo caso, outros métodos baseados em *software* podem ser aplicados para a sincronização dos dados.

9.4 Resultados do Sistema Agente para Proteção Diferencial

Utilizando o SEP IEEE de 14 barras ilustrado no capítulo 7, um conjunto de 36 simulações foi elaborado para teste dos agentes para proteção primária. Durante estes testes, assumimos que todas as faltas eram trifásicas, e que três parâmetros foram variados: LT em falta, localização da falta dentro da LT, ângulo de incidência da falta e resistência de falta. Os valores para estes parâmetros foram:

Tabela 22 – Conjunto de parâmetros utilizados para testes

LT em Falta	Localização da Falta dentro da LT	Ângulo de Falta (°)	Resistência de Falta (Ω)
LT 1-2	10%	0	1
LT 4-5	50%	90	100
LT 13-14	90%		

A Tabela 23 mostra o processo de detecção diferencial realizada pelos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 para uma falta trifásica ocorrida no instante 0,29960 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 e resistência de falta de 100 Ω . Todos os valores e cálculos mostrados referem-se aos fasores da corrente A.

Esta tabela evidencia o funcionamento da lógica diferencial percentual em conjunto com a rede de comunicação. Inicialmente, no instante 0,294 s, os agentes PRIM_01-02 e PRIM_02-01 responsáveis pela proteção diferencial da LT 1-2 realizam o processamento das correntes vistas em seus terminais. Após o cálculo dos fasores de corrente, estes agentes guardam em uma lista estes valores juntamente com o instante de amostragem e enviam uma cópia desta informação ao agente remoto. Esta mensagem, conforme explicado no capítulo anterior, é uma mensagem do tipo GET_RESPONSE com tamanho 88 bytes. Conforme podemos ver, uma mensagem com origem em PRIM_01-02 com destino a PRIM_02-01 leva 2,14 ms para ser transmitida e uma mensagem com origem em PRIM_02-01 com destino a PRIM_01-02 leva 2,09 ms para ser transmitida, chegando respectivamente nos instantes 0,29614 s e 0,29609s. Como as duas mensagens são recebidas entre dois ciclos de execução do sistema EPOCHS, elas são apenas processadas no próximo ciclo de execução (instante 0,297 s). Finalmente, no instante 0,297 s, os dois agentes executam a lógica diferencial percentual, calculando as correntes I_{OP_prim} e I_{RT_prim} . Para este instante $I_{OP_prim} \leq I_{RT_prim}$ e, portanto, nenhuma falta é detectada. Após este instante, o sistema continua a funcionar obedecendo à mesma sequência de eventos, e a partir do instante de processamento 0,307 s (conforme destacado em cinza na tabela), os agentes PRIM_01-02 e PRIM_02-01 calculam que $I_{OP_prim} \geq I_{RT_prim}$ e, conseqüentemente, detectam a falta originada no instante 0,29960 s.

Tabela 23 – Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,29960 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω

	Instante de amostragem (s)	Instante de Recebimento (s) Agente		Instante de processamento (s)	I _{OP_prim} (A)	K * I _{RT_prim} (A)
		PRIM_01-02	PRIM_02-01			
<i>pré – falta</i>	0,294	0,29609	0,29614	0,299	0,0140	0,0744
	0,295	0,29709	0,29714	0,298	0,0140	0,0744
	0,296	0,29809	0,29814	0,299	0,0140	0,0744
	0,297	0,29909	0,29914	0,300	0,0140	0,0744
	0,298	0,30009	0,30014	0,301	0,0140	0,0744
	0,299	0,30109	0,30114	0,302	0,0140	0,0744
<i>pós – falta</i>	0,300	0,30209	0,30214	0,303	0,0140	0,0744
	0,301	0,30309	0,30314	0,304	0,0139	0,0744
	0,302	0,30409	0,30414	0,305	0,0102	0,0745
	0,303	0,30509	0,30514	0,306	0,0327	0,0751
	0,304	0,30609	0,30614	0,307	0,1259	0,0809
	0,305	0,30709	0,30714	0,308	0,2601	0,0921
	0,306	0,30809	0,30814	0,309	0,4093	0,1053

Na próxima tabela, Tabela 24, podemos visualizar o mesmo processo de detecção realizado pelos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1, porém para uma falta ocorrida no instante 0,30377 s (ângulo de falta de 90°) a 10% da LT 1-2 com uma resistência de falta de 100Ω. Como já esperado, esta detecção é realizada mais rapidamente devido ao ângulo de incidência de falta ser de 90°. Nesta situação o sistema agente necessitou apenas de 4 amostras pós-falta para realizar a detecção da falta, indicando a sua presença no instante 0,310 s.

Tabela 24 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,3039 s (ângulo de falta de 90°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω

	Instante de amostragem (s)	Instante de Recebimento (s) Agente		Instante de processamento (s)	I _{OP_prim} (A)	K * I _{RT_prim} (A)
		PRIM_01-02	PRIM_02-01			
<i>pré - falta</i>	0,299	0,30109	0,30114	0,302	0,0140	0,0744
	0,300	0,30209	0,30214	0,303	0,0140	0,0744
	0,301	0,30309	0,30314	0,304	0,0140	0,0744
	0,302	0,30409	0,30414	0,305	0,0140	0,0744
	0,303	0,30509	0,30514	0,306	0,0140	0,0744
<i>pós - falta</i>	0,304	0,30609	0,30614	0,307	0,0140	0,0744
	0,305	0,30709	0,30714	0,308	0,0140	0,0744
	0,306	0,30809	0,30814	0,309	0,0574	0,0786
	0,307	0,30909	0,30914	0,310	0,2330	0,0926
	0,308	0,31009	0,31014	0,311	0,3690	0,1026
	0,309	0,31109	0,31114	0,312	0,4445	0,1076

Finalmente, apresentamos nas Tabelas 25, 26 e 27 a síntese de todos os testes realizados conforme os parâmetros mostrados na Tabela 22.

Tabela 25 – Testes da proteção primária relativa a LT 1-2

Localização	Resistência de Falta (Ω)	Ângulo de Falta (°)	Início Falta (s)	Detecção da Falta (s)	Número de amostras pós-falta
10%	1	0	0,29960	0,307	8
10%	1	90	0,30377	0,309	6
10%	100	0	0,29960	0,307	8
10%	100	90	0,30377	0,310	7
50%	1	0	0,29960	0,307	8
50%	1	90	0,30377	0,309	6
50%	100	0	0,29960	0,307	8
50%	100	90	0,30377	0,310	7
90%	1	0	0,29960	0,307	8
90%	1	90	0,30377	0,309	6
90%	100	0	0,29960	0,307	8
90%	100	90	0,30377	0,310	7

Tabela 26 – Testes da proteção primária relativa a LT 4-5

Localização	Resistência de Falta (Ω)	Ângulo de Falta ($^\circ$)	Início Falta (s)	Deteção da Falta (s)	Número de amostras pós-falta
10%	1	0	0,29970	0,308	9
10%	1	90	0,30387	0,310	7
10%	100	0	0,29970	0,308	9
10%	100	90	0,30387	0,310	7
50%	1	0	0,29970	0,308	9
50%	1	90	0,30387	0,310	7
50%	100	0	0,29970	0,308	9
50%	100	90	0,30387	0,310	7
90%	1	0	0,29970	0,308	9
90%	1	90	0,30387	0,310	7
90%	100	0	0,29970	0,308	9
90%	100	90	0,30387	0,310	7

Tabela 27 – Testes da proteção primária relativa a LT 13-14

Localização	Resistência de Falta (Ω)	Ângulo de Falta ($^\circ$)	Início Falta (s)	Deteção da Falta (s)	Número de amostras pós-falta
10%	1	0	0,30145	0,309	8
10%	1	90	0,30561	0,312	7
10%	100	0	0,30145	0,309	8
10%	100	90	0,30561	0,313	8
50%	1	0	0,30145	0,309	8
50%	1	90	0,30561	0,312	7
50%	100	0	0,30145	0,309	8
50%	100	90	0,30561	0,313	8
90%	1	0	0,30145	0,309	8
90%	1	90	0,30561	0,312	7
90%	100	0	0,30145	0,309	8
90%	100	90	0,30561	0,313	8

Conforme podemos observar por estas tabelas a localização da falta não influencia no resultado final do sistema agente para proteção primária baseado na lógica diferencial. Contudo, o ângulo de falta e a resistência de falta para alguns casos influenciam no tempo de detecção, atrasando em uma ou duas amostras o tempo total de detecção. Isso acontece pois faltas com ângulo de falta igual a 90° possuem um pico de corrente maior que as demais faltas, levando assim a uma caracterização mais rápida deste tipo de defeito do que curtos-circuitos com ângulo de falta igual a 0° . A resistência de falta por sua vez diminui o valor de pico de corrente conforme se aumenta seu valor, e conseqüentemente, mais lento fica o processo de identificação da falta.

Uma outra característica que podemos analisar é o efeito da queda de um enlace no desempenho do sistema agente. Com esta situação em mente, apresentamos a Tabela 28. Neste caso, todos os parâmetros utilizados para a construção do caso da

Tabela 23 foram conservados, porém o enlace (1-2) que era o enlace responsável pela troca de informações entre os agentes PRIM_01-02 e PRIM_02-01 saiu de operação.

Tabela 28 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace (1-2) inoperante

	Instante de amostragem (s)	Instante de Recebimento (s) Agente		Instante de processamento (s)	I _{OP} (A)	K*I _{RT} (A)
		PRIM_01-02	PRIM_02-01			
<i>pré – falta</i>	0,294	0,29833	0,29835	0,299	0,0140	0,0744
	0,295	0,29933	0,29935	0,300	0,0140	0,0744
	0,296	0,30033	0,30035	0,301	0,0140	0,0744
	0,297	0,30133	0,30135	0,302	0,0140	0,0744
	0,298	0,30233	0,30235	0,303	0,0140	0,0744
	0,299	0,30333	0,30335	0,304	0,0140	0,0744
<i>pós – falta</i>	0,300	0,30433	0,30435	0,305	0,0140	0,0744
	0,301	0,30533	0,30535	0,306	0,0139	0,0744
	0,302	0,30633	0,30635	0,307	0,0102	0,0745
	0,303	0,30733	0,30735	0,308	0,0327	0,0751
	0,304	0,30833	0,30835	0,309	0,1259	0,0809
	0,305	0,30933	0,30935	0,310	0,2601	0,0921
	0,306	0,31033	0,31035	0,311	0,4093	0,1053

Conforme podemos ver, a troca de informações agora sofre um atraso devido à queda do enlace. Enquanto no exemplo original a troca de informações entre os agentes PRIM_01-02 e PRIM_02-01 levava 2,14 ms no sentido 1→ 2 e 2,09 ms no sentido 2→ 1, agora leva 4,35 ms e 4,33 ms respectivamente. Nesta situação as mensagens que eram trocadas diretamente entre os nós 1 e 2, agora são inicialmente transmitidas do nó 1 ao nó 5, e do nó 5 ao nó 2 e vice-versa. Neste caso, a falta foi identificada corretamente 2 ms mais tarde que no caso da Tabela 23, no instante 0,309 s.

Conforme podemos notar no caso anterior, a queda do enlace atrasou o tempo de detecção, porém não inviabilizou sua determinação. Isto se deve fundamentalmente ao cálculo da largura de banda para utilização pelos agentes realizado no capítulo 8. Caso este cálculo fosse errôneo, ou simplesmente adotássemos um valor de largura de banda que não atendesse a esta contingência, a perda de pacotes poderia ocorrer e, conseqüentemente, um maior atraso ou até a falha total do sistema de proteção baseado em agentes iria ocorrer. Devido à análise já efetuada no capítulo 8, a introdução de novos testes com um número maior de queda de enlaces será suprimida. Conforme exposto neste capítulo, o tempo máximo de trânsito de uma mensagem entre dois nós adjacentes para a pior contingência do sistema de comunicação é igual 12,700 ms, fato que nos leva a concluir que os agentes primários estarão sujeitos a este mesmo atraso.

Continuando a série de testes dos agentes primários, apresentaremos novamente o caso relatado na Tabela 23. Porém, desta vez, introduziremos artificialmente um tráfego adicional tipo UDP entre os nós 1 e 2. Em uma situação normal, o enlace (1-2) possui um volume de tráfego de 4,224 Mb/s. Conforme foi calculado no capítulo 8, o enlace 1-2 foi projetado com uma largura de banda de 30 Mb/s. Ou seja, apenas 14% da sua capacidade é ocupada durante o funcionamento normal do sistema. Para este novo teste então, criaremos um tráfego entre os nós 1 e 2 com um volume igual a 26,076 Mb/s. Desta maneira, o enlace (1-2) receberá uma quantidade de tráfego equivalente a 101% da sua quantidade máxima de transmissão. Neste cenário, 1% dos pacotes inseridos no nó 1 serão descartados.

Tabela 29 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace (1-2) com 1% de sobrecarga

	Instante de amostragem (s)	Instante de Recebimento (s) Agente		Instante de processamento (s)	
		PRIM_01-02	PRIM_02-01	PRIM_01-02	PRIM_02-01
<i>pré - falta</i>	0,294	0,29609	0,29826	0,297	0,299
	0,295	0,29709	0,29920	0,298	0,300
	0,296	0,29809	0,30014	0,299	0,301
	0,297	0,29909	0,30135	0,300	0,302
	0,298	0,30009	0,30229	0,301	0,303
	0,299	0,30109	0,30323	0,302	0,304
<i>pós - falta</i>	0,300	0,30209	0,30417	0,303	0,305
	0,301	0,30309	0,30537	0,304	0,306
	0,302	0,30409	0,30632	0,305	0,307
	0,303	0,30509	0,30726	0,306	0,308
	0,304	0,30609	0,30820	0,307	0,309
	0,305	0,30709	0,30940	0,308	0,310

Para estas condições, podemos afirmar que o pequeno aumento de tráfego alterou apenas o tempo final de detecção do agente PRIM_02-01. Os pacotes anteriormente levavam 2,14 ms para transitar entre o nó 1 e o nó 2. Nesta situação, estes pacotes agora levaram um tempo máximo de 4,37 ms. Devemos lembrar que nesta situação 1% do tráfego inserido no nó 1 é perdido e que existe, além do próprio tráfego adicional, 6 diferentes tráfegos gerados por agentes transitando pelo enlace 1-2 (GERADOR_01G → RET_02-01G-05; RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13 → RET_02-01-04-05L-06C-06L-11-12-13 ; RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13 → RET_04-01-02-05L-06C-06L-11-12-13 ; RET_01-02G-02L-03-04-05 → RET_03-01-02G-02L-04-05 ; RET_01-02G-02L-03-04-05 → RET_04-01-02G-02L-03-05 ; PRIM_01-02 → PRIM_02-01;). Nesta situação nenhum pacote do agente PRIM_01-02 para o agente

PRIM_02-01 foi perdido. Mantendo esta linha de testes, foram realizados mais três testes para observarmos o efeito do aumento de tráfego.

Tabela 30 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace 1-2 com 5% de sobrecarga

	Instante de amostragem (s)	Instante de Recebimento (s) Agente		Instante de processamento (s)	
		PRIM_01-02	PRIM_02-01	PRIM_01-02	PRIM_02-01
<i>pré – falta</i>	0,294	0,29609	0,30105	0,297	0,302
	0,295	0,29709	0,30199	0,298	0,302
	0,296	0,29809	0,30320	0,299	0,304
	0,297	0,29909	0,30414	0,300	0,305
	0,298	0,30009	-	0,301	-
	0,299	0,30109	0,30624	0,302	0,307
<i>pós – falta</i>	0,300	0,30209	0,30718	0,303	0,308
	0,301	0,30309	-	0,304	-
	0,302	0,30409	0,30928	0,305	0,310
	0,303	0,30509	0,31049	0,306	0,311
	0,304	0,30609	-	0,307	-
	0,305	0,30709	0,31233	0,308	0,313

Tabela 31 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace 1-2 com 10% de sobrecarga

	Instante de amostragem (s)	Instante de Recebimento (s) Agente		Instante de processamento (s)	
		PRIM_01-02	PRIM_02-01	PRIM_01-02	PRIM_02-01
<i>pré – falta</i>	0,294	0,29609	0,30144	0,297	0,302
	0,295	0,29709	0,30238	0,298	0,303
	0,296	0,29809	-	0,299	-
	0,297	0,29909	0,30450	0,300	0,305
	0,298	0,30009	-	0,301	-
	0,299	0,30109	0,30632	0,302	0,307
<i>pós – falta</i>	0,300	0,30209	0,30752	0,303	0,308
	0,301	0,30309	0,30820	0,304	0,309
	0,302	0,30409	-	0,305	-
	0,303	0,30509	-	0,306	-
	0,304	0,30609	-	0,307	-
	0,305	0,30709	0,31240	0,308	0,313

Tabela 32 - Detalhamento do funcionamento dos agentes PRIM_1-2 e PRIM_2-1 durante o processo de detecção de uma falta ocorrida no instante 0,2996 s (ângulo de falta de 0°) localizada a 10% da LT 1-2 com resistência de falta de 100Ω e com o enlace 1-2 com 30% de sobrecarga

	Instante de amostragem (s)	Instante de Recebimento (s) Agente		Instante de processamento (s)	
		PRIM_01-02	PRIM_02-01	PRIM_01-02	PRIM_02-01
<i>pré – falta</i>	0,294	0,29609	-	0,297	-
	0,295	0,29709	-	0,298	-
	0,296	0,29809	-	0,299	-
	0,297	0,29909	-	0,300	-
	0,298	0,30009	-	0,301	-
	0,299	0,30109	-	0,302	-
<i>pós – falta</i>	0,300	0,30209	-	0,303	-
	0,301	0,30309	-	0,304	-
	0,302	0,30409	-	0,305	-
	0,303	0,30509	-	0,306	-
	0,304	0,30609	-	0,307	-
	0,305	0,30709	-	0,308	-

Podemos notar no primeiro caso (Tabela 30), que a inserção de uma quantidade de tráfego superior a 5% da capacidade de transmissão do enlace, levou a perda de alguns pacotes, e também ao aumento do tempo de transmissão dos pacotes que foram transmitidos corretamente. Anteriormente, conforme visto na Tabela 23, o tempo de trânsito de um pacote do nó 1 para o nó 2 era de 2,14 ms e com a introdução do novo tráfego, este tempo de trânsito apresentou um tempo máximo de 7,49 ms. Neste caso, o agente PRIM_02-01 recebe corretamente o pacote contendo a informação relativa à primeira amostra pós-falta e identifica a falta em $t = 0,311$ s.

Nos últimos dois casos, o aumento de tráfego manifesta-se prejudicialmente ao funcionamento do sistema de proteção. Na Tabela 31 podemos ver que quando o enlace 1-2 recebe uma quantidade de pacotes equivalente a 110% da sua capacidade, apenas 58% dos pacotes gerados por PRIM_01-02 com destino a PRIM_02-01 chegam ao seu destino. Nesta situação, o tempo máximo de trânsito dos pacotes é semelhante ao caso anterior (7,52 ms) e a falta ainda é corretamente identificada pelo agente PRIM_02-01 no instante 0,313 s, apesar da pouca quantidade de pacotes transmitidos com sucesso. E por fim, na Tabela 32, vemos que para uma situação equivalente a 130% do tráfego, nenhum pacote alcança o seu destino, inviabilizando totalmente o funcionamento dos agentes.

Através destes testes, podemos então afirmar que o sistema é prejudicado para situações onde existe uma sobrecarga de tráfego de até 5% devido aos atrasos oca-

sionados por esta situação. Acima disso, o funcionamento do sistema começa a ser gravemente prejudicado.

Baseado nas situações apresentadas, acreditamos que o sistema agente deve sempre funcionar em uma rede de comunicação que não seja demandada ao seu máximo. Conforme foi inicialmente exposto no capítulo 8, a rede de comunicação foi projetada para sustentar um conjunto de possíveis contingências em sua rede, resultando em apenas no aumento do tempo de trânsito dos pacotes para tais situações. Nestes últimos testes podemos observar que caso a rede seja submetida a condições acima das previamente estipuladas, o seu funcionamento torna-se falho. Caso em um sistema prático tais situações comecem a acontecer, acreditamos que medidas tais como o redimensionamento da largura de banda da rede de comunicação devam ser tomadas.

9.5 Resumo

Este capítulo apresentou um sistema agente para proteção primária de linhas de transmissão baseado em uma rede de comunicação. Resultados ilustrando o desempenho do método proposto foram apresentados. Podemos concluir que este novo método utilizando agentes oferece características adicionais superiores às encontradas nos sistemas tradicionais de proteção. A detecção de falhas de equipamentos e a capacidade de coleta de informações de qualquer ponto do sistema de potência são melhoramentos notáveis desta nova tecnologia. Finalmente, o método ilustra como os relés podem utilizar a comunicação para realizar a proteção diferencial percentual primária de linhas. Situações normais de operação da rede de comunicação, assim como situações de contingências foram simuladas. A rede de comunicação mostrou-se robusta o suficiente para situações de perdas de enlaces, comprovando a qualidade do dimensionamento executado no capítulo 8. Situações com a sobrecarga de tráfego em enlace também foram apresentadas. Conforme discutimos, estas situações são altamente prejudiciais e são apenas sustentáveis para pequenos acréscimos de tráfego (até 5%). Em sistemas práticos estas situações devem ser cuidadosamente observadas e, caso venham a acontecer, o redimensionamento da largura de banda do sistema será necessária. Os resultados fornecidos mostraram a rapidez e precisão da técnica diferencial percentual baseada em agentes, ilustrando os benefícios do método proposto. No próximo capítulo apresentamos os testes dos agentes de retaguarda, assim como a interação destes agentes com os agentes primários.

Capítulo 10

A Utilização de Agentes para Proteção de Retaguarda de Linhas de Transmissão

10.1 Introdução

O mal funcionamento de relés, tais como a falha em isolar uma linha em falta ou a abertura de uma linha saudável, está envolvido em grandes perturbações dos SEPs e podem levar a catastróficos eventos em cascata ou até a blecautes (Phadke e Thorp, 1996) e (Phadke et al., 1999). Dar a esses relés a capacidade de auto-checagem e auto-correção seria uma contribuição significativa para localidades críticas do sistema, ajudando a diminuir o número de má operações.

A proteção de retaguarda é necessária para a eliminação de uma falta quando a proteção primária falha. Existem algumas desvantagens na proteção tradicional de retaguarda que aparecem normalmente em relés de distância e de sobrecorrente. Os relés de retaguarda devem ser lentos o suficiente para coordenar com todos os relés relacionados a eles. A região de isolamento desses relés normalmente é muito maior que o necessário. Adicionado a isso, os relés de retaguarda (relés de terceira zona) às vezes operam incorretamente devido a altas cargas em eventos anormais no sistema, sendo uma das causas mais comuns de faltas em cascata.

Vários sistemas de proteção de retaguarda baseados em sistemas especialistas ou em arquiteturas adaptativas foram propostos na tentativa de corrigir as falhas dos sistemas tradicionais de proteção (Stedall et al., 1996), (Tan et al., 2000) e (Tan et al., 2001). Ambos os métodos exigem informações locais e remotas do sistema. No método adaptativo, o ajuste do relé de terceira zona foi adaptado para garantir um bom desempenho sob diversas situações de operação do SEP. Já no método especialista, um computador foi colocado em cada subestação, onde foi usado para identificar linhas em falta e para acionar os disjuntores apropriados quando uma falta é detectada.

Algumas propostas na literatura de proteção têm usado agentes como componentes de um sistema de proteção cooperativo (Tomita et al., 1998), como componentes de um sistema de inteligência distribuída para um método de proteção (Wong e Kalam, 1997), e como um *software* autônomo e interativo em um esquema adaptativo para proteção de linhas multi-terminais (Coury et al., 2000). Um esquema para proteção de retaguarda onde os agentes estão embarcados nos elementos tradicionais de um relé digital inteligente (IED) é proposto neste capítulo. Os agentes de retaguarda buscam por informações relevantes através da comunicação com outros agentes de retaguarda. Seu propósito é detectar o mal funcionamento de outros relés e falhas nas aberturas de disjuntores, realizando a proteção de retaguarda com um desempenho muito melhor do que o alcançado com os métodos tradicionais.

10.2 A Arquitetura do Agente para Proteção de Retaguarda

Os agentes de retaguarda desenvolvidos neste capítulo baseiam-se na lógica diferencial, tal qual os agentes primários desenvolvidos anteriormente. Mais uma vez, a utilização da rede de comunicação é fundamental para a execução da lógica deste tipo de agente. Os agentes de retaguarda recebem inicialmente os fasores de corrente locais calculados como apresentado em 8.3.1. Posteriormente eles enviam esses fasores aos agentes de retaguarda remotos e finalmente executam a lógica diferencial, avaliando se uma falta interna ocorre ou não.

A lógica diferencial é uma das possíveis maneiras empregadas para proteção de LTs onde um canal de comunicação esteja disponível. Porém, quando concentramos nossa atenção para sistemas de proteção de retaguarda, a proteção de distância é fortemente utilizada em esquemas tradicionais para esta finalidade. Isto se deve ao fato que a comunicação presente nos SEPs atuais está restrita a comunicação entre os terminais de uma mesma linha ocasionada pelas limitações impostas pelos sistemas OPLAT. Mesmo em SEPs onde a utilização de OPLAT foi substituída por sistemas SONET/SDH, o uso da proteção de distância ainda é utilizado. Nestes sistemas houve a troca do sistema OPLAT pelo sistema SONET/SDH, mas os relés atuais ainda não exploram totalmente as vantagens que um sistema de comunicação deste tipo pode trazer.

Assim como para a proteção primária de LTs, nós utilizamos a proteção diferencial percentual para proteção de retaguarda. Neste esquema, os agentes de retaguarda são responsáveis pela proteção de terceira zona. Devido à abordagem diferencial empregada por estes agentes, a extensão da terceira zona é diferente da encontrada pelos

sistemas tradicionais. Esta zona engloba a zona primária e a zona primária de todas as linhas conectadas ao terminal remoto da linha de transmissão. Esta característica pode ser observada na Figura 41.

Figura 41 – Proteção Diferencial de Retaguarda

Para a implementação desta lógica, um novo tipo de agente, o agente de carga foi criado. O agente de carga é responsável pelo envio dos fasores de corrente presentes nas cargas do SEP. Uma categoria de agentes do tipo agente de geradores também poderia ser criada. Entretanto, devido ao fato destes agentes possuírem as mesmas características dos agentes de carga, o mesmo código computacional foi utilizado e os agentes de geradores serão referenciados como sendo agentes de cargas.

Neste contexto, a corrente de operação I_{OP_Ret} é dada pela equação:

$$I_{OP_Ret} = \left| \sum_{n=1}^{LTs} \vec{I}_{LTn} - \sum_{m=1}^{cargas} \vec{I}_{Cn} \right| \quad (5)$$

onde LTs e $cargas$ são respectivamente o número de LTs e o número de cargas compreendidas na área de proteção de retaguarda.

A corrente de restrição I_{RT_Ret} é dada pela equação:

$$I_{RT_Ret} = K \left(\sum_{n=1}^{LTs} |\vec{I}_{LTn}| + \sum_{m=1}^{cargas} |\vec{I}_{Cn}| \right) \quad (6)$$

Similarmente ao agente primário, a característica de operação do agente de retaguarda é definida como:

$$I_{OP_Ret} \geq K I_{RT_Ret} \quad (7)$$

$$I_{OP_Ret} = K_0 \quad (8)$$

10.3 Integração dos Agentes de Retaguarda com os Agentes Primários e a Nova Abordagem para os Agentes Primários

Conforme vimos no capítulo anterior, agentes primários para proteção de LTs foram desenvolvidos e testados. No modelo apresentado, um disjuntor é acionado tão logo um agente primário detecte uma situação de falta. Porém, a capacidade de comunicação dos agentes é pouco explorada neste modelo. Os agentes resumem-se a receber informações remotas e a tomar decisões baseadas nelas. Casos onde existam uma falha de detecção por parte do agente ou detecção de uma falta inexistente (*falso trip*) não são superados neste modelo. Uma abordagem mais complexa torna-se necessária para superar tais situações. A possibilidade de comunicação abre infinitos caminhos e possibilidades quanto à maneira como esses agentes devam se comportar. Temos que ter em mente porém que uma interação mais complexa entre os agentes pode levar a resultados mais precisos mas, ao mesmo tempo, levar a um tempo maior, e talvez indesejável, de atuação da proteção.

Neste novo contexto, os agentes primários e de retaguarda seguem a filosofia diferencial percentual para a detecção de falta. A cada 1 ms, eles lêem os fasores de corrente locais e enviam esta informação para os agentes correspondentes. Uma vez que um agente receba todos os fasores relativos aos terminais de sua zona de proteção, ele calcula o valor da corrente diferencial e decide se uma falta existe ou não.

Após detectar uma falta, os agentes tomam ações baseadas nas regras apresentadas na Tabela 33. Como mostrado, se um agente detectar uma falta (regra 1), ele muda sua variável interna `status_falta` para `DETECTED`, envia um `INTERTRIP` para todos os agentes primários na sua lista de agentes e inicia um temporizador. Como podemos ver, nenhuma ação é tomada relativa à abertura do disjuntor associado. À primeira vista, isto pode parecer estranho, mas como uma rede de comunicação encontra-se disponível, o agente esperará uma mensagem de confirmação para realizar a operação de abertura do disjuntor. Se uma mensagem de `INTERTRIP` ou `BACKUP_TRIP` for recebida, o agente primário acionará a abertura do disjuntor associado (regra 6). Mas se uma mensagem tipo `INTERTRIP_RESPONSE = NEGATIVE` for recebida (regra 8), significará que nenhuma corrente diferencial foi detectada pelo agente remoto, fato que pode sinalizar a má operação do agente local. Neste caso, ele interrompe o seu temporizador, e espera por outras mensagens. Caso uma mensagem tipo `BACKUP_TRIP` chegue, o agente segue a regra 6, e aciona o seu disjuntor. Finalmente, se após um período de 15 ms o agente não receber nenhuma mensagem indicando ou não a existência de

uma falta, ele assume que existe alguma falha no sistema de comunicação e aciona o seu disjuntor (regra 5). Em todos os casos, após o acionamento de um disjuntor, o agente primário inicia um segundo temporizador. Este temporizador irá indicar se o disjuntor realmente abriu. Se após 50 ms ainda existir um fluxo de corrente para dentro da zona primária de proteção, o agente envia uma mensagem do tipo NEIGHBOR_TRIP para todos os agentes primários localizados na mesma barra, para que esses abram seus respectivos disjuntores (regra 2). Um agente primário pode receber uma mensagem de INTERTRIP, de BACKUP_TRIP ou de NEIGHBOR_TRIP sem que ele tenha detectado uma falta. Em um primeiro caso, se o agente primário recebe os dois primeiros tipos de mensagens, ele assumirá que está com defeito, e abrirá o seu disjuntor sem ter detectado uma falta (regra 7). Em um segundo caso, se um agente primário receber uma mensagem tipo NEIGHBOR_TRIP e uma mensagem BACKUP_TRIP, ele assumirá que um problema aconteceu com algum dos agentes primários vizinhos a ele, e portanto, acionará seu disjuntor (regra 9).

Em relação aos agentes de retaguarda, caso uma falta seja detectada, o agente envia uma mensagem tipo BACKUP_TRIP para todos os agentes primários dentro da sua zona de proteção de retaguarda e inicia um temporizador (regra 3). Se após 100 ms da detecção da falta ainda existir uma corrente diferencial na zona de proteção de retaguarda, ele assume que os agentes primários responsáveis pela extinção da falta falharam em eliminá-la, e aciona seu disjuntor associado (regra 4).

Tabela 33 – Conjunto de regras utilizadas pelo sistema agente

Regra	SE	ENTÃO
Evento Elétrico		
<i>Agente Primário</i>		
1	$I_{OP_Prim} > K \cdot I_{RT_Prim}$ e $I_{OP_Prim} > K_0$	- status_falta = detectada - Envia INTERTRIP aos agentes primários correspondentes - Inicia o temporizador_primário
2	Corrente_Local ainda presente após 50 ms da ocorrência da falta (temporizador_disjuntor > 50 ms)	- Falha_Disjuntor = detectada - Envia NEIGHBOR_TRIP aos agentes primários localizados na mesma barra
<i>Agente de Retaguarda</i>		
3	$I_{OP_Ret} > K \cdot I_{RT_Ret}$ e $I_{OP_Ret} > K_0$	- status_falta = detectada - Envia BACKUP_TRIP aos agentes primários correspondentes - Inicia o temporizador_retaguarda
4	Corrente_Local ainda presente após 100 ms da ocorrência da falta (temporizador_retaguarda > 100 ms)	- Aciona disjuntor
Evento de Comunicação		
<i>Agente Primário</i>		
5	Após a detecção da falta nenhuma mensagem chega por um período de 15 ms confirmando a existência ou não da falta (temporizador_primário > 15 ms)	- Aciona disjuntor - Confere falha do disjuntor → Inicia temporizador_disjuntor
6	Recebe INTERTRIP ou BACKUP_TRIP e FAULT_STATUS = detectado	- Aciona disjuntor
7	Recebe INTERTRIP e BACKUP_TRIP	- Aciona disjuntor
8	Recebe INTERTRIP_RESPONSE = negativo	- Interrompe temporizador_primário e espera por BACKUP_TRIP
9	Recebe NEIGHBOUR_TRIP e BACKUP_TRIP	- Aciona disjuntor

10.4 Avaliação do Desempenho do Sistema Agente Projetado

Para avaliação do sistema agente, um conjunto de 120 testes foi realizado tendo como base o SEP (Figura 25) e a rede de comunicação (Figura 26) apresentados no capítulo 7. Ao contrário do capítulo anterior onde os agentes primários foram isolados e testados à parte, nesta nova situação os agentes de retaguarda são testados em conjunto com os agentes primários. O funcionamento dos agentes de retaguarda neste novo cenário está intimamente relacionado ao funcionamento dos agentes primários, tornando impossível a avaliação de uma categoria de agentes sem a presença de outra.

Este conjunto de testes encontra-se dividido em 5 categorias:

- Funcionamento Correto do Sistema de Proteção;
- Falha de um Enlace;
- Falha de um Disjuntor;
- Falha de um Agente Primário;
- Falha de um IED.

A seguir apresentamos os resultados obtidos para todas as categorias de testes.

10.4.1 Funcionamento Correto do Sistema de Proteção

Nesta categoria todos os agentes funcionam corretamente. Seu principal objetivo é verificar o funcionamento dos agentes primários para o novo conjunto de regras apresentados na Tabela 33. Neste contexto, 15 diferentes casos foram simulados para uma falta ocorrida no instante 0,30000 s. Inicialmente apresentamos a sequência de eventos para um caso e ao final uma tabela com o sumário de todos os casos realizados.

Como exemplo desta categoria, apresentamos o funcionamento correto da proteção primária para uma falta trifásica ocorrida em 0,30000 s no meio da LT 13-14. Neste exemplo, o agente PRIM_13-14 e PRIM_14-13 detectam a falta no instante 0,30900 s e após 2,06 ms e 2,04 ms respectivamente, eles recebem uma mensagem de INTERTRIP que os leva a abrir seus respectivos disjuntores (regra 6). A sequência de eventos para este caso pode ser vista na Tabela 34.

Tabela 34 - Sequência de eventos exemplificando o funcionamento correto do sistema agente para uma falta trifásica localizada no meio da LT 13-14

Instante (s)	Sequência de eventos para o agente	
	PRIM_13-14	PRIM_14-13
0,30900	- $I_{OP_Prim} > K \cdot I_{RT_Prim}$	- $I_{OP_Prim} > K \cdot I_{RT_Prim}$
	- status_falta = detectada	- status_falta = detectada
	- Envia INTERTRIP a PRIM_14-13	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31000	- Envia INTERTRIP a PRIM_14-13	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31104	-	- Recebe INTERTRIP de PRIM_14-13 (0,30900 s)
	-	- Aciona disjuntor
0,31106	- Recebe INTERTRIP de PRIM_14-13 (0,30900 s)	-
	- Aciona disjuntor	-

Na Tabela 35 apresentamos o sumário de todos os testes realizados dentro desta categoria. Conforme podemos notar o sistema agente funciona rapidamente, detectando todas as faltas com no máximo 11,08 ms.

Tabela 35 – Sumário dos testes realizados para o funcionamento correto dos agentes

Falta localizada na LT	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
1-2	PRIM_01-02	0,30908	0,00913
	PRIM_02-01	0,30913	
1-5	PRIM_01-05	0,30911	0,00913
	PRIM_05-01	0,30913	
2-3	PRIM_02-03	0,31014	0,01014
	PRIM_03-02	0,31008	
2-4	PRIM_02-04	0,30918	0,00918
	PRIM_04-02	0,30915	
2-5	PRIM_02-05	0,30918	0,00918
	PRIM_05-02	0,30918	
3-4	PRIM_03-04	0,31011	0,01013
	PRIM_04-03	0,31013	
4-5	PRIM_04-05	0,31020	0,01022
	PRIM_05-04	0,31022	
6-11	PRIM_06-11	0,31018	0,01018
	PRIM_11-06	0,31008	
6-12	PRIM_06-12	0,31015	0,01015
	PRIM_12-06	0,31011	
6-13	PRIM_06-13	0,31018	0,01018
	PRIM_13-06	0,31011	
9-10	PRIM_09-10	0,31015	0,01015
	PRIM_10-09	0,31008	
9-14	PRIM_09-14	0,31115	0,01115
	PRIM_14-09	0,31108	
10-11	PRIM_10-11	0,31104	0,01104
	PRIM_11-10	0,31104	
12-13	PRIM_12-13	0,31106	0,01108
	PRIM_13-12	0,31108	
13-14	PRIM_13-14	0,31106	0,01106
	PRIM_14-13	0,31104	

10.4.2 Falha de um Enlace

Nesta categoria uma falta ocorre no meio de uma LT e o enlace de comunicação que conecta os terminais desta mesma LT está inoperante. Como principal objetivo desta categoria, está a análise da velocidade de atuação do sistema de proteção para uma situação onde o caminho mais curto para a comunicação não se encontra disponível. Neste contexto, 15 diferentes casos foram simulados. Inicialmente apresentamos a seqüência de eventos para um caso e ao final o sumário de todos os casos realizados.

Como exemplo desta categoria apresentamos uma falha no enlace 9-10 da rede de comunicação da Figura 26 no instante 0,30000 s. À primeira vista, este fato poderia ocasionar algum problema ao correto funcionamento dos agentes. Entretanto, através de um algoritmo padrão de roteamento, um novo caminho é encontrado para as mensagens que antes trafegavam por este enlace. Agora as mensagens vão do nó 10 ao nó 4, do nó 4 ao nó 5, do nó 5 ao nó 9, e vice-versa. Neste cenário a proteção primária é atrasada, mas ainda funciona corretamente. Inicialmente a falta é detectada no instante 0,31300 s pelos agentes PRIM_13-14 e PRIM_14-13. Em 0,31514 s, o agente PRIM_14-13 recebe uma mensagem do tipo BACKUP_TRIP e aciona o seu disjuntor (regra 6). O mesmo acontece com o agente PRIM_13-14 no instante 0,31517 s. A sequência de eventos relativa a este caso pode ser vista na Tabela 36. Neste segundo exemplo vale destacar que ao contrário do exemplo anterior, onde a confirmação de abertura era realizada através da recepção de um INTERTRIP pelo agente primário, agora a confirmação é realizada através de um BACKUP_TRIP. Caso o sistema fosse configurado para apenas realizar a abertura após a recepção de um INTERTRIP, ele ainda funcionaria corretamente. Nesta situação, ambos os agentes abririam seus respectivos disjuntores em 0,31947 s.

Tabela 36 – Sequência de eventos exemplificando o comportamento do sistema agente frente à uma falha de enlace para uma falta trifásica localizada no meio da LT 13-14

Instante (s)	Sequência de eventos para o agente	
	PRIM_13-14	PRIM_14-13
0,31300	- $I_{OP_Prim} > K \cdot I_{RT_Prim}$	- $I_{OP_Prim} > K \cdot I_{RT_Prim}$
	- status_falta = detectada	- status_falta = detectada
	- Envia INTERTRIP a PRIM_14-13	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31400	- Envia INTERTRIP a PRIM_14-13	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31500	- Envia INTERTRIP a PRIM_14-13	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31514	-	- Recebe BACKUP_TRIP de RET_06-12-13L-14
		- Aciona disjuntor
0,31517	- Recebe BACKUP_TRIP de RET_09-13-14L	-
	- Aciona disjuntor	

Na Tabela 37 apresentamos o sumário de todos os testes realizados dentro desta categoria. Conforme podemos observar, apesar da queda de um enlace de comunicação, o sistema agente continua a funcionar satisfatoriamente, operando em não mais de 15,28 ms para todo o conjunto de testes.

Tabela 37 – Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha de um enlace

Falta localizada na LT	Falha no Enlace	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
1-2	1-2	PRIM_01-02 PRIM_02-01	0,31109 0,30917	0,01109
1-5	1-5	PRIM_01-05 PRIM_05-01	0,31207 0,31017	0,01207
2-3	2-3	PRIM_02-03 PRIM_03-02	0,31014 0,31209	0,01209
2-4	2-4	PRIM_02-04 PRIM_04-02	0,31108 0,31217	0,01217
2-5	2-5	PRIM_02-05 PRIM_05-02	0,31206 0,31112	0,01206
3-4	3-4	PRIM_03-04 PRIM_04-03	0,31207 0,31014	0,01207
4-5	4-5	PRIM_04-05 PRIM_05-04	0,31207 0,31114	0,01207
9-10	4-6	PRIM_09-10 PRIM_10-09	0,31524 0,31514	0,01524
9-14	4-10	PRIM_09-14 PRIM_14-09	0,31524 0,31415	0,01524
6-11	5-7	PRIM_06-11 PRIM_11-06	0,31528 0,31414	0,01528
6-12	5-8	PRIM_06-12 PRIM_12-06	0,31107 0,31305	0,01305
6-13	5-9	PRIM_06-13 PRIM_13-06	0,31205 0,31210	0,0121
10-11	6-7	PRIM_10-11 PRIM_11-10	0,31517 0,31517	0,01517
12-13	8-9	PRIM_12-13 PRIM_13-12	0,31309 0,31109	0,01309
13-14	9-10	PRIM_13-14 PRIM_14-13	0,31517 0,31514	0,01517

10.4.3 Falha do Disjuntor

Nesta categoria todos os agentes funcionam corretamente porém um dos disjuntores associados a um dos agentes primários falha, não abrindo um dos terminais de uma LT em falta. Nesta situação, o envio de mensagens dos agentes primários para os agentes primários localizados dentro da mesma subestação é analisado.

Como exemplo desta categoria, apresentamos uma situação onde ocorre a falha na abertura do disjuntor associado ao agente PRIM_13-14. Como podemos ver na Tabela 38, a sequência de eventos para os agentes PRIM_13-14 e PRIM_14-13 é exatamente a mesma que o caso descrito em 10.4.1 até o instante 0,31106 s. Em 0,35900 s, o agente PRIM_13-14 percebe que ainda há corrente fluindo pelo disjuntor, fato que o faz contatar seus agentes vizinhos para que esses abram seus disjuntores (regra 2). Os

agentes PRIM_13-06 e PRIM_13-12 recebem a mensagem instantaneamente, e acionam seus disjuntores em 0,35900 s.

Tabela 38 - Sequência de eventos exemplificando o comportamento do sistema agente frente à falha do disjuntor associado ao agente PRIM_13-14 para uma falha trifásica localizada no meio da LT 13-14

Instan- te(s)	Sequência de eventos para o agente	
	PRIM_13-14	PRIM_14-13
0,30900	- $I_{OP_Prim} > K \cdot I_{RT_Prim}$ - status_falta = detectada - Envia INTERTRIP a PRIM_14-13	- $I_{OP_Prim} > K \cdot I_{RT_Prim}$ - status_falta = detectada - Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31000	- Envia INTERTRIP a PRIM_14-13	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31104	-	- Recebe INTERTRIP de PRIM_14-13 (0,30900 s) - Aciona disjuntor
0,31106	- Recebe INTERTRIP de PRIM_14-13 (0,30900 s) - Aciona disjuntor	-
0,35900	- falha de disjuntor detectada - envia NEIGHBOR_TRIP a PRIM_13-06 - envia NEIGHBOR_TRIP a PRIM_13-12	-
	PRIM_13-06	PRIM_13-12
0,31306	- recebe BACKUP_TRIP de RET_14-06-12-13L (0,31100 s)	-
0,31307	-	- recebe BACKUP_TRIP de RET_14-06-12-13L (0,31100 s)
0,35900	- recebe NEIGHBOR_TRIP de PRIM_13-14 (0,35900 s) - aciona disjuntor	- recebe NEIGHBOR_TRIP de PRIM_13-14 (0,35900 s) - aciona disjuntor

Na Tabela 39 apresentamos o sumário de todos os testes realizados dentro desta categoria. Conforme podemos notar para este caso, o tempo total de detecção da falha é determinado pelo tempo de indicação da falha pelo algoritmo diferencial acrescido do valor de temporização para falha de disjuntor.

Tabela 39 - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um disjuntor

Falha localizada na LT	Falha no Disjuntor Associado ao Agente	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
1-2	PRIM_01-02	PRIM_01-02	0,30908	0,0570
		PRIM_02-01	0,30913	
		PRIM_01-05	0,35700	
1-2	PRIM_02-01	PRIM_01-02	0,30908	0,0570
		PRIM_02-01	0,30913	
		PRIM_02-03	0,35700	
		PRIM_02-04	0,35700	
		PRIM_02-05	0,35700	
1-5	PRIM_01-05	PRIM_01-05	0,30911	0,0570
		PRIM_05-01	0,30913	
		PRIM_01-02	0,35700	
1-5	PRIM_05-01	PRIM_01-05	0,30911	0,0570
		PRIM_05-01	0,30913	
		PRIM_05-02	0,35700	
		PRIM_05-04	0,35700	
2-3	PRIM_02-03	PRIM_02-03	0,31014	0,0580
		PRIM_03-02	0,31008	
		PRIM_02-01	0,35800	
		PRIM_02-04	0,35800	
		PRIM_02-05	0,35800	
2-3	PRIM_03-02	PRIM_02-03	0,31014	0,0580
		PRIM_03-02	0,31008	
		PRIM_03-04	0,35800	
2-4	PRIM_02-04	PRIM_02-04	0,30918	0,0570
		PRIM_04-02	0,30915	
		PRIM_02-01	0,35700	
		PRIM_02-03	0,35700	
		PRIM_02-05	0,35700	
2-4	PRIM_04-02	PRIM_02-04	0,30918	0,0570
		PRIM_04-02	0,30915	
		PRIM_04-03	0,35700	
		PRIM_04-05	0,35700	
		PRIM_09-10	0,35700	
		PRIM_09-14	0,35700	
2-5	PRIM_02-05	PRIM_02-05	0,30918	0,0580
		PRIM_05-02	0,30918	
		PRIM_02-01	0,35800	
		PRIM_02-03	0,35800	
		PRIM_02-04	0,35800	
2-5	PRIM_05-02	PRIM_02-05	0,30918	0,0570
		PRIM_05-02	0,30918	
		PRIM_05-01	0,35700	
		PRIM_05-04	0,35700	
		PRIM_06-11	0,35700	
		PRIM_06-12	0,35700	
		PRIM_06-13	0,35700	
3-4	PRIM_03-04	PRIM_03-04	0,31011	0,0580
		PRIM_04-03	0,31013	
		PRIM_03-02	0,35800	

Tabela 39 continuação - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um disjuntor

Falha localizada na LT	Falha no Disjuntor Associado ao Agente	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
3-4	PRIM_04-03	PRIM_03-04	0,31011	0,0580
		PRIM_04-03	0,31013	
		PRIM_04-02	0,35800	
		PRIM_04-05	0,35800	
		PRIM_09-10	0,35800	
		PRIM_09-14	0,35800	
4-5	PRIM_04-05	PRIM_04-05	0,31020	0,0580
		PRIM_05-04	0,31022	
		PRIM_04-02	0,35800	
		PRIM_04-03	0,35800	
		PRIM_09-10	0,35800	
		PRIM_09-14	0,35800	
4-5	PRIM_05-04	PRIM_04-05	0,31020	0,0580
		PRIM_05-04	0,31022	
		PRIM_05-01	0,35800	
		PRIM_05-02	0,35800	
		PRIM_06-11	0,35800	
		PRIM_06-12	0,35800	
6-11	PRIM_06-11	PRIM_06-13	0,35800	0,0580
		PRIM_05-01	0,35800	
		PRIM_05-02	0,35800	
		PRIM_05-04	0,35800	
		PRIM_06-11	0,31018	
		PRIM_11-06	0,31008	
6-11	PRIM_11-06	PRIM_06-12	0,35800	0,0580
		PRIM_11-06	0,31008	
		PRIM_11-10	0,35800	
6-12	PRIM_06-12	PRIM_06-12	0,31015	0,0580
		PRIM_12-06	0,31011	
		PRIM_06-11	0,35800	
		PRIM_06-13	0,35800	
		PRIM_05-01	0,35800	
		PRIM_05-02	0,35800	
6-12	PRIM_12-06	PRIM_05-04	0,35800	0,0580
		PRIM_06-12	0,31015	
		PRIM_12-06	0,31011	
6-13	PRIM_06-13	PRIM_12-13	0,35800	0,0580
		PRIM_06-13	0,31018	
		PRIM_13-06	0,31011	
		PRIM_06-11	0,35800	
		PRIM_06-12	0,35800	
		PRIM_05-01	0,35800	
6-13	PRIM_13-06	PRIM_05-02	0,35800	0,0580
		PRIM_05-04	0,35800	
		PRIM_06-13	0,31018	
		PRIM_13-06	0,31011	
		PRIM_13-12	0,35800	
		PRIM_13-14	0,35800	

Tabela 39 continuação - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um disjuntor

Falha localizada na LT	Falha no Disjuntor Associado ao Agente	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falha (s)
9-10	PRIM_09-10	PRIM_09-10	0,31015	0,0580
		PRIM_10-09	0,31008	
		PRIM_09-14	0,35800	
		PRIM_04-02	0,35800	
		PRIM_04-03	0,35800	
		PRIM_04-05	0,35800	
9-10	PRIM_10-09	PRIM_09-10	0,31015	0,0580
		PRIM_10-09	0,31008	
		PRIM_10-11	0,35800	
9-14	PRIM_09-14	PRIM_09-14	0,31115	0,0590
		PRIM_14-09	0,31108	
		PRIM_09-10	0,35900	
		PRIM_04-02	0,35900	
		PRIM_04-03	0,35900	
		PRIM_04-05	0,35900	
9-14	PRIM_14-09	PRIM_09-14	0,31115	0,0590
		PRIM_14-09	0,31108	
		PRIM_14-13	0,35900	
10-11	PRIM_10-11	PRIM_10-11	0,31104	0,0610
		PRIM_11-10	0,31104	
		PRIM_10-09	0,36100	
10-11	PRIM_11-10	PRIM_10-11	0,31104	0,0610
		PRIM_11-10	0,31104	
		PRIM_11-06	0,36100	
12-13	PRIM_12-13	PRIM_12-13	0,31106	0,0590
		PRIM_13-12	0,31108	
		PRIM_12-06	0,35900	
12-13	PRIM_13-12	PRIM_12-13	0,31106	0,0590
		PRIM_13-12	0,31108	
		PRIM_13-06	0,35900	
		PRIM_13-14	0,35900	
13-14	PRIM_13-14	PRIM_13-14	0,31106	0,0590
		PRIM_14-13	0,31104	
		PRIM_13-06	0,35900	
		PRIM_13-12	0,35900	
13-14	PRIM_14-13	PRIM_13-14	0,31106	0,0590
		PRIM_14-13	0,31104	
		PRIM_14-09	0,35900	

10.4.4 Falha de um Agente Primário

Nesta categoria um agente primário encontra-se com algum de seus parâmetros mal ajustado – o parâmetro K da lógica diferencial, por exemplo – e devido a isso, ele é incapaz de detectar uma falha na sua zona de proteção primária. Nesta situação, o comportamento dos agentes de retaguarda é analisado.

Como exemplo desta categoria, apresentamos uma situação onde o agente PRIM_13-14 falha em detectar uma falha na LT 13-14. Como podemos ver, apesar de

ser incapaz de detectar a falta, o agente funciona corretamente. Inicialmente, o agente PRIM_13-14 recebe um INTERTRIP no instante 0,31106 s. Posteriormente, ele recebe um BACKUP_TRIP em 0,31308 s e finalmente abre o seu disjuntor (regra 7). Já o agente PRIM_14-13 detecta a falta em 0,30900 s, recebe um BACKUP_TRIP em 0,31305 s e abre o seu disjuntor (regra 6). Este caso mostra a força de um sistema cooperativo baseado em comunicação. Apesar do sistema possuir um agente defeituoso, o sistema agente é capaz de detectar e eliminar precisamente uma falta apenas 2,02 ms mais tarde que no exemplo da categoria 10.4.1, onde nenhuma anomalia acontece. A seqüência de eventos para este caso pode ser vista na Tabela 40.

Tabela 40 – Seqüência de eventos exemplificando o comportamento do sistema agente frente à falha do agente PRIM_13-14 para uma falta trifásica localizada no meio da LT 13-14

Instante (s)	Seqüência de eventos para o agente	
	PRIM_13-14	PRIM_14-13
0,30900	-	- $I_{OP_Prim} > K \cdot I_{RT_Prim}$ - status_falta = detectada - Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31000	-	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31100	-	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31106	- Recebe INTERTRIP de PRIM_14-13 (0,30900 s)	-
0,31200	-	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31300	-	- Envia INTERTRIP a PRIM_13-14
0,31305	-	- Recebe BACKUP_TRIP de RET_13-09-14L - Aciona disjuntor
0,31308	- RECEBE BACKUP_TRIP DE RET_14-06-12-13L - ACIONA DISJUNTOR	-

Na Tabela 41 apresentamos o sumário de todos os testes realizados dentro desta categoria. Conforme já destacado, percebemos por esta tabela a força de um sistema cooperativo para proteção. Apesar da existência de um agente primário defeituoso no sistema, o tempo máximo para detecção da falta para o conjunto de testes é igual 13,17 ms, apenas 2,09 ms mais alto que o tempo máximo apresentado para o sistema com funcionamento correto (item 10.4.1).

Tabela 41 - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um dos agentes primários

Falta localizada na LT	Falha no Ajuste do Agente	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
1-2	PRIM_01-02	PRIM_01-02 PRIM_02-01	0,30911 0,30917	0,00917
1-2	PRIM_02-01	PRIM_01-02 PRIM_02-01	0,30908 0,30917	0,00917
1-5	PRIM_01-05	PRIM_01-05 PRIM_05-01	0,31009 0,31017	0,01017
1-5	PRIM_05-01	PRIM_01-05 PRIM_05-01	0,31009 0,31017	0,01017
2-3	PRIM_02-03	PRIM_02-03 PRIM_03-02	0,31015 0,31008	0,01015
2-3	PRIM_03-02	PRIM_02-03 PRIM_03-02	0,31014 0,31011	0,01014
2-4	PRIM_02-04	PRIM_02-04 PRIM_04-02	0,31108 0,31111	0,01111
2-4	PRIM_04-02	PRIM_02-04 PRIM_04-02	0,31108 0,31111	0,01111
2-5	PRIM_02-05	PRIM_02-05 PRIM_05-02	0,31117 0,31112	0,01117
2-5	PRIM_05-02	PRIM_02-05 PRIM_05-02	0,31117 0,31112	0,01117
3-4	PRIM_03-04	PRIM_03-04 PRIM_04-03	0,31013 0,31014	0,01014
3-4	PRIM_04-03	PRIM_03-04 PRIM_04-03	0,31009 0,31014	0,01014
4-5	PRIM_04-05	PRIM_04-05 PRIM_05-04	0,31113 0,31114	0,01114
4-5	PRIM_05-04	PRIM_04-05 PRIM_05-04	0,31113 0,31114	0,01114
6-11	PRIM_06-11	PRIM_06-11 PRIM_11-06	0,31215 0,31304	0,01304
6-11	PRIM_11-06	PRIM_06-11 PRIM_11-06	0,31215 0,31304	0,01304
6-12	PRIM_06-12	PRIM_06-12 PRIM_12-06	0,31107 0,31104	0,01107
6-12	PRIM_12-06	PRIM_06-12 PRIM_12-06	0,31107 0,31104	0,01107
6-13	PRIM_06-13	PRIM_06-13 PRIM_13-06	0,31205 0,31206	0,01206
6-13	PRIM_13-06	PRIM_06-13 PRIM_13-06	0,31205 0,31206	0,01206
9-10	PRIM_09-10	PRIM_09-10 PRIM_10-09	0,31317 0,31304	0,01317
9-10	PRIM_10-09	PRIM_09-10 PRIM_10-09	0,31317 0,31304	0,01317
9-14	PRIM_09-14	PRIM_09-14 PRIM_14-09	0,31218 0,31304	0,01304
9-14	PRIM_14-09	PRIM_09-14 PRIM_14-09	0,31218 0,31304	0,01304
10-11	PRIM_10-11	PRIM_10-11 PRIM_11-10	0,31305 0,31305	0,01305
10-11	PRIM_11-10	PRIM_10-11 PRIM_11-10	0,31305 0,31305	0,01305

Tabela 41 continuação - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um dos agentes primários

Falta localizada na LT	Falha no Ajuste do Agente	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
12-13	PRIM_12-13	PRIM_12-13	0,31108	0,01109
		PRIM_13-12	0,31109	
12-13	PRIM_13-12	PRIM_12-13	0,31105	0,01109
		PRIM_13-12	0,31109	
13-14	PRIM_13-14	PRIM_13-14	0,31308	0,01308
		PRIM_14-13	0,31305	
13-14	PRIM_14-13	PRIM_13-14	0,31308	0,01308
		PRIM_14-13	0,31305	

10.4.5 Falha de um IED

Nesta categoria, o agentes primário e de retaguarda presentes em um determinado IED estão inativos, isto é, o IED está desligado, travado ou em processo de *boot*. Esta categoria representa uma situação pior que a categoria anterior. Enquanto na situação anterior todos os agentes relativos a um mesmo IED comunicavam-se e apenas o agente primário apresentava uma falha na sua lógica de proteção, nesta nova categoria nenhuma mensagem é enviada a partir do IED inativo, e portanto, todas as proteções primária e de retaguarda que dependem destas mensagens não podem funcionar.

Como exemplo desta categoria, apresentamos a falha do IED_13-14. Conforme já exposto, devido a este defeito, todos os IEDs que se comunicam com este IED ficam impossibilitados de desempenhar suas funções. Para este caso, estes IEDs são IED_14-13 e IED_9-14. Neste cenário, caso uma falta ocorra na LT 13-14, a proteção será desempenhada pelos agentes de proteção de retaguarda RET_06-12-13L-14, RET_12-06-13L-14 e RET_14-06-12-13L. A sequência de eventos para tal evento pode ser observada na Tabela 42.

Tabela 42 - Sequência de eventos exemplificando o comportamento do sistema agente frente à falha do IED_13-14 para uma falha trifásica localizada no meio da LT 13-14

Instante (s)	Sequência de eventos para o agente	
	RET_06-12-13L-14	RET_12-06-13L-14
0,31100	- $I_{OP_Ret} > K \cdot I_{RT_Ret}$	- $I_{OP_Ret} > K \cdot I_{RT_Ret}$
	e $I_{OP_Ret} > K_0$	e $I_{OP_Ret} > K_0$
	- status_falta = detectada	- status_falta = detectada
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_12-13	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_06-13
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_14-13	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_14-13
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-06	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-06
0,31000	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-12	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-12
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-14	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-14
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_12-13	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_06-13
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_14-13	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_14-13
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-06	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-06
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-12	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-12
0,41100	- falha de agente primário detectada	- falha de agente primário detectada
	- aciona disjuntor	- aciona disjuntor
RET_14-06-12-13L		
0,31100	- $I_{OP_Ret} > K \cdot I_{RT_Ret}$	
	e $I_{OP_Ret} > K_0$	
	- status_falta = detectada	
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_06-13	
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_12-13	
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-06	
0,31000	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-12	
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-14	
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_06-13	
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_12-13	
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-06	
	- Envia BACKUP_TRIP a PRIM_13-12	
0,41100	- falha de agente primário detectada	
	- aciona disjuntor	

Na Tabela 43 apresentamos o sumário de todos os testes realizados dentro desta categoria. Conforme podemos notar por esta tabela, o tempo máximo de detecção apresentado pelo sistema é de 111 ms para o conjunto de testes. O sistema de proteção baseado em agentes revela-se extremamente preciso e confiável para este tipo de situação devido principalmente à lógica diferencial e à capacidade de comunicação. Caso o mesmo tipo de situação ocorra em um sistema tradicional, os tempos envolvidos para detecção serão maiores assim como o tamanho da área isolada. Neste cenário o sistema agente apresentado mostra-se superior à alternativa tradicional baseada na proteção de distância.

Tabela 43 - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um dos IEDs

Falta localizada na LT	Falha no IED	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
1-2	IED_01-02	RET_02-01G-05	0,40700	0,107
		RET_05-01G-02	0,40700	
1-2	IED_02-01	RET_01-02G-02L-03-04-05	0,40900	0,109
		RET_03-01-02G-02L-04-05	0,40900	
		RET_04-01-02G-02L-03-05	0,40900	
		RET_05-01-02G-02L-03-04	0,40900	
1-5	IED_01-05	RET_02-01G-05	0,40800	0,108
		RET_05-01G-02	0,40800	
1-5	IED_05-01	RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	0,110
		RET_02-01-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_04-01-02-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_11-01-02-04-05L-06C-06L-12-13	0,41000	
		RET_12-01-02-04-05L-06C-06L-11-13	0,41000	
		RET_13-01-02-04-05L-06C-06L-11-12	0,41000	
2-3	IED_02-03	RET_01-02G-02L-03-04-05	0,41000	0,110
		RET_03-01-02G-02L-04-05	0,41000	
		RET_04-01-02G-02L-03-05	0,41000	
		RET_05-01-02G-02L-03-04	0,41000	
2-3	IED_03-02	RET_02-03C-03L-04	0,40800	0,108
		RET_04-03C-03L-02	0,40800	
2-4	IED_02-04	RET_01-02G-02L-03-04-05	0,41000	0,110
		RET_03-01-02G-02L-04-05	0,41000	
		RET_04-01-02G-02L-03-05	0,41000	
		RET_05-01-02G-02L-03-04	0,41000	
2-4	IED_04-02	RET_02-03-04L-05-08C-09L-10-14	0,40900	0,109
		RET_03-02-04L-05-08C-09L-10-14	0,40900	
		RET_05-02-03-04L-08C-09L-10-14	0,40900	
		RET_10-02-03-04L-05-08C-09L-14	0,40900	
		RET_14-02-03-04L-05-08C-09L-10	0,40900	
2-5	IED_02-05	RET_01-02G-02L-03-04-05	0,40900	0,109
		RET_03-01-02G-02L-04-05	0,40900	
		RET_04-01-02G-02L-03-05	0,40900	
		RET_05-01-02G-02L-03-04	0,40900	
2-5	IED_05-02	RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	0,110
		RET_02-01-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_04-01-02-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_11-01-02-04-05L-06C-06L-12-13	0,41000	
		RET_12-01-02-04-05L-06C-06L-11-13	0,41000	
		RET_13-01-02-04-05L-06C-06L-11-12	0,41000	
3-4	IED_03-04	RET_02-03C-03L-04	0,40800	0,108
		RET_04-03C-03L-02	0,40800	
3-4	IED_04-03	RET_02-03-04L-05-08C-09L-10-14	0,41000	0,110
		RET_03-02-04L-05-08C-09L-10-14	0,41000	
		RET_05-02-03-04L-08C-09L-10-14	0,41000	
		RET_10-02-03-04L-05-08C-09L-14	0,41000	
		RET_14-02-03-04L-05-08C-09L-10	0,41000	
4-5	IED_04-05	RET_02-03-04L-05-08C-09L-10-14	0,40900	0,109
		RET_03-02-04L-05-08C-09L-10-14	0,40900	
		RET_05-02-03-04L-08C-09L-10-14	0,40900	
		RET_10-02-03-04L-05-08C-09L-14	0,40900	
		RET_14-02-03-04L-05-08C-09L-10	0,40900	

Tabela 43 continuação - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um dos IEDs

Falha localizada na LT	Falha no IED	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
4-5	IED_05-04	RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	0,110
		RET_02-01-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_04-01-02-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_11-01-02-04-05L-06C-06L-12-13	0,41000	
		RET_12-01-02-04-05L-06C-06L-11-13	0,41000	
		RET_13-01-02-04-05L-06C-06L-11-12	0,41000	
6-11	IED_06-11	RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	0,110
		RET_02-01-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_04-01-02-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_11-01-02-04-05L-06C-06L-12-13	0,41000	
		RET_12-01-02-04-05L-06C-06L-11-13	0,41000	
		RET_13-01-02-04-05L-06C-06L-11-12	0,41000	
6-11	IED_11-06	RET_06-10-11L	0,41100	0,111
		RET_10-06-11L	0,41100	
6-12	IED_06-12	RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41100	0,111
		RET_02-01-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41100	
		RET_04-01-02-05L-06C-06L-11-12-13	0,41100	
		RET_11-01-02-04-05L-06C-06L-12-13	0,41100	
		RET_12-01-02-04-05L-06C-06L-11-13	0,41100	
		RET_13-01-02-04-05L-06C-06L-11-12	0,41100	
6-12	IED_12-06	RET_06-12L-13	0,40900	0,109
		RET_13-06-12L	0,40900	
6-13	IED_06-13	RET_01-02-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	0,110
		RET_02-01-04-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_04-01-02-05L-06C-06L-11-12-13	0,41000	
		RET_11-01-02-04-05L-06C-06L-12-13	0,41000	
		RET_12-01-02-04-05L-06C-06L-11-13	0,41000	
		RET_13-01-02-04-05L-06C-06L-11-12	0,41000	
6-13	IED_13-06	RET_06-12-13L-14	0,41000	0,110
		RET_12-06-13L-14	0,41000	
		RET_14-06-12-13L	0,41000	
9-10	IED_09-10	RET_02-03-04L-05-08C-09L-10-14	0,41100	0,111
		RET_03-02-04L-05-08C-09L-10-14	0,41100	
		RET_05-02-03-04L-08C-09L-10-14	0,41100	
		RET_10-02-03-04L-05-08C-09L-14	0,41100	
		RET_14-02-03-04L-05-08C-09L-10	0,41100	
9-10	IED_10-09	RET_09-10L-11	0,41100	0,111
		RET_11-09-10L	0,41100	
9-14	IED_09-14	RET_02-03-04L-05-08C-09L-10-14	0,41000	0,110
		RET_03-02-04L-05-08C-09L-10-14	0,41000	
		RET_05-02-03-04L-08C-09L-10-14	0,41000	
		RET_10-02-03-04L-05-08C-09L-14	0,41000	
		RET_14-02-03-04L-05-08C-09L-10	0,41000	
9-14	IED_14-09	RET_09-13-14L	0,41100	0,111
		RET_13-09-14L	0,41100	
10-11	IED_10-11	RET_09-10L-11	0,41100	0,111
		RET_11-09-10L	0,41100	
10-11	IED_11-10	RET_06-10-11L	0,41100	0,111
		RET_10-06-11L	0,41100	
12-13	IED_12-13	RET_06-12L-13	0,40900	0,109
		RET_13-06-12L	0,40900	

Tabela 43 continuação - Sumário dos testes realizados com o sistema agente na presença de falha em um dos IEDs

Falta localizada na LT	Falha no IED	Acionamento do disjuntor realizado por	Instante do acionamento (s)	Tempo total para detecção da falta (s)
12-13	IED _13-12	RET_06-12-13L-14	0,41100	0,111
		RET_12-06-13L-14	0,41100	
		RET_14-06-12-13L	0,41100	
13-14	IED _13-14	RET_06-12-13L-14	0,41100	0,111
		RET_12-06-13L-14	0,41100	
		RET_14-06-12-13L	0,41100	
13-14	IED _14-13	RET_09-13-14L	0,41100	0,111
		RET_13-09-14L	0,41100	

10.5 Resumo

Este capítulo apresentou o funcionamento do sistema agente para proteção primária e de retaguarda de linhas de transmissão baseado em uma rede de comunicação. Neste novo contexto, os agentes de retaguarda não funcionam tal qual a lógica tradicional de retaguarda. Eles utilizam-se da lógica diferencial percentual para a realização da proteção, eliminando assim a menor porção do sistema caso algum problema ocorra com a proteção primária. Outro aspecto a ser ressaltado é a interação destes agentes com os agentes primários. Tradicionalmente a proteção de retaguarda possui um papel complementar a proteção primária, mas neste novo paradigma, a proteção de retaguarda interage com a proteção primária, ajudando a proteção primária em certos cenários na sua tomada de decisão.

Conforme destacamos, no capítulo anterior foi apresentado o funcionamento do sistema agente para proteção primária. Devido à alta velocidade apresentada pela lógica diferencial, os agentes primários tiveram suas lógicas alteradas nesta nova concepção. Novas regras foram adicionadas em seu funcionamento, objetivando uma maior segurança nas suas tomadas de decisões. Anteriormente, os agentes primários acionavam seus disjuntores tão logo detectassem uma falta. Com estas novas regras, os agentes primários passaram a esperar por um *trip* de confirmação para realizarem a abertura de seus disjuntores. Conforme foi explicado, estes *trips* podem ser originados a partir de outros agentes primários ou por agentes de retaguarda. Desta maneira, caso uma falta fosse corretamente identificada, um *trip* de confirmação seria recebido e os agentes acionariam seus disjuntores corretamente. Por outro lado, caso um agente primário detec-

tasse erroneamente uma falta, um *trip* de bloqueio seria enviado a este agente, e ele não abriria seu disjuntor. Devido a esta lógica de confirmação, os agentes primários tiveram um pequeno aumento em seu tempo de atuação, mas passaram a apresentar um maior nível de confiabilidade em seu funcionamento. Uma característica interessante que surge devido ao envio de *trips* pela proteção primária e de retaguarda é a possibilidade de um agente acionar o seu disjuntor mesmo sem ter detectado uma falta. Nesta situação um *trip* primário e um *trip* de retaguarda são recebidos pelo agente, o qual assume que seu funcionamento está incorreto, e aciona seu disjuntor. Outra característica adicionada pelas novas regras foi à identificação de falha na abertura de disjuntor. Neste novo cenário, a falha de um disjuntor é facilmente superada pelo agente primário que envia mensagens aos agentes primários localizados na mesma barra para que abram seus respectivos disjuntores. Outra característica notável deste sistema é a capacidade de superação de um relé com defeito no sistema elétrico de potência. Enquanto tradicionalmente um relé com defeito acarretaria a ação de proteção de 3ª zona de um relé de retaguarda, envolvendo tempos típicos acima de 1 segundo para acionamento da proteção, neste novo sistema a proteção de retaguarda pode atuar dentro de 110 - 120 ms, apresentando desempenho quase equivalente à proteção primária. Este tempo de atuação só é possível devido à precisão apresentada pelos agentes de retaguarda baseados na lógica diferencial percentual e ao conjunto de regras obedecidas por todos os agentes.

É com as características previamente apresentadas que percebemos a força de um sistema agente. Conforme podemos ver, existe uma quebra no paradigma tradicional da proteção, onde todos os elementos funcionavam de maneira isolada, e agora passam a funcionar de uma maneira cooperativa. Falhas normais em linhas de transmissão são rapidamente detectadas e contingências como falha de abertura de um disjuntor, falha na detecção de uma falta por um elemento primário de proteção são facilmente superadas pelo sistema agente através do intercâmbio de mensagens.

Capítulo 11

Conclusões

Neste trabalho descrevemos o uso de agentes para a proteção de linhas de transmissão em sistemas de potência. Inicialmente definimos o conceito de agentes, descrevendo as suas principais características. Um dos principais atributos de um agente é a sua habilidade de comunicação. Acreditamos que as empresas de energia irão construir as suas próprias redes de comunicação privadas no futuro para serem usadas com aplicações como estas delineadas neste trabalho. Nossos experimentos assumiram que esta rede corporativa, denominada rede intranet, foi estabelecida em conjunto com a rede elétrica de transmissão. Uma rede intranet construída nesse molde usará muito provavelmente os componentes padrões de comunicação IP da Internet. Por esta razão, todos os experimentos foram baseados no protocolo UDP/IP, protocolos padrões da rede mundial Internet.

Para investigar os cenários baseados em agentes, criamos o EPOCHS, uma plataforma computacional responsável pela integração dos simuladores de sistemas de potência e de comunicação aos agentes desenvolvidos neste trabalho. A plataforma EPOCHS representa a primeira grande contribuição deste trabalho. Ele consiste na integração de 3 áreas diferentes (agentes, redes de comunicação e sistemas de potência) em uma única plataforma computacional. Conforme vimos, trabalhos anteriores ao EPOCHS já abordavam teoricamente o uso de agentes e redes de comunicação em sistemas de potência, mas o EPOCHS consistiu na primeira plataforma a simular estes 3 domínios completamente integrados. O EPOCHS faz uso do PSLF, PSCAD/EMTDC e do NS2. Em todos os casos, novas funcionalidades foram adicionadas aos simuladores através do uso de módulos personalizados, desenvolvidos dentro de cada simulador mas separados do código-fonte original.

Inicialmente analisamos o desempenho da rede de comunicação frente à comunicação realizada pelos diversos agentes implementados. As redes de comunicação comumente projetadas normalmente levam em conta o volume de tráfego típico consumido por seus utilizadores. Caso um excesso de tráfego ocorra momentaneamente, informações são perdidas e retransmitidas logo a seguir devido ao uso do protocolo TCP. Conforme expomos, o uso do protocolo TCP não se presta a aplicações que necessitam de informações em tempo-real, como é o caso da proteção diferencial de linhas de transmissão. Nesta situação, a utilização do protocolo UDP é a escolha mais lógica. Porém, ao contrário do protocolo TCP, o protocolo UDP não retransmite informações, fato que determina que o projeto de uma rede a ser usada exclusivamente por este protocolo seja bem mais cuidadoso. Características como o cálculo da largura de banda ideal e o tempo de trânsito máximo das mensagens são passos extremamente importantes para projeto de uma rede de comunicação para sistemas agentes aplicados à proteção de SEPs. Conforme calculamos, a largura de banda ideal para o sistema de proteção proposto é igual a 30 Mb/s, valor factível e disponível comercialmente quando comparado à largura de banda atual das redes de comunicação baseadas em fibras ópticas encontradas no mercado (1 Gb/s). Adicionado ao cálculo da largura de banda, realizamos também o cálculo do máximo atraso para transmissão de um pacote de mensagem entre dois agentes responsáveis pela proteção primária de uma LT para situações extremas de quedas de enlaces. O valor encontrado para a rede comunicação proposta foi de 12,700 ms, valor satisfatório para os modernos sistemas de teleproteção.

Em conjunto a esta análise, apresentamos duas aplicações de agentes para proteção e demonstramos seus funcionamentos dentro da plataforma EPOCHS. No primeiro caso, um sistema de proteção diferencial foi criado. Mostramos que agentes podem aumentar e melhorar a proteção do sistema através da troca de informações básicas dentro da zona primária de proteção através de uma rede intranet. Os agentes valeram-se da lógica diferencial percentual para a detecção da falta, lógica largamente utilizada para a proteção de transformadores, porém pouco utilizada na proteção de LTs devido à baixa capacidade de transmissão de dados apresentada pelos sistemas de comunicação tradicionalmente utilizados em SEPs. Conforme exposto, os agentes foram capazes de detectar a falta rapidamente, mesmo em situações adversas onde falhas na rede de comunicação existiam. Outra característica que observamos foi a introdução de tráfego adicional nos enlaces da rede de comunicação. Conforme analisamos, a introdução de pequenos acréscimos (excesso de 5% do valor nominal do enlace) foi sustentada as cus-

tas de atrasos no processo de detecção da falta por parte dos agentes primários. Acréscimos acima deste valor, revelaram-se altamente prejudiciais ao processo de detecção, inviabilizando a utilização dos agentes. Caso tal situação surja dentro de SEPs reais, o redimensionamento da largura de banda ou a duplicação dos enlaces de comunicação deverá ser realizada.

No segundo caso, um sistema de proteção de retaguarda foi desenvolvido. O sistema agente para proteção primária previamente desenvolvido foi alterado, e passou a funcionar conjuntamente ao sistema de proteção de retaguarda. Um conjunto de regras foi estipulado para ambos os sistemas, objetivando uma maior segurança na tomada de decisões realizadas pelos agentes primários e de retaguarda. Neste novo cenário, os agentes primários passaram a depender de um *trip* para confirmação da presença de falta, e conseqüente abertura de seus disjuntores. Estes *trips* podem ser enviados por outros agentes primários ou por agentes de retaguarda que hajam detectado a presença de falta. Outra situação projetada neste novo contexto é a abertura do disjuntor por parte do agente primário, mesmo se esse não tenha detectado a presença de uma falta. Nela caso o agente primário receba um *trip* oriundo de um agente primário e um *trip* de um agente de retaguarda, ele assume que houve um problema em seu funcionamento e aciona seu disjuntor. Um agente primário também pode superar facilmente a falha de seu disjuntor, comunicando os agentes primários localizados na mesma barra para que esses abram seus respectivos disjuntores. A proteção de retaguarda também é muito favorecida pela habilidade de comunicação dos agentes. Enquanto em sistemas tradicionais os tempos de aberturas típicos da proteção de retaguarda são de 1 segundo, os agentes de retaguarda apresentados neste trabalho possuem tempo de detecção em torno de 120 ms. Esta melhora no tempo de detecção só é possível graças ao uso da lógica diferencial, da capacidade de comunicação e pelo conjunto de regras utilizado pelos agentes. Observando estas características, podemos afirmar então que o sistema agente resultante aperfeiçoou a seletividade da proteção e diminuiu os tempos de isolamento das faltas demonstrando as vantagens dos sistemas cooperativos sobre as alternativas tradicionais independentes.

Apesar dos resultados apresentados por esta pesquisa científica terem sido expostos na seguinte ordem: sistema de comunicação, proteção primária e proteção de retaguarda, devemos ter em mente que o desenvolvimento do sistema de comunicação e do sistema agente devem ser visualizados de uma maneira conjunta e não através de módulos independentes. Isto se deve ao fato destes sistemas influírem-se mutuamente, ou seja, é impossível determiná-los independentemente. Como exemplo podemos citar o

cálculo da largura de banda da rede de comunicação. A largura de banda ideal depende do tamanho dos pacotes gerados pelos agentes de proteção, e ao mesmo tempo, não podemos testar o desempenho dos agentes de proteção caso a largura de banda da rede de comunicação não seja conhecida. Os projetos de todos os sistemas envolvidos devem ser realizados concomitantemente nesta nova realidade.

A criação da plataforma EPOCHS e o desenvolvimento do conjunto de agentes para proteção primária e de retaguarda de SEPs germinaram uma série de idéias para desenvolvimentos futuros envolvendo a área de proteção, redes de comunicação e sistemas agentes. Como primeiro desafio podemos exemplificar o desenvolvimento de uma metodologia para estabelecimento de um conjunto de regras para o funcionamento dos agentes. Neste trabalho este conjunto de regras foi desenvolvido pelo seu autor, porém uma maneira mais sistemática baseada em métodos científicos seria de grande interesse. A possibilidade de uso de técnicas baseadas em inteligência artificial reluz como uma grande alternativa para enfrentamento deste problema. Outro desafio refere-se propriamente apenas ao estudo dos protocolos de comunicação utilizados pelos agentes. A implementação do protocolo IEC 61850 dentro do *software* NS2 e o estudo de soluções otimizadas para comunicação dos agentes para proteção de SEPs (por exemplo o uso de roteamento Multicast ao invés do roteamento Unicast) são problemas a serem pesquisados. Finalmente podemos citar o estudo de problemas sistêmicos dos SEPs. A utilização de agentes em sistemas especiais de proteção é de especial interesse para a proteção sistêmica dos SEPs. Sistemas especiais de proteção são sistemas de proteção e controle desenvolvidos para atuar após o funcionamento de algum dispositivo de proteção de um SEP. Devido a sua capacidade de comunicação e computação distribuída, os sistemas agentes podem ser utilizados em problemas onde o desligamento de uma ou mais LTs provoquem a instabilidade de frequência do SEP, situações típicas nas ocorrências de blecautes. Neste contexto, um sistema agente pode ser desenvolvido para constantemente monitorar o *status* de todas as LTs do SEP. Caso uma falta ocorra e a LT envolvida seja permanentemente desligada, o sistema agente avalia a gravidade da situação, verificando se o novo sistema de transmissão é capaz de transmitir a potência exigida pelas cargas. Caso a nova configuração do sistema de transmissão não seja capaz de atender as cargas, o sistema agente calcula a rejeição de geração e o corte de carga necessários para re-estabelecer a frequência do SEP dentro dos limites normais de operação. Após estes cálculos, agentes localizados nos geradores e nas cargas fazem o re-ajuste dos novos valores de operação.

Analisando esta série de novos problemas com os quais os engenheiros de proteção estarão envolvidos, acreditamos que o perfil do engenheiro de proteção do futuro será alterado. O perfil com o qual estamos acostumados de um engenheiro especialista em proteção com apenas alguns, ou até nenhum conhecimento em sistemas de comunicação será modificado. Com o surgimento de novos sistemas de proteção baseados em redes de comunicação, a filosofia de proteção *standalone* baseada em conhecimento local evoluirá para a proteção sistêmica baseada em informações remotas. Neste cenário, a proteção de SEPs será realizada de uma maneira muito mais precisa e rápida se comparada aos sistemas atuais, porém novos desafios surgirão devido à enorme quantidade de informações disponíveis nesta nova situação. Novos métodos para análise destas informações e o desenvolvimento e análise de protocolos de comunicação adequados à proteção de SEPs serão as grandes tarefas para os engenheiros de proteção. A área de proteção de SEPs é complexa e desafiadora, e os engenheiros de proteção atuais passarão por novos desafios assim como os engenheiros de proteção do passado passaram quando a tecnologia numérica foi introduzida em substituição à tecnologia dos antigos relés eletromecânicos e de estado sólido.

Devemos lembrar, no entanto, que os agentes desenvolvidos neste trabalho não representam uma ruptura com os sistemas tradicionais de proteção. Os sistemas agentes aqui apresentados baseiam-se na comunicação para adicionar funcionalidades aquém daquelas que podem ser alcançadas pelos métodos tradicionais. Os sistemas agentes podem incorporar as funcionalidades tradicionais em sua lógica, compensando assim falhas no processo de comunicação. Desta maneira, os sistemas agentes aumentam a segurança dos SEPs através de métodos baseados em comunicação, mas não dependem exclusivamente dela. Ainda é muito cedo para predizer o futuro dos sistemas agentes aplicados aos SEPs. Existem muitos assuntos que devem ser analisados em sistemas de proteção baseados em agentes. Segurança da comunicação, seleção do protocolo de comunicação mais adequado e o número de aplicações apropriadas para os sistemas agentes são apenas alguns dos muitos assuntos que devem ser analisados antes que os sistemas agentes estejam prontos para o uso em sistemas reais. Apesar de tudo, as ferramentas e técnicas examinadas neste trabalho demonstram grandes promessas para a melhoria da proteção dos SEPs no futuro.

Referências

- ACTLEM (1999). Power Quality Monitoring Systems for Utilities and Industry.
- ANDERSON, P. M. (1998). Power System Protection, IEEE Press.
- BRUSTOLONI, J. C. (1991). Autonomous Agents: Characterization and Requirements. Pittsburgh, Carnegie Mellon University. Carnegie Mellon Technical Report CMU-CS-91-204.
- BUNDY, G. N. et al. (1996). An Experiment in Simulation Interoperability. Proceedings of the Winter Simulation Conference. ACM. Coronado, CA, USA: 99-966.
- CAMARA, J. L. F. (2003). The Experience with Digital PLC in the Electric Power Utilities in Brazil. In: Brazil Cigré Colloquium, 2003, Rio de Janeiro.
- COEN, M. (2001). The SodaBot Agent. Disponível em: <http://www.ai.mit.edu/people/sodabot/slideshow/total/P001.html>. Acesso em: abril/2001.
- COURY, D. et al. (2002). An Agent Based Current Differential Relay for Use with a Utility Intranet. IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE. 17: 47-53.
- COURY, D. V. et al. (2000). Agent Technology Applied to Adaptative Relay Setting for Multi-Terminal Lines. In: IEEE PES Summer Meeting, 2000, Seattle, USA.
- COURY, D. V. et al. (2001). Improving the Protection of EHV Teed Feeders Using Local Agents. In: Developments in Power System Protection, 2001, Amsterdã - Holanda, IEE.
- CRISPINO, F. et al. (2004). Uma experiência aplicando um padrão Orientado a Objetos: IEC61850 na integração de IEDs na Automação de Subestações. In: IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004, São Paulo - Brazil.
- EBATA, Y. et al. (2000). Development of the Intranet-Based SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition System) for Power System. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.
- ELMORE, W. A. (1994). Protective Relaying Theory and Applications. New York, NY. Marcel Dekker Inc.
- ELMORE, W. A. (2000a). Pilot Protective Relaying. New York, NY. Marcel Dekker Inc.
- ELMORE, W. A. (2000b). Pilot Protective Relaying. New York, NY, Marcel Dekker, Inc.

- EPRI (2003). Smart Power Delivery - A Vision for the Future. EPRI Journal online, junho.
- FERBER; GASSER (1991). Introduction il'intelligence artificielle distribuée et aux systmes multi-agents. In: Eleventh International Workshop on Expert Systems, 1991, Avignon.
- FONER, L. (1993). The Foner Agent. Disponível em: <http://foner.www.media.mit.edu/people/foner/Julia>. Acesso em: agosto/2003.
- FRANKLIN, S.; GRAESSER, A. (1996). Is it an Agent, or Just a Program? In: Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, 1996, Springer-Verlag.
- GARCIA, A. C. B.; SICHMAN, J. S. (2003). Agentes e Sistemas Multiagentes. In: REZENDE, S. O. Sistemas inteligentes : fundamentos e aplicações. Barueri. Monole.
- GENERAL ELECTRIC (2003). PSLF Manual.
- GIOVANINI, R.; COURRY, D. V. (2002). Sistemas Agentes Aplicados ao Ajuste de Relés Adaptativos para Linhas Multi-Terminais. In: XIV Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2002, Natal - RN.
- HAMAMATSU, K. et al. (2001). A New Approach to the Implementation of Intranet-Based Measurement and Monitoring. Developments in Power System Protection.
- HAYES-ROTH, B. (1995). An Architecture for Adaptive Intelligent Systems. Artificial Intelligence: Special Issue on Agents And Interactivity, p.329-365.
- HOPKINSON, K. M. et al. (2003). EPOCHS: integrated commercial off-the-shelf software for agent-based electric power and communication simulation. 2003 Winter Simulation Conference. New Orleans - LA.
- IBM (1997). The IBM Agent. Disponível em: <http://activist.gpl.ibm.com:81/WhitePaper/ptc2.html>. Acesso em: setembro/2000.
- KHATIB, A. et al. (2000). Thoughts on Future Internet Based Power System Information Network Architecture. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting.
- KWONG, W. S. (1988). Current Differential Protection Goes Digital. Journal of Modern Power Systems, p.53-56.
- LI, H. Y. et al. (1997). A New Type of Differential Feeder Relay Using the Global Positioning System for Data Synchronization. IEEE Transactions on Power Delivery, v.12, n.3, p.1090-1097, julho.
- MAES, P. (1995). Artificial Life Meets Entertainment: Life like Autonomous Agents. Communications of the ACM, v.11, p.108-114.
- MANITOBA HVDC RESEARCH CENTRE (1998). EMTDC/PSCAD User's Guide.
- MCLEAN, C.; RIDDICK, F. (2001). The IMS Mission Architecture for Distributed Manufacturing Simulation. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference: 629-638.
- MESBAH, M. (2003). Digital PLC : Myths and Realities. In: Brazil Cigré Colloquium, 2003, Rio de Janeiro.

- PHADKE, A. G.; HOROWITZ, S. H.; THORP, J. S. (1999). Aspects of Power System Protection in the Post-Restructuring Era. In: Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, 1999.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. (1988). Computer Relaying for Power Systems. England. Research Studies Press Ltd.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. (1996). Expose Hidden Failures to Prevent Cascading Outages. IEEE Computer Applications in Power, p.20-24, julho.
- PROUDFOOT, D. (2002). UCA and IEC 61850 for Dummies. Siemens Power Transmission and Distribution.
- QIU, B. et al. (2000). Internet Based Frequency Monitoring Network (FNET). IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.
- REDFERN, M. A.; CHIWAYA, A. A. W. (1994). A New Approach to Digital Current Differential Protection for Low and Medium Voltage Feeder Circuit using a Digital Voice-Frequency Grade Communication Channel. IEEE Transaction on Power Delivery, v.9, n.3, p.1352-1358, julho.
- RUSSEL, S. J.; NORVIG, P. (1995). Artificial Intelligence: A Modern Approach. 1a. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.
- SAMAD, T. et al. (1999). Simulation of Complex Systems for the Power Industry with Adaptive Agents. Palo Alto, CA, EPRI.
- SCHWEITZER, E. O. et al. (2001). Digital Communications for Power System Protection: Security, Availability, and Speed. Developments in Power System Protection.
- SEKIGUCHI, K. (2000a). Power System Protection and Control System Applying Internet Technology - System Architecture and Applications. In: ICEE, 2000a.
- SEKIGUCHI, K. (2000b). Power System Protection and Control System Based on Intranet Technology - Concept and Basic Architecture. In: ICEE, 2000b.
- SMITH, D. C.; CYPHER, A.; SPOHRER, J. (1994). KidSim: Programming Agents Without a Programming Language. Communications of the ACM, v.7, p.55-67.
- STEDALL, B. et al. (1996). An Investigation Into the Use of Adaptive Setting Techniques for Improved Distance Back-up Protection. IEEE Transactions on Power Delivery, v.11, n.2, p.757-62, abril.
- STEVENSON JR., W. D. (1986). Elementos de Análise de Sistemas de Potência. São Paulo - SP. McGraw Hill do Brasil.
- SUDRA, R.; TAYLOR, S. J. E.; JANAHAAN, T. (2000). Distributed Supply Chain Simulation in GRIDS. Proceedings of the Winter Simulation Conference. Orlando, FL, USA: 356-361.
- TAN, J. C. et al. (2001). Intelligent Wide Area Back-up Protection and its Role in Enhancing Transmission Network Reliability. In: International Conference on Developments in Power System Protection, 2001, IEE.
- TAN, J. C. et al. (2000). An Expert System for the Back-up Protection of a Transmission Network. IEEE Transactions on Power Delivery, v.15, p.508-514, abril.

- TANENBAUM, A. S. (1996a). Computer Networks. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall PTR.
- TANENBAUM, A. S. (1996b). Computer Networks. 3rd. Upper Saddle River, New Jersey. Prentice Hall PTR.
- THE ELECTRICITY TRAINING ASSOCIATION (1995). Power System Protection - Digital Protection and Signalling. The Institution of Electrical Engineers.
- THE FAQ AGENT (1997). Disponível em: http://www.ee.mcgill.ca/~belmarc/agent_faq.html. Acesso em: setembro/2000.
- THORP, J. S. et al. (2003). Agent Technology Applied to the Protection of Power Systems. Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation. REHTANZ, C. Baden - Suíça, Springer-Verlag.
- TOMITA, Y.; FUKUI, C.; KUDO, H. (1998). A Cooperative Protection System with an Agent Model. IEEE Transactions on Power Delivery, v.13, n.4, p.1060-66, outubro.
- UNIVERSITY OF BERKELEY (2003). Network Simulator - NS2, University of Berkeley.
- VIRDHAGRISWARAN, S. (1998). The MuBot Agent. Disponível em: <http://www.crystaliz.com/logicware/mubot.html>. Acesso em: setembro/2000.
- WANG, X. R. et al. (2002a). Developing an Agent-based Backup Protection System for Transmission Networks. Power Systems and Communications Infrastructures for the Future. Beijing - China.
- WANG, X. R. et al. (2002b). Developing an Agent-based Backup Protection System for Transmission Networks. In: Power Systems and Communications Infrastructures for the Future, 2002b, Beijing - China.
- WONG, S. K.; KALAM, A. (1997). An Agent Approach to Designing Protection Systems. In: International Conference on Developments in Power System Protection, 1997, IEE.
- WOOLDRIDGE, M.; CIANCARINI, P. (2000). Agent-oriented Software Engineering: The State of the Art. In: First international workshop, AOSE, 2000, Limerick, Ireland.
- WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. (1995). Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey. In: WOOLDRIDGE e JENNINGS. Intelligent Agents. Berlin. Springer-Verlag p.1-22.

Apêndice A

Publicações Realizadas

Ao longo do período de desenvolvimento deste projeto de doutorado foram publicados 3 artigos internacionais, 3 artigos nacionais e um capítulo para um livro sobre sistemas agentes aplicados a sistemas de potência. Nestes trabalhos podemos observar o desenvolvimento da plataforma EPOCHS assim como a evolução da complexidade dos agentes e dos SEPs estudados.

Capítulo de livro:

THORP, J. S.; COURY, D.; GIOVANINI, R.; WANG, X.; HOPKINSON, K. M. (2003). Agent Technology Applied to the Protection of Power Systems. In: REHTANZ, C. *Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation*. 1a. Baden - Suíça. Springer-Verlag.

Congressos Internacionais:

WANG, X. R.; GIOVANINI, R.; HOPKINSON, K. M.; THORP, J. S.; BIRMAN, K.; COURY, D. (2002). Developing an Agent-based Backup Protection System for Transmission Networks. In: *Power Systems and Communications Infrastructures for the Future*, 2002, Beijing - China.

HOPKINSON, K. M.; GIOVANINI, R.; WANG, X.; THORP, J. S.; COURY, D. V. (2003). EPOCHS: Integrated Commercial off-the-shelf Software for Agent-based Electric power and Communication Simulation. In: *2003 Winter Simulation Conference*, 2003, New Orleans - LA.

GIOVANINI, R.; COURY, D. V.; THORP, J. S.; HOPKINSON, K. M. (2004). Improving Local and Backup Protection Using Wide Area Agents. In: The Eighth International Conference on Developments in Power System Protection, 2004, Amsterdã - Holanda, IEE.

Congressos Nacionais:

GIOVANINI, R.; COURY, D. V. (2002). Sistemas Agentes Aplicados ao Ajuste de Relés Adaptativos para Linhas Multi-Terminais. In: XIV Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2002, Natal - RN.

GIOVANINI, R.; COURY, D. V. (2004). Sistemas Agentes Remotos Aplicados à Melhoria da Proteção Local e de Retaguarda. In: XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado - RS.

GIOVANINI, R.; COURY, D. V. (2004). A Primary and Backup Cooperative Protection System Based On Wide Area Agents. In: IEEE/PES T&D 2004 Latin America, 2004, São Paulo - SP.

Apêndice B

Conceitos Básicos sobre Fibras Ópticas

Fibras ópticas são guias de onda constituídas por uma parte central, conhecida como núcleo, e por parte uma externa, denominada de casca (Figura 42). Tanto o núcleo, quanto a casca são transparentes à luz, porém possuem índices de refração diferentes. A fronteira entre o núcleo e a casca constitui um espelho que reflete totalmente os raios de luz (desde que o ângulo de incidência seja igual ou maior ao ângulo limite) de volta para o núcleo, causando assim a propagação do raio de luz. Esta é uma explicação bem simples do processo, porém serve como uma idéia geral do funcionamento de uma fibra.

Figura 42 - Princípio básico da fibra óptica

11.1 Tipos de Fibras Ópticas e Características

Existem dois tipos básicos de fibras disponíveis comercialmente:

- Multimodo;
- Monomodo.

As fibras multimodo subdividem-se em duas categorias: índice degrau e índice gradual. As fibras multimodo do tipo índice degrau possuem apenas dois índices de refração. Nelas, os raios de luz são propagados através da reflexão interna total na interface entre o núcleo e a casca, como mostrado na Figura 43. Uma desvantagem das fibras

deste tipo é a baixa largura de banda. Esta desvantagem ocorre principalmente devido a dois fatores. O primeiro consiste no fato da luz incidir na entrada na fibra óptica com vários ângulos diferentes, e como resultado, alguns dos raios de luz têm de percorrer distâncias maiores levando assim um maior tempo para percorrer a fibra de uma ponta à outra (Figura 43a). O efeito deste fenômeno é o aumento do comprimento do pulso e a redução da amplitude como mostrado em Figura 43b. Este fenômeno é conhecido com dispersão. O segundo fator limitante deste tipo de fibra é a natureza não coerente das fontes de luz. Muitas fontes de luz disponíveis atualmente produzem luz com vários comprimentos de onda simultaneamente. Essas ondas propagam-se com velocidades diferentes e, portanto chegam ao final da fibra em tempos diferentes, causando distorção. As desvantagens das fibras do tipo índice degrau limitam o seu uso à sistemas de transmissão de curta distância e de baixa velocidade. Como vantagem deste tipo de fibra podemos citar a grande capacidade de aceitação de ângulos de incidência que permite o uso de fontes de luz e conectores baratos para a construção de sistemas práticos.

(a)

(b)

Figura 43 - Fibra multimodo do tipo índice degrau

As fibras ópticas multimodo do tipo índice gradual foram projetadas para superar os problemas apresentados anteriormente. Como mostrado na Figura 44, as fibras do tipo índice gradual possuem o seu núcleo constituído por várias camadas de sílica, cada qual com diferentes índices de refração. Com isso, a direção do feixe de luz é gradualmente mudada conforme ele é propagado através das diversas camadas do núcleo. Esta característica tende a igualar os caminhos possíveis para propagação dos raios de luz que incidem com ângulos diferentes no início da fibra, aumentando a largura de

banda disponível. Contudo estas fibras ainda apresentam problemas relativos à dispersão. Este tipo de fibra é apropriado para conexões de média distância (20 km) e bit rate médio (34 Mbps).

Figura 44 - Fibra multimodo tipo índice gradual

Como a dispersão óptica é causada pela transmissão de múltiplos modos, as fibras monomodo resolvem este problema através da transmissão de um único modo. Isto é alcançado através da redução da área do núcleo para um tamanho onde apenas os raios de luz com altos ângulos de reflexão são propagados, como mostrado na Figura 45. Esta configuração aumenta consideravelmente a largura de banda e proporciona o uso de menos dopante, ocasionando assim uma menor atenuação. Este tipo de fibra é conveniente para uso em conexões de grande distância (50 km) e alto bit rate (560 Mbps) [referência]. Ela, porém, apresenta como desvantagens a dificuldade no processo de emenda das fibras e o pequeno tamanho do núcleo, pois este exige o uso de lasers (que são caros) como fontes de ópticas.

Figura 45 - Fibra Monomodo

11.2 Fontes Ópticas

Em sistemas de comunicação baseados em fibras ópticas, a fonte óptica é invariavelmente um dispositivo semiconductor. Existem dois tipos principais, os diodos de emissão de luz (LEDs) e os lasers. Os LEDs são baratos e fáceis de se usar. Os lasers, entretanto, são mais rápidos, possuem maior potência em suas saídas e possuem áreas de emissão pequenas, permitindo a emissão de grandes quantidades de luz em fibras monomodo.

11.3 Detectores

A luz propagada através de uma fibra óptica deve ser detectada em seu terminal receptor. Para este fim, dois tipos principais de dispositivos são utilizados: Fotodiodos tipo PIN (*p-type intrinsic n-type junction diode*) e fotodiodos tipo Avalanche. Algumas das características desejáveis dos fotodiodos são:

- Sensibilidade ao comprimento de onda desejado;
- Alta eficiência no processo de conversão;
- Baixa perda;
- Velocidade de resposta alta para mudanças nos níveis de luz;
- Baixa capacitância;
- Resposta em frequência uniforme.

Os fotodiodos tipo PIN são usados para velocidades médias e médias distâncias, enquanto os fotodiodos tipo Avalanche são usados para sistemas digitais de alta velocidade.

11.4 Emendas

Diferentes pedaços de fibras devem ser emendados. Os três métodos básicos para emenda são fusão, mecânica e por acoplamento de conectores. Destas, a emenda por fusão é o método mais utilizado, pois ela é o que produz a menor atenuação. Neste método, um arco elétrico de alta intensidade é gerado e funde as fibras formando uma interface relativamente forte.

11.5 Conectores

Os conectores constituem o elo fraco de um sistema baseado em fibra óptica. Para baixas velocidades e distâncias curtas, conectores de plástico de baixo custo, tipo AMP, são adequados. Quando um desempenho melhor é necessário, conectores tipo SMA são empregados.

11.6 Técnicas de Modulação de Ondas de Luz

Existem duas técnicas básicas para transmissão de informação através de um link de fibra óptica: analógico e digital.

Modulação Analógica: A técnica mais simples de modulação analógica modula diretamente a intensidade do sinal de entrada (Figura 46). As vantagens desta abordagem são a simplicidade e o baixo custo. Como desvantagem, esta técnica apresenta as não-linearidades das fontes ópticas que limitam fortemente o desempenho do sistema, restringindo tanto a distância de transmissão quanto a relação sinal-ruído. Outras técnicas analógicas comumente empregadas são a modulação por frequência e a modulação por pulso de frequência (*frequency pulse*). Estas técnicas melhoram sensivelmente a relação sinal-ruído, porém apresentam como desvantagens a complexidade e o alto custo.

Figura 46 - Modulação analógica de uma fonte óptica

Modulação Digital: As técnicas de modulação digital são as mais simples de executar e resultam em um sistema que pode transmitir através de grandes distâncias sem degradação na qualidade do sinal. Uma destas técnicas é conhecida como modulação por código de pulso (PCM), processo que modula diretamente a intensidade da fonte óptica como mostrado na Figura 47. Como a única informação transmitida é a presença ou a ausência de pulsos, as não-linearidades do sistema não afetam a qualidade da transmissão. Neste sistema, o terminal receptor deve apenas ser capaz de identificar uma condição de pulso e não-pulso.

Figura 47 - Modulação digital de uma fonte óptica

Apêndice C

Resultados Completos do Sistema de Comunicação

Tabela 44 – Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)														
		1-2	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	4-5	4-6	4-10	5-7	5-8	5-9	6-7	8-9	9-10
1-2	4,224	-	8,448	4,224	2,816	10,56	4,224	4,224	4,224	4,224	4,928	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224
1-5	4,224	8,448	-	4,224	5,632	9,856	4,224	4,224	4,224	4,224	3,52	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224
2-1	4,928	-	10,56	4,928	3,52	10,56	4,928	4,928	4,928	4,928	5,632	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928
2-3	4,928	4,928	4,928	-	9,856	3,52	9,856	4,928	5,632	5,632	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928
2-4	6,336	4,928	6,336	9,856	-	6,336	10,56	10,56	5,632	5,632	7,744	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336
2-5	7,04	10,56	11,26	5,632	7,04	-	7,04	11,26	8,448	8,448	6,336	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
3-2	4,928	4,928	4,928	-	10,56	3,52	9,152	4,928	5,632	5,632	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928
3-4	4,224	4,224	4,224	9,152	9,152	5,632	-	4,224	3,52	3,52	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224
4-2	7,04	5,632	7,04	10,56	-	7,04	11,97	11,26	6,336	6,336	8,448	7,04	7,744	7,04	7,04	7,04
4-3	4,928	4,928	4,928	9,856	10,56	6,336	-	4,928	4,224	4,224	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928
4-5	9,856	11,26	9,856	11,26	11,26	11,26	9,856	-	11,97	11,97	11,26	9,856	8,448	11,26	10,56	11,97
4-6	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	-	6,336	13,38	6,336	6,336	7,744	6,336	6,336
4-10	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	-	6,336	6,336	7,744	6,336	7,04	8,448
5-1	5,632	10,56	-	5,632	7,04	11,97	5,632	5,632	5,632	5,632	4,928	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632
5-2	7,744	10,56	13,38	6,336	7,744	-	7,744	11,97	9,152	9,152	7,04	7,744	7,04	7,744	7,744	7,744
5-4	9,856	11,26	9,856	11,26	11,26	11,26	9,856	-	10,56	10,56	12,67	9,856	8,448	11,26	10,56	11,97
5-7	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	13,38	7,04	-	7,04	7,04	8,448	7,04	7,04
5-8	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	-	11,97	6,336	9,152	7,04
5-9	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	13,38	7,04	13,38	-	7,04	9,152	8,448
6-4	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	-	4,928	10,56	4,928	4,928	6,336	4,928	4,928
6-7	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	4,224	6,336	1,408	8,448	1,408	1,408	-	1,408	1,408
7-5	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	10,56	5,632	-	5,632	5,632	7,04	5,632	5,632
7-6	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	4,224	7,744	1,408	7,04	1,408	1,408	-	1,408	1,408
8-5	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	-	8,448	4,928	7,744	5,632
8-9	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	7,744	8,448	2,816	-	2,112
9-5	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	10,56	5,632	10,56	-	5,632	7,744	7,04
9-8	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	9,152	6,336	2,816	-	2,112
9-10	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	4,928	2,112	8,448	2,112	2,112	4,224	2,112	1,408	-
10-4	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	-	4,928	4,928	7,04	4,928	5,632	7,04
10-9	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	4,928	2,112	7,04	2,112	2,112	3,52	2,112	1,408	-

Tabela 44 (continuação) – Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)														
		1-2	2-1	2-1	2-1	2-3	2-3	2-4	3-2	4-2	4-2	4-2	4-2	4-3	4-3	4-3
		1-5	2-3	2-4	2-5	2-4	2-5	2-5	3-4	4-3	4-5	4-6	4-10	4-5	4-6	4-10
1-2	4,224	-	-	-	-	2,112	10,56	9,152	4,224	2,816	4,224	2,816	2,816	4,224	4,224	4,224
1-5	4,224	-	8,448	8,448	8,448	6,336	9,856	11,26	4,224	5,632	4,224	5,632	5,632	4,224	4,224	4,224
2-1	4,928	-	-	-	-	2,816	10,56	9,152	4,224	3,52	4,928	3,52	3,52	4,928	4,928	4,928
2-3	4,928	4,224	-	9,856	2,816	-	-	8,448	-	9,856	14,78	9,856	9,856	9,856	9,856	9,856
2-4	6,336	4,928	7,744	-	13,38	-	9,856	-	6,336	-	-	-	-	14,78	9,152	9,152
2-5	7,04	7,04	8,448	10,56	-	13,38	-	-	5,632	16,19	10,56	8,448	8,448	11,26	8,448	8,448
3-2	4,928	4,928	-	10,56	2,816	-	-	9,152	-	9,152	15,49	10,56	10,56	9,152	9,152	9,152
3-4	4,224	4,224	9,152	9,152	6,336	9,152	9,152	10,56	-	-	14,08	7,744	7,744	-	-	-
4-2	7,04	7,04	8,448	-	14,08	-	10,56	-	7,04	-	-	-	-	16,19	10,56	10,56
4-3	4,928	4,928	9,856	10,56	7,04	9,856	9,856	11,97	-	-	15,49	9,152	9,152	-	-	-
4-5	9,856	9,856	13,38	11,26	21,82	21,82	11,26	12,67	9,856	21,82	-	13,38	13,38	-	11,97	11,97
4-6	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	5,632	6,336	6,336	-	6,336	6,336	-	6,336
4-10	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	5,632	6,336	7,04	6,336	-	6,336	6,336	-
5-1	5,632	-	10,56	10,56	10,56	7,744	11,97	13,38	5,632	7,04	5,632	7,04	7,04	5,632	5,632	5,632
5-2	7,744	7,744	8,448	10,56	-	14,78	-	-	7,744	18,3	11,26	9,152	9,152	11,97	9,152	9,152
5-4	9,856	9,856	13,38	11,26	21,82	21,12	11,26	12,67	9,856	20,42	-	11,97	11,97	-	10,56	10,56
5-7	7,04	6,336	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	13,38	7,04	7,04	13,38	7,04
5-8	6,336	5,632	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	5,632	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336
5-9	7,04	6,336	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	13,38	7,04	7,04	13,38
6-4	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	-	4,928	4,928	-	4,928
6-7	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	4,224	6,336	1,408	4,224	6,336	1,408
7-5	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	10,56	5,632	5,632	10,56	5,632
7-6	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	4,224	7,744	1,408	4,224	7,744	1,408
8-5	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,224	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928
8-9	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	3,52	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816
9-5	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	10,56	5,632	5,632	10,56
9-8	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	3,52	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816
9-10	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	5,632	2,112	8,448	4,928	2,112	8,448
10-4	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	5,632	4,928	-	4,928	4,928	-
10-9	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	2,112	5,632	2,112	7,04	4,928	2,112	7,04

Tabela 44 (continuação) -- Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)														
		4-5 4-6	4-5 4-10	4-6 4-10	5-1 5-2	5-1 5-4	5-1 5-7	5-1 5-8	5-1 5-9	5-2 5-4	5-2 5-7	5-2 5-8	5-2 5-9	5-4 5-7	5-4 5-8	5-4 5-9
1-2	4,224	4,224	4,22	4,224	8,448	8,448	8,448	8,448	8,448	15,49	10,56	10,56	9,856	4,928	4,224	4,224
1-5	4,224	4,224	4,22	4,224	-	-	-	-	-	14,78	8,448	9,856	9,152	3,52	4,224	4,224
2-1	4,928	4,928	4,93	4,928	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56	15,49	10,56	10,56	9,856	5,632	4,928	4,928
2-3	4,928	5,632	5,63	6,336	3,52	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	3,52	3,52	3,52	4,928	4,928	4,928
2-4	6,336	12,67	12,67	4,928	16,19	10,56	7,744	6,336	6,336	9,856	7,744	6,336	7,04	16,9	9,856	11,97
2-5	7,04	16,9	16,90	9,856	-	15,49	9,856	11,26	11,26	-	-	-	-	14,08	10,56	12,67
3-2	4,928	5,632	5,63	6,336	3,52	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	3,52	3,52	3,52	4,928	4,928	4,928
3-4	4,224	3,52	3,52	2,816	5,632	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	5,632	5,632	5,632	4,224	4,224	4,224
4-2	7,04	14,78	14,78	5,632	19,01	11,26	8,448	7,04	8,448	10,56	8,448	7,04	7,744	16,19	10,56	13,38
4-3	4,928	4,224	4,22	3,52	6,336	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	6,336	6,336	6,336	4,928	4,928	4,928
4-5	9,856	-	-	12,67	21,12	-	11,26	9,856	8,448	-	12,67	11,26	9,856	-	-	-
4-6	6,336	-	5,63	-	6,336	6,336	13,38	6,336	6,336	6,336	13,38	6,336	6,336	13,38	6,336	6,336
4-10	6,336	5,632	-	-	6,336	6,336	6,336	6,336	7,744	7,04	6,336	6,336	8,448	7,04	7,04	7,744
5-1	5,632	5,632	5,63	5,632	-	-	-	-	-	16,9	10,56	11,97	11,26	4,928	5,632	5,632
5-2	7,744	16,19	16,19	10,56	-	17,6	11,97	13,38	11,97	-	-	-	-	16,19	11,26	12,67
5-4	9,856	-	-	9,856	23,23	-	12,67	9,856	8,448	-	14,08	11,26	9,856	-	-	-
5-7	7,04	13,38	7,74	13,38	7,04	7,04	-	7,04	7,04	7,04	-	7,04	7,04	-	7,04	7,04
5-8	6,336	6,336	6,34	6,336	6,336	6,336	6,336	-	11,97	5,632	6,336	-	11,26	6,336	-	11,97
5-9	7,04	7,744	13,38	13,38	7,04	7,04	7,04	13,38	-	7,04	7,04	13,38	-	6,336	12,67	-
6-4	4,928	-	4,22	-	4,928	4,928	10,56	4,928	4,928	4,928	10,56	4,928	4,928	10,56	4,928	4,928
6-7	1,408	6,336	4,93	6,336	1,408	4,224	8,448	1,408	1,408	4,224	8,448	1,408	1,408	8,448	4,224	4,224
7-5	5,632	10,56	6,34	10,56	5,632	5,632	-	5,632	5,632	5,632	-	5,632	5,632	-	5,632	5,632
7-6	1,408	7,744	4,93	7,744	1,408	4,224	7,04	1,408	1,408	4,224	7,04	1,408	1,408	7,04	4,224	4,224
8-5	4,928	4,928	4,93	4,928	4,928	4,928	4,928	-	7,744	4,224	4,928	-	8,448	4,928	-	8,448
8-9	2,816	2,816	2,82	2,816	2,816	2,816	2,816	7,744	8,448	3,52	2,816	7,744	7,744	2,816	7,744	8,448
9-5	5,632	6,336	10,56	10,56	5,632	5,632	5,632	10,56	-	5,632	5,632	10,56	-	4,928	9,856	-
9-8	2,816	2,816	2,82	2,816	2,816	2,816	2,816	9,152	5,632	3,52	2,816	9,152	6,336	2,816	9,152	6,336
9-10	2,112	5,632	8,45	8,448	2,112	4,928	2,112	2,112	4,928	5,632	2,112	2,112	4,224	5,632	5,632	4,224
10-4	4,928	4,224	-	-	4,928	4,928	4,928	4,928	7,744	5,632	4,928	4,928	7,04	5,632	5,632	7,04
10-9	2,112	5,632	7,04	7,04	2,112	4,928	2,112	2,112	3,52	5,632	2,112	2,112	4,224	5,632	5,632	3,52

Tabela 44 (continuação) -- Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)														
		5-7	5-7	5-8	6-4	7-5	8-5	9-5	9-5	9-8	10-4	2-3	2-1	2-1	2-1	4-2
		5-8	5-9	5-9	6-7	7-6	8-9	9-8	9-10	9-10	10-9	2-4	2-4	2-3	2-3	4-3
												2-5	2-5	2-5	2-4	4-5
1-2	4,224	4,928	4,928	5,632	4,224	4,224	4,224	4,928	4,224	4,224	4,224	16,9	-	-	-	2,816
1-5	4,224	3,52	3,52	2,816	4,224	4,224	4,224	3,52	4,224	4,224	4,224	19,71	8,448	8,448	8,448	5,632
2-1	4,928	5,632	5,632	6,336	4,928	4,928	4,928	5,632	4,928	4,928	4,928	16,19	-	-	-	3,52
2-3	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	-	16,19	-	-	9,856
2-4	6,336	7,744	7,744	9,152	6,336	6,336	6,336	7,744	6,336	6,336	6,336	-	-	16,19	-	-
2-5	7,04	6,336	6,336	5,632	7,04	7,04	7,04	6,336	7,04	7,04	7,04	-	-	-	16,19	16,19
3-2	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	-	16,9	-	-	9,152
3-4	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	9,152	19,71	9,152	9,152	-
4-2	7,04	8,448	9,152	9,856	6,336	7,04	7,04	8,448	7,04	7,04	6,336	-	-	16,9	-	-
4-3	4,928	4,928	4,928	4,928	4,224	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,224	9,856	21,12	9,856	9,856	-
4-5	9,856	11,26	9,152	13,38	8,448	9,856	9,856	14,08	11,97	11,97	8,448	21,82	21,82	21,82	21,82	-
4-6	6,336	13,38	13,38	6,336	-	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	5,632	6,336	6,336	6,336	6,336	17,6
4-10	6,336	6,336	8,448	19,71	5,632	6,336	6,336	16,19	8,448	8,448	-	6,336	6,336	6,336	6,336	5,632
5-1	5,632	4,928	4,928	4,224	5,632	4,928	4,928	4,928	5,632	5,632	5,632	22,53	10,56	10,56	10,56	7,04
5-2	7,744	7,04	6,336	6,336	7,744	7,04	7,04	7,04	7,744	7,744	7,744	-	-	-	16,9	18,3
5-4	9,856	12,67	10,56	16,19	9,856	8,448	9,152	15,49	11,97	11,97	9,856	21,12	21,82	21,82	21,12	-
5-7	7,04	-	-	7,04	7,04	-	6,336	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	19,71
5-8	6,336	-	11,26	-	6,336	5,632	-	9,152	15,49	9,152	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	5,632
5-9	7,04	13,38	-	-	7,04	6,336	7,04	-	-	10,56	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	8,448
6-4	4,928	10,56	10,56	4,928	-	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	14,78
6-7	1,408	8,448	8,448	1,408	-	-	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	18,3
7-5	5,632	-	-	5,632	5,632	-	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	19,71
7-6	1,408	7,04	7,04	1,408	-	-	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	1,408	16,9
8-5	4,928	-	7,744	-	4,928	4,928	-	7,744	12,67	7,744	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,224
8-9	2,816	7,744	7,744	7,744	2,816	2,816	-	-	10,56	-	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	3,52
9-5	5,632	10,56	-	-	5,632	5,632	5,632	-	-	9,152	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632	7,04
9-8	2,816	9,152	5,632	9,152	2,816	2,816	-	-	9,152	-	2,112	2,816	2,816	2,816	2,816	3,52
9-10	2,112	2,112	4,928	12,67	2,112	2,112	1,408	9,152	-	-	-	2,112	2,112	2,112	2,112	7,04
10-4	4,928	4,928	7,744	15,49	4,928	4,928	4,928	13,38	7,04	7,04	-	4,928	4,928	4,928	4,928	4,224
10-9	2,112	2,112	4,224	15,49	2,112	2,112	2,112	10,56	-	-	-	2,112	2,112	2,112	2,112	7,04

Tabela 44 (continuação) – Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)														
		4-2	4-2	4-2	4-2	4-2	4-3	4-3	4-3	4-5	5-1	5-1	5-1	5-1	5-1	5-1
		4-3	4-3	4-5	4-5	4-6	4-5	4-5	4-6	4-6	5-2	5-2	5-2	5-2	5-4	5-4
		4-6	4-10	4-6	4-10	4-10	4-6	4-10	4-10	4-10	5-4	5-7	5-8	5-9	5-7	5-8
1-2	4,224	2,816	2,816	4,224	4,224	2,816	4,224	4,224	4,224	4,224	8,448	8,448	8,45	8,448	8,448	8,448
1-5	4,224	5,632	5,632	4,224	4,224	5,632	4,224	4,224	4,224	4,224	-	-	-	-	-	-
2-1	4,928	3,52	3,52	4,928	4,928	3,52	4,928	4,928	4,928	4,928	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56
2-3	4,928	9,856	9,856	17,6	18,3	9,856	9,856	9,856	9,856	6,336	3,52	3,52	3,52	3,52	4,928	4,928
2-4	6,336	-	-	-	-	-	16,19	16,19	7,744	14,78	16,19	16,19	16,19	16,19	16,9	9,856
2-5	7,04	16,19	16,19	16,19	16,9	9,856	16,9	16,9	9,856	22,53	-	-	-	-	17,6	14,78
3-2	4,928	9,152	9,152	19,71	20,42	10,56	9,152	9,152	9,152	6,336	3,52	3,52	3,52	3,52	4,928	4,928
3-4	4,224	-	-	15,49	16,19	6,336	-	-	-	2,816	5,632	5,632	5,63	5,632	4,224	4,224
4-2	7,04	-	-	-	-	-	19,01	19,01	9,152	18,3	19,01	19,01	19,01	19,01	16,19	10,56
4-3	4,928	-	-	18,3	19,01	7,744	-	-	-	3,52	6,336	6,336	6,34	6,336	4,928	4,928
4-5	9,856	22,53	22,53	-	-	14,08	-	-	12,67	-	-	21,12	21,12	18,3	-	-
4-6	6,336	-	6,336	-	5,632	-	-	5,632	-	-	18,3	13,38	6,34	6,336	13,38	6,336
4-10	6,336	6,336	-	6,336	-	-	5,632	-	-	-	9,856	6,336	6,34	9,152	7,04	7,04
5-1	5,632	7,04	7,04	5,632	5,632	7,04	5,632	5,632	5,632	5,632	-	-	-	-	-	-
5-2	7,744	18,3	18,3	15,49	16,19	10,56	16,19	16,19	10,56	20,42	-	-	-	-	21,12	16,9
5-4	9,856	19,71	19,71	-	-	11,26	-	-	9,856	-	-	24,64	23,23	20,42	-	-
5-7	7,04	13,38	7,04	13,38	7,744	13,38	13,38	7,744	13,38	13,38	18,3	-	7,04	7,04	-	7,04
5-8	6,336	6,336	6,336	5,632	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336	4,224	6,336	-	10,56	6,336	-
5-9	7,04	7,04	13,38	7,744	13,38	13,38	7,744	13,38	13,38	13,38	5,632	7,04	13,38	-	6,336	12,67
6-4	4,928	-	4,928	-	4,224	-	-	4,224	-	-	19,01	10,56	4,93	4,928	10,56	4,928
6-7	1,408	6,336	1,408	6,336	4,928	6,336	6,336	4,928	6,336	6,336	16,19	8,448	1,41	1,408	8,448	4,224
7-5	5,632	10,56	5,632	10,56	6,336	10,56	10,56	6,336	10,56	10,56	14,78	-	5,63	5,632	-	5,632
7-6	1,408	7,744	1,408	7,744	4,928	7,744	7,744	4,928	7,744	7,744	18,3	7,04	1,41	1,408	7,04	4,224
8-5	4,928	4,928	4,928	4,224	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	2,816	4,928	-	7,744	4,928	-
8-9	2,816	2,816	2,816	3,52	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	4,928	2,816	7,74	7,04	2,816	7,744
9-5	5,632	5,632	10,56	6,336	10,56	10,56	6,336	10,56	10,56	10,56	4,224	5,632	10,56	-	4,928	9,856
9-8	2,816	2,816	2,816	3,52	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	4,928	2,816	9,15	5,632	2,816	9,152
9-10	2,112	2,112	8,448	6,336	8,448	8,448	5,632	8,448	8,448	8,448	8,448	2,112	2,11	4,928	5,632	5,632
10-4	4,928	4,928	-	4,928	-	-	4,224	-	-	-	8,448	4,928	4,93	7,744	5,632	5,632
10-9	2,112	2,112	7,04	6,336	7,04	7,04	5,632	7,04	7,04	7,04	8,448	2,112	2,11	4,928	5,632	5,632

Tabela 44 (continuação) – Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)														
		5-1	5-1	5-1	5-1	5-2	5-2	5-2	5-2	5-2	5-2	5-4	5-4	5-4	5-7	9-5
		5-4	5-7	5-7	5-8	5-4	5-4	5-4	5-7	5-7	5-8	5-7	5-7	5-8	5-8	9-8
		5-9	5-8	5-9	5-9	5-7	5-8	5-9	5-8	5-9	5-9	5-8	5-9	5-9	5-9	9-10
1-2	4,224	8,448	8,448	8,448	8,448	19,71	15,49	14,78	10,56	9,856	10,56	4,928	4,928	5,632	6,336	4,224
1-5	4,224	-	-	-	-	16,19	14,78	14,08	8,448	7,744	7,04	3,52	3,52	2,816	2,112	4,224
2-1	4,928	10,56	10,56	10,56	10,56	18,3	15,49	14,78	10,56	9,856	10,56	5,632	5,632	6,336	7,04	4,928
2-3	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	3,52	3,52	3,52	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928
2-4	6,336	11,97	7,744	7,744	9,152	15,49	9,856	10,56	7,744	8,448	9,152	15,49	18,3	21,12	10,56	6,336
2-5	7,04	16,9	9,856	9,856	8,448	-	-	-	-	-	-	12,67	15,49	14,78	4,928	7,04
3-2	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	3,52	3,52	3,52	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928
3-4	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224	5,632	5,632	5,632	4,224	4,224	4,224	4,224	4,224
4-2	7,04	14,08	8,448	9,856	9,856	14,78	10,56	11,26	8,448	9,152	9,856	14,78	18,3	19,01	11,26	7,04
4-3	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	6,336	6,336	6,336	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928
4-5	9,856	-	11,26	9,152	13,38	-	-	-	12,67	10,56	14,78	-	-	-	11,97	10,56
4-6	6,336	6,336	13,38	13,38	6,336	13,38	6,336	6,336	13,38	13,38	6,336	13,38	13,38	7,744	13,38	6,336
4-10	6,336	7,744	6,336	8,448	19,71	8,448	7,04	7,744	6,336	9,152	19,71	8,448	8,448	19,71	19,71	7,04
5-1	5,632	-	-	-	-	19,71	16,9	16,19	10,56	9,856	9,152	4,928	4,928	4,224	3,52	4,928
5-2	7,744	17,6	11,97	10,56	10,56	-	-	-	-	-	-	14,78	16,9	18,3	5,632	7,04
5-4	9,856	-	12,67	10,56	16,19	-	-	-	14,08	11,97	17,6	-	-	-	16,19	9,152
5-7	7,04	7,04	-	-	7,04	-	7,04	7,04	-	-	7,04	-	-	5,632	-	6,336
5-8	6,336	11,97	-	11,26	-	4,928	-	11,97	-	10,56	-	-	11,26	-	-	7,04
5-9	7,04	-	13,38	-	-	6,336	12,67	-	13,38	-	-	11,26	-	-	-	-
6-4	4,928	4,928	10,56	10,56	4,928	10,56	4,928	4,928	10,56	10,56	4,928	10,56	10,56	6,336	10,56	4,928
6-7	1,408	4,224	8,448	8,448	1,408	8,448	4,224	4,224	8,448	8,448	1,408	8,448	8,448	5,632	8,448	1,408
7-5	5,632	5,632	-	-	5,632	-	5,632	5,632	-	-	5,632	-	-	4,224	-	5,632
7-6	1,408	4,224	7,04	7,04	1,408	7,04	4,224	4,224	7,04	7,04	1,408	7,04	7,04	5,632	7,04	1,408
8-5	4,928	7,744	-	7,04	-	3,52	-	9,152	-	7,744	-	-	7,744	-	-	5,632
8-9	2,816	8,448	7,744	7,744	7,744	4,224	7,744	9,856	7,744	7,04	7,744	7,744	7,744	7,744	7,744	-
9-5	5,632	-	10,56	-	-	4,928	9,856	-	10,56	-	-	8,448	-	-	-	-
9-8	2,816	5,632	9,152	4,928	9,152	4,224	9,152	8,448	9,152	5,632	9,152	9,152	5,632	9,152	9,152	-
9-10	2,112	4,928	2,112	5,632	12,67	7,04	5,632	6,336	2,112	4,928	12,67	7,04	4,928	12,67	12,67	-
10-4	4,928	7,744	4,928	8,448	15,49	7,04	5,632	6,336	4,928	7,744	15,49	7,04	7,744	15,49	15,49	5,632
10-9	2,112	3,52	2,112	4,224	15,49	7,04	5,632	6,336	2,112	4,928	15,49	7,04	4,224	15,49	15,49	-

Tabela 44 (continuação) -- Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego Normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)										
		2-1 2-3 2-4 2-5	4-3 4-5 4-6 4-10	4-2 4-5 4-6 4-10	4-2 4-3 4-6 4-10	4-2 4-3 4-5 4-10	4-2 4-3 4-5 4-6	5-1 5-2 5-4 5-7	5-1 5-2 5-4 5-8	5-1 5-2 5-4 5-9	5-1 5-2 5-7 5-8	5-1 5-2 5-7 5-9
1-2	4,224	-	4,224	4,224	2,816	2,816	2,816	8,448	8,448	8,448	8,448	8,448
1-5	4,224	6,336	4,224	4,224	5,632	5,632	5,632	-	-	-	-	-
2-1	4,928	-	4,928	4,928	3,52	3,52	3,52	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56
2-3	4,928	-	9,856	21,12	9,856	9,856	9,856	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52
2-4	6,336	-	17,6	-	-	-	-	16,19	16,19	16,19	16,19	16,19
2-5	7,04	-	22,53	22,53	16,19	16,19	16,19	-	-	-	-	-
3-2	4,928	-	9,152	24,64	9,152	9,152	9,152	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52
3-4	4,224	6,336	-	17,6	-	-	-	5,632	5,632	5,632	5,632	5,632
4-2	7,04	-	21,82	-	-	-	-	19,01	19,01	19,01	19,01	19,01
4-3	4,928	7,04	-	21,82	-	-	-	6,336	6,336	6,336	6,336	6,336
4-5	9,856	13,38	-	-	21,82	-	-	-	-	-	21,12	17,6
4-6	6,336	5,632	-	-	-	21,82	-	13,38	18,3	18,3	13,38	13,38
4-10	6,336	5,632	-	-	-	-	21,82	24,64	9,856	9,856	6,336	9,856
5-1	5,632	7,744	5,632	5,632	7,04	7,04	7,04	-	-	-	-	-
5-2	7,744	-	20,42	20,42	18,3	18,3	18,3	-	-	-	-	-
5-4	9,856	13,38	-	-	17,6	-	-	-	-	-	24,64	21,12
5-7	7,04	6,336	13,38	13,38	13,38	23,94	13,38	-	18,3	18,3	-	-
5-8	6,336	5,632	6,336	6,336	6,336	6,336	5,632	3,52	-	9,856	-	9,856
5-9	7,04	6,336	13,38	13,38	13,38	13,38	23,23	21,82	9,856	-	13,38	-
6-4	4,928	4,928	-	-	-	17,6	-	10,56	19,01	19,01	10,56	10,56
6-7	1,408	1,408	6,336	6,336	6,336	23,94	6,336	8,448	16,19	16,19	8,448	8,448
7-5	5,632	5,632	10,56	10,56	10,56	25,34	10,56	-	14,78	14,78	-	-
7-6	1,408	1,408	7,744	7,744	7,744	21,12	7,744	7,04	18,3	18,3	7,04	7,04
8-5	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,928	4,224	2,112	-	7,04	-	7,04
8-9	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	3,52	5,632	7,744	10,56	7,744	6,336
9-5	5,632	5,632	10,56	10,56	10,56	10,56	24,64	16,9	7,04	-	10,56	-
9-8	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	2,816	3,52	5,632	9,152	9,152	9,152	4,928
9-10	2,112	2,112	8,448	8,448	8,448	8,448	21,82	26,75	8,448	8,448	2,112	5,632
10-4	4,928	4,928	-	-	-	-	17,6	26,75	8,448	8,448	4,928	8,448
10-9	2,112	2,112	7,04	7,04	7,04	7,04	24,64	23,23	8,448	8,448	2,112	5,632

Tabela 44 (continuação) – Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego Normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)										4-2 4-3 4-5 4-6 4-10
		5-1 5-2 5-8 5-9	5-1 5-4 5-7 5-8	5-1 5-4 5-7 5-9	5-1 5-4 5-8 5-9	5-1 5-7 5-8 5-9	5-2 5-4 5-7 5-8	5-2 5-4 5-7 5-9	5-2 5-4 5-8 5-9	5-2 5-7 5-8 5-9	5-4 5-7 5-8 5-9	
1-2	4,224	8,448	8,448	8,448	8,448	8,448	19,71	19,01	23,94	10,56	6,336	4,224
1-5	4,224	-	-	-	-	-	16,19	15,49	17,6	5,632	2,112	4,224
2-1	4,928	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56	18,30	17,6	21,12	10,56	7,04	3,52
2-3	4,928	3,52	4,928	4,928	4,928	4,928	4,93	4,928	4,928	3,52	4,928	6,336
2-4	6,336	16,19	15,49	18,3	21,12	10,56	15,49	16,19	21,12	10,56	26,75	-
2-5	7,04	-	16,19	19,01	17,6	7,04	-	-	-	-	16,9	9,856
3-2	4,928	3,52	4,928	4,928	4,928	4,928	4,93	4,928	4,928	3,52	4,928	6,336
3-4	4,224	5,632	4,224	4,224	4,224	4,224	4,22	4,224	4,224	5,632	4,224	-
4-2	7,04	19,01	14,78	19,01	19,01	11,26	14,78	15,49	19,01	11,26	23,23	-
4-3	4,928	6,336	4,928	4,928	4,928	4,928	4,93	4,928	4,928	6,336	4,928	-
4-5	9,856	21,82	-	-	-	11,97	-	-	-	13,38	-	-
4-6	6,336	6,336	13,38	13,38	7,744	13,38	13,38	13,38	7,744	13,38	13,38	-
4-10	6,336	19,71	8,448	8,448	19,71	19,71	8,45	9,152	19,71	19,71	19,71	-
5-1	5,632	-	-	-	-	-	19,71	19,01	22,53	7,744	3,52	5,632
5-2	7,744	-	19,71	21,12	22,53	9,152	-	-	-	-	21,82	10,56
5-4	9,856	26,75	-	-	-	16,19	-	-	-	17,6	-	-
5-7	7,04	7,04	-	-	5,632	-	-	-	5,632	-	-	9,152
5-8	6,336	-	-	11,26	-	-	-	10,56	-	-	-	5,632
5-9	7,04	-	11,26	-	-	-	11,26	-	-	-	-	9,152
6-4	4,928	4,928	10,56	10,56	6,336	10,56	10,56	10,56	6,336	10,56	10,56	-
6-7	1,408	1,408	8,448	8,448	5,632	8,448	8,45	8,448	5,632	8,448	8,448	4,928
7-5	5,632	5,632	-	-	4,224	-	-	-	4,224	-	-	9,152
7-6	1,408	1,408	7,04	7,04	5,632	7,04	7,04	7,04	5,632	7,04	7,04	4,928
8-5	4,928	-	-	7,04	-	-	-	7,744	-	-	-	4,928
8-9	2,816	7,744	7,744	7,744	7,744	7,744	7,74	9,856	7,744	7,744	7,744	2,816
9-5	5,632	-	8,448	-	-	-	8,45	-	-	-	-	9,152
9-8	2,816	9,152	9,152	4,928	9,152	9,152	9,15	8,448	9,152	9,152	9,152	2,816
9-10	2,112	12,67	7,04	5,632	12,67	12,67	7,04	7,744	12,67	12,67	12,67	5,632
10-4	4,928	15,49	7,04	8,448	15,49	15,49	7,04	7,744	15,49	15,49	15,49	-
10-9	2,112	15,49	7,04	4,224	15,49	15,49	7,04	7,744	15,49	15,49	15,49	5,632

Tabela 44 (continuação) -- Volume de tráfego nos enlaces

Enlace	Tráfego Normal (Mb/s)	Volume de tráfego após a queda do(s) enlace(s) (Mb/s)						
		5-2 5-4 5-7 5-8 5-9	5-1 5-4 5-7 5-8 5-9	5-1 5-2 5-7 5-8 5-9	5-1 5-2 5-4 5-8 5-9	5-1 5-2 5-4 5-7 5-9	5-1 5-2 5-4 5-7 5-8	5-1 5-2 5-4 5-7 5-8 5-9
1-2	4,224	28,16	8,448	8,448	8,448	8,448	8,448	6,336
1-5	4,224	19,01	-	-	-	-	-	-
2-1	4,928	23,94	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56	7,04
2-3	4,928	4,928	4,928	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52
2-4	6,336	26,75	26,75	16,19	16,19	16,19	16,19	10,56
2-5	7,04	-	19,01	-	-	-	-	-
3-2	4,928	4,928	4,928	3,52	3,52	3,52	3,52	4,928
3-4	4,224	4,224	4,224	5,632	5,632	5,632	5,632	4,224
4-2	7,04	23,23	23,23	19,01	19,01	19,01	19,01	11,26
4-3	4,928	4,928	4,928	6,336	6,336	6,336	6,336	4,928
4-5	9,856	-	-	19,01	-	-	-	-
4-6	6,336	13,38	13,38	13,38	25,34	13,38	13,38	9,152
4-10	6,336	19,71	19,71	19,71	19,71	24,64	24,64	11,26
5-1	5,632	25,34	-	-	-	-	-	-
5-2	7,744	-	25,34	-	-	-	-	-
5-4	9,856	-	-	25,34	-	-	-	-
5-7	7,04	-	-	-	25,34	-	-	-
5-8	6,336	-	-	-	-	25,34	-	-
5-9	7,04	-	-	-	-	-	25,34	-
6-4	4,928	10,56	10,56	10,56	28,86	10,56	10,56	9,152
6-7	1,408	8,448	8,448	8,448	23,23	8,448	8,448	5,632
7-5	5,632	-	-	-	19,01	-	-	-
7-6	1,408	7,04	7,04	7,04	28,16	7,04	7,04	5,632
8-5	4,928	-	-	-	-	19,01	-	-
8-9	2,816	7,744	7,744	7,744	7,744	27,46	7,744	5,632
9-5	5,632	-	-	-	-	-	19,01	-
9-8	2,816	9,152	9,152	9,152	9,152	22,53	9,152	5,632
9-10	2,112	12,67	12,67	12,67	12,67	26,75	26,75	8,448
10-4	4,928	15,49	15,49	15,49	15,49	26,75	26,75	11,26
10-9	2,112	15,49	15,49	15,49	15,49	23,23	23,23	8,448

Tabela 45 – Tempo de trânsito nos enlaces

[illegible]

Tabela 45 (continuação) – Tempo de trânsito nos enlaces

[illegible]

Tabela 45 (continuação) – Tempo de trânsito nos enlaces

Nós	Tempo	Tempo de trânsito após a queda do(s) enlace(s) (ms)														
	Normal (ms)	4-5 4-6	4-5 4-10	4-6 4-10	5-1 5-2	5-1 5-4	5-1 5-7	5-1 5-8	5-1 5-9	5-2 5-4	5-2 5-7	5-2 5-8	5-2 5-9	5-4 5-7	5-4 5-8	5-4 5-9
1-2	2,023	2,024	2,02	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024	2,024	2,023	2,024	2,024
1-5	2,023	2,023	2,02	2,023	6,501	4,227	4,118	4,156	4,156	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-1	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-3	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-4	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-5	2,023	2,024	2,02	2,024	4,282	2,024	2,023	2,024	2,024	4,108	4,085	4,108	4,108	2,023	2,024	2,024
3-2	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
3-4	2,023	2,023	2,02	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,024	2,024	2,023	2,023	2,023
4-2	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-3	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-5	2,023	4,188	4,19	2,023	2,023	4,211	2,023	2,023	2,023	6,3	2,023	2,023	2,023	4,118	4,141	4,141
4-6	2,023	8,258	2,02	6,153	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-10	2,023	2,023	8,26	6,153	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-1	2,023	2,023	2,02	2,023	6,178	4,07	4,084	4,084	4,084	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-2	2,023	2,023	2,02	2,023	4,149	2,024	2,024	2,024	2,024	4,098	4,122	4,098	4,098	2,023	2,023	2,023
5-4	2,023	4,108	4,11	2,023	2,023	4,085	2,023	2,023	2,023	6,127	2,023	2,023	2,023	4,173	4,132	4,132
5-7	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	6,177	2,023	2,023	2,023	6,159	2,023	2,023	8,235	2,023	2,023
5-8	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	4,07	2,023	2,023	2,023	4,07	2,023	2,023	4,075	2,023
5-9	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	4,061	2,023	2,023	2,024	4,061	2,023	2,024	4,061
6-4	2,023	8,434	2,02	6,247	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
6-7	2,023	2,024	2,02	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
7-5	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	6,235	2,023	2,023	2,023	6,282	2,023	2,023	8,41	2,023	2,023
7-6	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
8-5	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	4,172	2,023	2,024	2,023	4,172	2,023	2,023	4,141	2,023
8-9	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,024	2,023
9-5	2,023	2,024	2,02	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	4,156	2,024	2,023	2,023	4,157	2,023	2,024	4,157
9-8	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,024
9-10	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
10-4	2,023	2,023	8,42	6,211	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
10-9	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023

Tabela 45 (continuação) – Tempo de trânsito nos enlaces

Nós	Tempo Normal (ms)	Tempo de trânsito após a queda do(s) enlace(s) (ms)														
		5-7	5-7	5-8	6-4	7-5	8-5	9-5	9-5	9-8	10-4	2-3	2-1	2-1	2-1	4-2
		5-8	5-9	5-9	6-7	7-6	8-9	9-8	9-10	9-10	10-9	2-4	2-4	2-3	2-3	4-3
												2-5	2-5	2-5	2-4	4-5
1-2	2,023	2,023	2,023	2,024	2,024	2,024	2,024	2,023	2,024	2,024	2,024	2,023	8,555	6,469	4,164	2,024
1-5	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,024	2,024	2,023
2-1	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	8,393	6,329	4,106	2,023
2-3	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	8,358	2,024	4,076	6,311	2,023
2-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	6,333	4,183	2,023	4,296	8,319
2-5	2,023	2,023	2,023	2,024	2,024	2,024	2,024	2,023	2,024	2,024	2,024	4,179	6,329	4,296	2,024	2,024
3-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	8,604	2,023	4,188	6,51	2,023
3-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024	2,024	10,52
4-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	6,305	4,07	2,023	4,141	8,246
4-3	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	10,28
4-5	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,024	6,192
4-6	2,023	2,023	2,023	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024
4-10	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-1	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	4,051	6,277	4,144	2,023	2,023
5-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,024	2,023	6,098
5-7	2,023	6,177	6,183	2,023	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024
5-8	2,023	4,07	2,023	8,254	2,023	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-9	2,023	2,024	4,061	6,244	2,023	2,023	2,023	6,174	4,052	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
6-4	2,023	2,023	2,023	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
6-7	2,023	2,023	2,023	2,023	-	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
7-5	2,023	6,235	6,211	2,023	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
7-6	2,023	2,023	2,023	2,023	-	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
8-5	2,023	4,172	2,023	8,36	2,023	2,023	-	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024
8-9	2,023	2,024	2,023	2,024	2,023	2,023	-	8,383	2,023	4,102	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
9-5	2,023	2,023	4,156	6,227	2,023	2,023	2,023	6,266	4,18	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024
9-8	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	-	8,266	2,024	4,071	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
9-10	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	8,258	6,211	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
10-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
10-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	8,411	6,27	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023

Tabela 45 (continuação) – Tempo de trânsito nos enlaces

Nós	Tempo Normal (ms)	Tempo de trânsito após a queda do(s) enlace(s) (ms)														
		4-2	4-2	4-2	4-2	4-2	4-3	4-3	4-3	4-5	5-1	5-1	5-1	5-1	5-1	5-1
		4-3	4-3	4-5	4-5	4-6	4-5	4-5	4-6	4-6	5-2	5-2	5-2	5-2	5-4	5-4
		4-6	4-10	4-6	4-10	4-10	4-6	4-10	4-10	4-10	5-4	5-7	5-8	5-9	5-7	5-8
1-2	2,023	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
1-5	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	10,47	6,509	6,50	6,415	4,188	4,219
2-1	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
2-3	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
2-4	2,023	4,221	4,221	4,089	4,089	4,066	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
2-5	2,023	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	8,296	4,249	4,28	4,221	2,023	2,024
3-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
3-4	2,023	6,47	6,47	2,023	2,023	2,023	4,17	4,17	4,083	2,023	2,024	2,024	2,02	2,024	2,023	2,023
4-2	2,023	4,141	4,141	4,156	4,156	4,18	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
4-3	2,023	6,169	6,169	2,024	2,024	2,024	4,056	4,056	4,071	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
4-5	2,023	2,023	2,023	6,183	6,183	2,023	4,117	4,117	2,023	4,23	6,112	2,023	2,02	2,023	4,174	4,207
4-6	2,023	6,111	2,023	10,24	2,023	6,147	8,2	2,023	6,153	8,293	2,024	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
4-10	2,023	2,023	6,106	2,023	10,24	6,141	2,023	8,194	6,153	8,294	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
5-1	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	10,29	6,16	6,18	6,188	4,061	4,07
5-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	8,258	4,137	4,15	4,161	2,024	2,024
5-4	2,023	2,023	2,023	6,259	6,259	2,023	4,155	4,155	2,023	4,09	6,169	2,023	2,02	2,023	4,112	4,085
5-7	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	6,094	2,02	2,023	8,182	2,023
5-8	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	4,07	2,023	2,023	4,075
5-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	4,061	2,023	2,024
6-4	2,023	6,375	2,023	10,49	2,023	6,27	8,446	2,023	6,247	8,54	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
6-7	2,023	2,024	2,023	2,024	2,023	2,024	2,024	2,023	2,024	2,024	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
7-5	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	6,399	2,02	2,023	8,458	2,023
7-6	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
8-5	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	4,17	2,023	2,023	4,141
8-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,024
9-5	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,02	4,156	2,023	2,024
9-8	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,024	2,023	2,023
9-10	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
10-4	2,023	2,023	6,364	2,023	10,5	6,235	2,023	8,434	6,211	8,505	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023
10-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023

Tabela 45 (continuação) – Tempo de trânsito nos enlaces

Nós	Tempo Normal (ms)	Tempo de trânsito após a queda do(s) enlace(s) (ms)														
		5-1	5-1	5-1	5-1	5-2	5-2	5-2	5-2	5-2	5-4	5-4	5-4	5-7	9-5	
		5-4	5-7	5-7	5-8	5-4	5-4	5-7	5-7	5-8	5-7	5-7	5-8	5-8	9-8	
		5-9	5-8	5-9	5-9	5-7	5-8	5-9	5-8	5-9	5-8	5-9	5-9	5-9	5-9	9-10
1-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,024	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024
1-5	2,023	4,227	4,118	4,118	4,078	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-1	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-3	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-5	2,023	2,024	2,023	2,023	2,024	4,085	4,108	4,108	4,085	4,085	4,061	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024
3-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
3-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,024	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-3	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-5	2,023	4,211	2,023	2,023	2,023	2,023	6,268	6,3	6,277	2,023	2,023	2,023	4,118	4,118	4,094	2,023
4-6	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-10	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-1	2,023	4,07	4,084	4,089	4,084	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-2	2,023	2,024	2,024	2,024	2,024	4,122	4,098	4,098	4,122	4,122	4,145	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-4	2,023	4,085	2,023	2,023	2,023	6,16	6,127	6,136	2,023	2,023	2,023	4,173	4,174	4,216	2,023	2,023
5-7	2,023	2,023	6,177	6,183	2,023	10,22	2,023	2,023	6,159	6,159	2,023	8,241	8,229	2,023	6,13	2,023
5-8	2,023	2,023	4,07	2,023	8,254	2,023	4,075	2,023	4,07	2,023	8,24	4,075	2,023	10,32	8,22	2,023
5-9	2,023	4,061	2,024	4,061	6,244	2,023	2,024	4,075	2,024	4,061	6,235	2,024	4,061	8,296	6,211	-
6-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
6-7	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
7-5	2,023	2,023	6,235	6,211	2,023	10,5	2,023	2,023	6,282	6,235	2,023	8,376	8,469	2,023	6,223	2,023
7-6	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
8-5	2,023	2,023	4,172	2,023	8,36	2,023	4,141	2,024	4,172	2,023	8,375	4,11	2,023	10,51	8,375	2,024
8-9	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024	2,023	2,024	2,023	2,024	2,023	2,024	2,024	2,023	2,024	2,024	-
9-5	2,023	4,156	2,023	4,157	6,227	2,023	2,024	4,133	2,023	4,156	6,266	2,023	4,156	8,391	6,204	-
9-8	2,023	2,024	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	-
9-10	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	-
10-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
10-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	-

Tabela 45 (continuação) – Tempo de trânsito nos enlaces

Nós	Tempo	Tempo de trânsito após a queda do(s) enlace(s) (ms)										
	Normal (ms)	2-1 2-3 2-4 2-5	4-3 4-5 4-6 4-10	4-2 4-5 4-6 4-10	4-2 4-3 4-6 4-10	4-2 4-3 4-5 4-10	4-2 4-3 4-5 4-6	5-1 5-2 5-4 5-7	5-1 5-2 5-4 5-8	5-1 5-2 5-4 5-9	5-1 5-2 5-7 5-8	5-1 5-2 5-7 5-9
1-2	2,023	-	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
1-5	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	10,67	10,47	10,47	6,509	6,399
2-1	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-3	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-4	2,023	-	2,023	4,066	4,174	8,371	8,371	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-5	2,023	-	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024	8,389	8,296	8,296	4,249	4,183
3-2	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
3-4	2,023	2,023	4,135	2,023	6,411	10,66	10,63	2,024	2,024	2,024	2,024	2,024
4-2	2,023	-	2,023	4,18	4,133	8,25	8,247	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-3	2,023	2,023	4,056	2,024	6,174	10,28	10,28	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
4-5	2,023	2,023	4,164	6,22	2,023	6,216	6,216	6,117	6,112	6,112	2,023	2,023
4-6	2,023	2,023	8,235	10,28	6,105	2,023	10,28	2,023	2,024	2,024	2,023	2,023
4-10	2,023	2,023	8,235	10,28	6,088	10,26	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023
5-1	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	10,32	10,29	10,29	6,16	6,174
5-2	2,023	-	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	8,297	8,258	8,258	4,137	4,153
5-4	2,023	2,023	4,122	6,235	2,023	6,098	6,122	6,272	6,169	6,169	2,023	2,023
5-7	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	10,33	2,024	2,024	6,094	6,1
5-8	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	4,075	2,023	4,07	2,023
5-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,024	2,024	4,122	2,024	4,061
6-4	2,023	2,023	8,54	10,59	6,34	2,023	10,54	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
6-7	2,023	2,023	2,024	2,024	2,024	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
7-5	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	10,55	2,023	2,023	6,399	6,328
7-6	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
8-5	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	4,094	2,024	4,172	2,023
8-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024	2,023
9-5	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024	4,086	2,023	4,157
9-8	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,024
9-10	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
10-4	2,023	2,023	8,505	10,55	6,305	10,55	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
10-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023

Tabela 45 (continuação) – Tempo de trânsito nos enlaces

Nós	Tempo Normal (ms)	Tempo de trânsito após a queda do(s) enlace(s) (ms)										
		5-1 5-2 5-8 5-9	5-1 5-4 5-7 5-8	5-1 5-4 5-7 5-9	5-1 5-4 5-8 5-9	5-1 5-7 5-8 5-9	5-2 5-4 5-7 5-8	5-2 5-4 5-7 5-9	5-2 5-4 5-8 5-9	5-2 5-7 5-8 5-9	5-4 5-7 5-8 5-9	4-2 4-3 4-5 4-6 4-10
1-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,024	2,023	2,023	2,024
1-5	2,023	6,516	4,18	4,188	4,141	4,071	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-1	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-3	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
2-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	-
2-5	2,023	4,211	2,023	2,023	2,024	2,023	4,09	4,085	4,061	4,052	2,023	2,024
3-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
3-4	2,023	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,024	2,023	-
4-2	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	-
4-3	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	-
4-5	2,023	2,023	4,169	4,174	4,141	2,023	6,27	6,244	6,244	2,023	4,08	-
4-6	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	-
4-10	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	-
5-1	2,023	6,15	4,061	4,061	4,061	4,084	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
5-2	2,023	4,117	2,024	2,024	2,024	2,024	4,12	4,122	4,145	4,168	2,023	2,023
5-4	2,023	2,023	4,112	4,112	4,15	2,023	6,16	6,174	6,197	2,023	4,258	-
5-7	2,023	2,023	8,188	8,176	2,023	6,13	10,22	10,23	2,023	6,13	8,311	2,023
5-8	2,023	8,146	4,075	2,023	10,26	8,22	4,08	2,023	12,28	8,211	10,36	2,023
5-9	2,023	6,122	2,024	4,061	8,235	6,211	2,02	4,099	10,26	6,202	8,333	2,023
6-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	-
6-7	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
7-5	2,023	2,023	8,423	8,516	2,023	6,223	10,50	10,48	2,023	6,247	8,493	2,023
7-6	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
8-5	2,023	8,524	4,11	2,023	10,51	8,375	4,11	2,023	12,59	8,375	10,65	2,023
8-9	2,023	2,024	2,024	2,023	2,024	2,024	2,02	2,023	2,024	2,024	2,024	2,023
9-5	2,023	6,368	2,023	4,157	8,407	6,204	2,02	4,109	10,5	6,235	8,47	2,023
9-8	2,023	2,023	2,023	2,024	2,023	2,023	2,02	2,024	2,023	2,023	2,023	2,023
9-10	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023
10-4	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	-
10-9	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023	2,02	2,023	2,023	2,023	2,023	2,023

Tabela 45 (continuação) – Tempo de trânsito nos enlaces

[illegible]