ULISSES CHEMIN NETTO

**Determinação de um Parâmetro para Monitoramento
do Desempenho de Mensagens GOOSE do Padrão IEC
61850 Utilizadas em Subestações de Energia Elétrica**

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 Ciências pelo Programa de
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na
EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C517d Chemin Netto, Ulisses
 Determinação de um Parâmetro para Monitoramento do
Desempenho de Mensagens GOOSE do Padrão IEC 61850
Utilizadas em Subestações de Energia Elétrica. /
Ulisses Chemin Netto; orientador Denis Vinícius
Coury. São Carlos, 2012.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Gerência de Redes. 2. IEC 61850. 3. Intelligent
Electronic Devices. 4. Local Area Network. 5. Mensagem
GOOSE. 6. Proteção Digital. 7. Redes Neurais
Artificiais. 8. Sistemas Elétricos de Potência. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ULISSES CHEMIN NETTO**.

Título da tese: "Determinação de um parâmetro para monitoramento do desempenho de mensagens GOOSE do padrão IEC 61850 utilizadas em subestações de energia elétrica".

Data da defesa: 10/08/2012

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Eduardo Nobuhiro Asada**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Mário Oleskovicz**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Dr. **Renan Giovanini**
(Operador Nacional do Sistema Elétrico/ONS)

Prof. Dr. **Eduardo Lorenzetti Pellini**
(Escola Politécnica/USP)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedicatória

A minha amada avó Romilda Chemin, *in memoriam*.

Agradecimentos

Para a minha querida família, por todo o apoio, carinho, incentivo, orientação e alegrias partilhadas, em particular aos meus amados “pequenos bárbaros” por tornarem este tio um homem melhor.

A minha amada esposa e companheira Aline, por estar ao meu lado, me incentivar, apoiar, partilhar desafios, problemas e vitórias, por ser uma grande conselheira e amiga, por todo o carinho e cuidados e pela maravilhosa vida que construímos juntos.

Ao meu amigo de longa data Giancarlo, por toda a atenção, apoio, comprometimento, se colocando a disposição, e por não medir esforços para que a etapa laboratorial desta pesquisa fosse realizada.

A *Maintenance Service* Engenharia de Manutenção Ltda., representada pelos seus diretores Edgar Luis Predabom, Mário Fernando Krebs Baltar e Sérgio Luis Rossetto pela amizade, confiança no meu trabalho e por colocarem a disposição recursos que foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Ao prof. Tit. Denis Vinicius Coury, pela excepcional orientação, tanto profissional quanto pessoal, por todas as oportunidades, apoio, desafios colocados e pela excelente parceria ao longo destes 6 anos de trabalho conjunto. A sua contribuição foi fundamental para a minha formação como pesquisador!

Aos professores Dr. José Carlos de Melo Vieira Jr. e Dr. Mário Oleskovicz pelo exemplo cotidiano do que é ser um pesquisador dedicado, criativo e competente, pela amizade, parceria, apoio e oportunidades fornecidas ao longo da minha formação como doutor.

Aos meus amigos Diego de Castro Grillo e Ivan Donisete Lonel, com os quais eu formei uma excelente equipe de trabalho, pela competência, seriedade, iniciativa, determinação e criatividade com a qual desenvolveram a parte computacional desta pesquisa. Sua colaboração foi imprescindível para o êxito desta pesquisa!

Ao prof. Dr. Eduardo Lorenzetti Pellini pela atenção, disponibilidade, discussões e contribuições fundamentais ao êxito desta pesquisa.

Ao meu amigo Ricardo Augusto Souza Fernandes, pela amizade, momentos de descontração e fundamental auxílio no projeto da rede neural artificial.

Aos meus amigos Daniel Barbosa e Gerson Bessa Gibelli, pela amizade, apoio, momentos de descontração e por todos os trabalhos que fizemos juntos.

Ao meu amigo Dagoberto Carvalho Jr. por todo o apoio, atenção e informações sobre redes de computadores, as quais foram imprescindíveis para a construção do meu conhecimento e execução desta pesquisa.

A Jussara Ramos Zoia e Marisa Helena R. Vicente Fortulan, pelo excelente tratamento dispensado e notável suporte administrativo fornecido ao longo dos anos de pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido durante o curso desta pesquisa.

“A partir das letras construo meu conhecimento”

Ulisses Chemin Netto

Resumo

CHEMIN NETTO, U. **Determinação de um Parâmetro para Monitoramento do Desempenho de Mensagens GOOSE do Padrão IEC 61850 Utilizadas em Subestações de Energia Elétrica.** 2012. 179f . Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

O desenvolvimento e utilização do padrão IEC 61850 alterou a concepção e operação das subestações de energia elétrica. O desempenho e confiabilidade do sistema de proteção depende da rede de comunicação de dados. Esta pesquisa propõe um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) entre *Intelligent Electronic Devices* (IEDs). Esse parâmetro foi obtido através do levantamento experimental da curva do tempo de transferência das mensagens GOOSE *versus* a ocupação percentual da largura de banda dos IEDs. Para a realização dos experimentos foram utilizados três IEDs, um *switch Ethernet* gerenciável, três microcomputadores do tipo PC, um relógio sincronizador *Global Positioning System* (GPS), cordões de fibra óptica, cabos do tipo par trançado sem blindagem e aplicativos de *software*. Os resultados mostraram que a partir de um limiar característico, o qual é distinto para cada IED ensaiado, o tempo de transferência excede o limite máximo permitido pelo padrão IEC 61850. A partir da análise destes dados, foi desenvolvido um sistema preditivo de monitoramento de banda para supervisionar a interface de rede dos IEDs. O sistema preditivo apresentou para a medição de banda um erro relativo médio igual a 0,55% em relação ao aplicativo comercial utilizado na comparação, já a predição feita pela rede neural artificial apresentou um erro de estimativa menor do que 3% para 91,30% das amostras utilizadas, além de modelar adequadamente o comportamento da série temporal que representa a ocupação de banda do IED monitorado.

Palavras-Chave: Gerência de Redes, IEC 61850, *Intelligent Electronic Devices*, *Local Area Network*, Mensagem GOOSE, Proteção Digital, Redes Neurais Artificiais, Sistemas Elétricos de Potência.

Abstract

CHEMIN NETTO, U. **Determination of a Parameter for Monitoring the Performance of GOOSE Messages used in Electric Power Substations.** 2012. 179f. Thesis (PhD Degree) - Engineering School of Sao Carlos. University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2012.

The development and utilization of IEC 61850 standard changed the design and operation of electric power substations. The performance and reliability of the protection system depends on the data communication network. This research proposes a parameter for dimensioning and comparing the transfer time of Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) messages between different Intelligent Electronic Devices (IEDs). This parameter was obtained from experimental data related to the transfer time of GOOSE messages curve versus IED's bandwidth percentage occupation. In this context, a laboratory structure was set up in order to carry out these experiments. This structure mainly consists of three IEDs, an Ethernet switch, three personal computers, a GPS Clock, fiber optic cables, unshielded twisted pair cables, as well as support software. The results show the existence of a characteristic threshold, different for each IED tested, after which the transfer time exceeded the total transmission time allowed for the IEC 61850 standard. Based on these results, a predictive bandwidth monitoring system was developed to supervise the IED's bandwidth interface. The bandwidth measurement has a mean relative error of 0.55% regarding to the commercial software used for comparison. Finally, the forecasting made by the artificial neural network has a relative error of 3% for 91,30% of the samples used in test phase. In addition, that it was able to model the behaviour of the time series that represent the bandwidth occupation.

Keywords: Artificial Neural Networks, Digital Protection, Electrical Power System, IEC 61850, GOOSE Message, Intelligent Electronic Devices, Local Area Network, Network Management.

Sumário

Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxv
Lista de Abreviaturas e Siglas	xxvii
1 Um Novo Paradigma para as Subestações de Energia Elétrica	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivo da Pesquisa	6
1.3 Contribuições da Pesquisa	6
1.4 Organização do Texto	7
1.5 Comentários Finais	7
2 Panorama da Proteção de Sistemas Elétricos de Potência	9
2.1 Elementos Componentes do Sistema de Proteção	9
2.2 Alimentação Auxiliar	12
2.3 Transdutores para Instrumentos	13
2.3.1 Transformadores Eletromagnéticos	13
2.3.2 Sensor Óptico de Corrente	16
2.3.3 Sensor Óptico de Tensão	18
2.4 Disjuntor de Alta Tensão	19
2.5 Relés	20
2.5.1 Relés Eletromecânicos	21
2.5.2 Relés Estáticos	22
2.5.3 Relés Digitais	25
2.6 Zonas de Proteção	28

2.6.1	Proteção Principal, Alternada e de Retaguarda	29
2.6.2	Seletividade e Coordenação	30
2.7	Comunicação de Dados Aplicada aos Relés Digitais	33
2.8	Comentários Finais	35
3	Redes de Computadores Aplicadas a Subestações de Energia Elétrica	37
3.1	Automação de Subestações de Energia Elétrica	37
3.2	Topologia Lógica para <i>Local Area Network</i>	38
3.3	Topologia Física para <i>Local Area Network</i>	38
3.3.1	Topologia em Barramento	39
3.3.2	Topologia em Estrela	40
3.3.3	Topologia em Anel	41
3.4	<i>Hardware</i> Utilizado em <i>Local Area Networks</i>	42
3.4.1	Cartão de Interface de Rede	42
3.4.2	<i>Switch</i>	43
3.5	Modelo OSI	43
3.5.1	<i>Ethernet</i>	46
3.5.2	O Modelo TCP/IP	49
3.5.3	<i>User Datagram Protocol</i>	51
3.6	Qualidade de Serviço (QoS)	53
3.7	Comentários Finais	56
4	O Padrão IEC 61850	57
4.1	Motivações e Histórico sobre o Padrão IEC 61850	57
4.2	Composição Geral	59
4.3	Parte 5 - Requisitos de Comunicação	59
4.4	Parte 6 - Linguagem de Configuração	63
4.5	Parte 8 - Serviços de Comunicação Específicos	65
4.6	Vantagens e Desvantagens do Padrão IEC 61850	71
4.7	Comentários Finais	72
5	Parâmetro de Dimensionamento para Mensagens GOOSE	75
5.1	Fluxograma de Trabalho	75
5.2	Avaliação do Comportamento do Tempo de Transferência	77
5.3	Resultados e Discussões	88
5.3.1	Validação do Aparato Laboratorial	91
5.3.2	Resultados para o Perfil Zero	92

5.3.3	Resultados para o Perfil 1	96
5.3.4	Resultados para o Perfil 2	100
5.3.5	Resultados para o Perfil 3	104
5.3.6	Resultados para o Perfil 4	108
5.3.7	Resultados para o Perfil 5	112
5.3.8	Resultados para o Perfil 6	116
5.3.9	Resultados para o Perfil 7	120
5.4	Comentários Finais	124
6	Sistema Preditivo de Monitoramento de Banda	127
6.1	Introdução	127
6.2	<i>Simple Network Management Protocol</i>	128
6.3	Séries Temporais	128
6.4	Redes Neurais Artificiais	130
6.4.1	Arquitetura e Topologia da Rede Neural Artificial (RNA)	132
6.4.2	Processo de Treinamento	133
6.4.3	Rede PMC com entradas Atrasadas no Tempo	135
6.5	Sistema Preditivo Desenvolvido	135
6.5.1	Medição de Tráfego e Cálculo da Banda Utilizada	136
6.5.2	Predição da Ocupação de Banda	138
6.5.3	Registro de Ocorrência	143
6.6	Resultados e Discussões	145
6.6.1	Medição e Cálculo do Percentual de Ocupação de Banda	145
6.6.2	Predição do Percentual de Ocupação de Banda	146
6.7	Interface Gráfica	153
6.8	Comentários Finais	159
7	Conclusões	161
7.1	Comentários Finais sobre o Parâmetro de Dimensionamento	161
7.2	Comentários Finais sobre o Sistema Preditivo	163
7.3	Continuidade da Pesquisa	164
	Referências Bibliográficas	165

Lista de Figuras

1.1	Níveis hierárquicos para o SAS.	4
2.1	Pontos notáveis do Sistema Elétrico de Potência.	9
2.2	Requisitos para o sistema de proteção.	10
2.3	Subsistemas de proteção.	11
2.4	Esquema de ligação para a alimentação auxiliar.	12
2.5	Classificação dos transformadores para instrumentos.	13
2.6	Curva de saturação de TCs.	14
2.7	Efeito Faraday.	16
2.8	Detalhes Transformador de Corrente (TC) óptico.	17
2.9	Efeito Pockels.	18
2.10	Exemplo de relé eletromecânico.	22
2.11	Diagrama de blocos para um relé estático genérico.	23
2.12	Exemplo de relé estático.	24
2.13	Arquitetura de um relé digital.	25
2.14	Funcionalidades genéricas de um relé de proteção digital.	27
2.15	Exemplo de relé digital comercial.	28
2.16	Representação esquemática das zonas de proteção.	29
2.17	Proteção principal, alternada e retaguarda.	31
2.18	Sistema radial com uma fonte e ponto de falta.	31

3.1	Topologia em barramento.	39
3.2	Topologia em estrela.	40
3.3	Topologia em anel.	41
3.4	Modelo <i>Open Systems Interconnection</i> (OSI).	44
3.5	Evolução da <i>Ethernet</i>	46
3.6	Representação camada física e enlace IEEE 802.	47
3.7	Camadas OSI <i>vs</i> TCP/IP.	50
3.8	Quadro MAC <i>Ethernet</i> com marcação de prioridade.	54
3.9	Formação de filas ponderadas - WFQ.	55
4.1	Principais protocolos usados para automação.	58
4.2	Níveis para o sistema de automação de subestações.	61
4.3	Conexões entre nós lógicos.	62
4.4	Relação entre nó lógico, dispositivo lógico e <i>Intelligent Electronic Device</i> (IED).	62
4.5	Linguagem de configuração da subestação.	64
4.6	Pilha de protocolos IEC 61850 simplificada.	65
4.7	Mecanismo de retransmissão de mensagens GOOSE.	67
4.8	Tempo de transferência.	68
4.9	Arquitetura para automação contendo apenas barramento de estação.	69
4.10	Arquitetura para automação contendo barramento de processo e estação.	70
4.11	Exemplo de <i>Merging Unit</i> (MU).	71
4.12	Dados utilização IEC 61850 no Brasil.	74
5.1	Fluxograma de trabalho.	76
5.2	Montagem dos equipamentos utilizados.	78
5.3	Diagrama unifilar simplificado SE exemplo.	81
5.4	Arquitetura do sistema de proteção e controle da SE exemplo.	82

5.5	Esquema de ensaio utilizado.	83
5.6	Exemplo de tráfego extra para 85% da ocupação de banda.	85
5.7	Lógica digital para geração de mensagens GOOSE.	86
5.8	Saída da lógica desenvolvida.	87
5.9	Endereçamento das mensagens GOOSE 1 e 2.	89
5.10	Representação esquemática para o aplicativo de análise dos dados.	90
5.11	Algoritmo para determinação das perdas de mensagens GOOSE.	90
5.12	Resultados verificação sistema laboratorial.	91
5.13	Perdas para o perfil 0.	93
5.14	Tempo de transferência para o perfil 0.	94
5.15	Máximo, mínimo e desvio padrão perfil 0.	95
5.16	Perdas para o perfil 1.	97
5.17	Tempo de transferência para o perfil 1.	98
5.18	Máximo, mínimo e desvio padrão perfil 1.	99
5.19	Perdas para o perfil 2.	101
5.20	Tempo de transferência para o perfil 2.	102
5.21	Máximo, mínimo e desvio padrão perfil 2.	103
5.22	Perdas para o perfil 3.	105
5.23	Tempo de transferência para o perfil 3.	106
5.24	Máximo, mínimo e desvio padrão perfil 3.	107
5.25	Perdas para o perfil 4.	109
5.26	Tempo de transferência para o perfil 4.	110
5.27	Máximo, mínimo e desvio padrão perfil 4.	111
5.28	Perdas para o perfil 5.	113
5.29	Tempo de transferência para o perfil 5.	114
5.30	Máximo, mínimo e desvio padrão perfil 5.	115

5.31	Perdas para o perfil 6.	117
5.32	Tempo de transferência para o perfil 6.	118
5.33	Máximo, mínimo e desvio padrão perfil 6.	119
5.34	Perdas para o perfil 7.	121
5.35	Tempo de transferência para o perfil 7.	122
5.36	Máximo, mínimo e desvio padrão perfil 7.	123
6.1	Representação para o neurônio artificial.	130
6.2	Funções de ativação.	131
6.3	Rede neural artificial.	133
6.4	Topologia para a TDNN.	135
6.5	Concepção para o sistema preditivo de Banda.	137
6.6	Janelamento da série temporal para apresentação à RNA.	139
6.7	Esquema laboratorial utilizado.	140
6.8	Formação dos conjuntos de treinamento e teste para a RNA.	141
6.9	Separação conjuntos treinamento/teste.	144
6.10	Topologia para a RNA utilizada.	144
6.11	Exemplo de relatório de ocorrência.	145
6.12	Resultado da predição para 15% de ocupação de banda.	147
6.13	Histograma erro relativo RNA 15%.	147
6.14	Resultado da predição para 35% de ocupação de banda.	148
6.15	Histograma erro relativo RNA 35%.	148
6.16	Resultado da predição para 55% de ocupação de banda.	149
6.17	Histograma erro relativo RNA 55%.	149
6.18	Resultado da predição para 75% de ocupação de banda.	150
6.19	Histograma erro relativo RNA 75%.	150
6.20	Resultado da predição para 95% de ocupação de banda.	151

6.21	Histograma erro relativo RNA 95%	151
6.22	Resultado da predição para todo o conjunto de teste.	152
6.23	Histograma erro relativo RNA geral.	152
6.24	Tela inicial para o sistema desenvolvido.	154
6.25	Seleção do agente a ser monitorado.	154
6.26	Seleção interface a ser monitorada.	155
6.27	Medição da interface monitorada.	156
6.28	Predição para a interface monitorada.	156
6.29	Inserção do parâmetro de dimensionamento.	157
6.30	Monitoramento da região de operação 1.	157
6.31	Monitoramento da região de operação 2.	158
6.32	Gravação de dados pelo usuário.	158

Lista de Tabelas

3.1	Descrição camadas modelo OSI.	45
3.2	Breve descrição das camadas físicas <i>Ethernet</i>	48
3.3	Descrição camadas modelo TCP/IP.	50
3.4	Portas padrão utilizadas com o <i>User Datagram Protocol</i> (UDP).	52
3.5	Classes de tráfego.	54
3.6	Número de filas por classes de tráfego.	56
4.1	Documentação para o padrão IEC 61850.	60
4.2	Grupos de nós lógicos segundo a versão 1.0 da IEC 61850.. . . .	63
4.3	Arquivos <i>Substation Configuration Language</i> (SCL).	64
4.4	Classificação de mensagens para o padrão IEC 61850.	66
5.2	Parâmetros de configuração aplicados ao esquema de ensaio.	83
5.3	Ajuste dos pesos no mecanismo de <i>Quality of Service</i> (QoS).	84
5.4	Patamares ocupação banda IED.	85
5.5	Mapeamento das atribuições de dados do NL GGIO para os IEDs 1 e 2.	88
5.7	Comparação entre os resultados de cada perfil caracterizado para o IED 2.	125
5.9	Comparação entre os resultados de cada perfil caracterizado para o IED 3.	125
6.1	Comparação da ocupação percentual de banda nominal (BN).	146
6.2	Percentual de acerto da predição.	146

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACSI *Abstract Communication Service Interface*

A/D Conversor Analógico/Digital

AG Algoritmo Genético

ARPANET *Advanced Research Projects Agency Network*

ASCII *American Standard Code for Information Interchange*

ATM *Asynchronous Transfer Mode*

BE Barramento de Estação

BP Barramento de Processo

BNC *Bayonet Neil Concelman*

CFI *Canonical Format Identifier*

CID *Configured IED Description*

CLP Controlador Lógico Programável

CoS *Class of Service*

CSMA/CD *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*

DDR *Double Data Rate*

DNP3.0 *Distributed Network Protocol 3.0*

DNS *Domain Name Service*

DoS *Denial of Service*

DSP *Digital Signal Processor*

EAT *Extra-Alta Tensão*

EPRI *Electric Power Research Institute*

FDDI *Fiber Distributed Data Interface*

FIFO *First-in, First-out*

FTP *File Transfer Protocol*

GGIO *Generic Function References, Generic Process I/O*

GOOSE *Generic Object Oriented Substation Event*

GPS *Global Positioning System*

GSE *Generic Substation Events*

GSSE *Generic Substation Status Event*

HTTP *Hypertext Transfer Protocol*

IANA *Internet Assigned Numbers Authority*

ICD *IED Capability Description*

IEC *International Electrotechnical Commission*

IED *Intelligent Electronic Device*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IETF *Internet Engineering Task Force*

IHM *Interface Homem Máquina*

IRIG *Inter Range Instrumentation Group*

ISO *International Organization for Standardization*

LAN *Local Area Network*

LED *Light-Emitting Diode*

LLC *Logic Link Control*

LT *Linha de Transmissão*

MAC *Media Access Control*

MIB *Management Information Base*

MMS *Manufacturing Messaging Specification*

MU *Merging Unit*

NFS *Network File System*

NIC *Network Interface Card*

NIST *National Institute of Standards and Technology*

NL *Nó Lógico*

OSI *Open Systems Interconnection*

PARC *Palo Alto Research Center*

PLC *Programmable Logic Controller*

PIT *Programa de Inspeção e Ensaio*

PMC *Perceptron de Múltiplas Camadas*

QEE *Qualidade da Energia Elétrica*

QoS *Quality of Service*

RAM *Random Access Memory*

RBE *Report by Exception*

RBF *Radial Basis Function*

RIP *Routing Information Protocol*

RFC *Request for Comments*

RNA *Rede Neural Artificial*

Rprop *Resilient-Propagation*

RSE Registro Sequencial de Eventos

RSTP *Rapid Spanning Tree Protocol*

UTR Unidade Terminal Remota

SAS Sistema de Automação de Subestações

SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*

SCD *Substation Configuration Description*

SDRAM *Synchronous Dynamic RAM*

SCL *Substation Configuration Language*

SCSM *Specific Communication Service Mapping*

SE Subestação de Energia Elétrica

SF Sistema *Fuzzy*

SEP Sistema Elétrico de Potência

SIN Sistema Interligado Nacional

SMTP *Simple Mail Transfer Protocol*

SNMP *Simple Network Management Protocol*

SSD *System Specification Description*

SP Sistema de Proteção

ST *Straight Tip*

STP *Shielded Twisted Pair*

TCP/IP *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*

TC Transformador de Corrente

TCI *Tag Control Information*

TDNN *Time Delay Neural Network*

TP Transformador de Potencial

TSA Transformador de Serviço Auxiliar

TTL *Transistor-Transistor Logic*

UCA *Utility Communications Architecture*

UDP *User Datagram Protocol*

UPS *Uninterruptible Power Supply*

UTP *Unshielded Twisted Pair*

UTR Unidade Terminal Remota

VLAN *Virtual LAN*

WAN *Wide Area Network*

WFQ *Weighted Fair Queuing*

XML *eXtender Markup Language*

Capítulo 1

Um Novo Paradigma para as Subestações de Energia Elétrica

Neste capítulo será apresentado o contexto em que este trabalho se insere, os objetivos propostos, as contribuições esperadas, bem como a organização deste documento.

1.1 Introdução

Funções de Controle, supervisão, medição, análise de eventos, comunicação de dados, oscilografia, assim como a proteção em si, são algumas das ferramentas disponíveis para os engenheiros que trabalham com IEDs¹ aplicados ao Sistema Elétrico de Potência (SEP). Essas características levaram a algumas alterações em termos da concepção e operação do SEP. Uma delas é a capacidade que os IEDs têm de controlar e automatizar sistemas, simplificando a arquitetura dos painéis existentes nas Subestações de Energia Elétrica (SEs) que compõe seu controle, comando e proteção. Algumas implicações diretas disto são a diminuição no tempo de construção, comissionamento e manutenção do sistema como um todo, além do aumento na confiabilidade e flexibilidade do controle, comando e proteção estabelecidos (IEC, 2009; Brunner, 2008; Lloret *et al.*, 2007; Kim e Lee, 2005).

Para satisfazer as demandas por qualidade de produto, de serviço, redução de custos e confiabilidade, uma grande quantidade de informações deve ser obtida e processada pelo Sistema de

¹Trata-se de uma denominação generalista para os equipamentos microprocessados utilizados em sistemas elétricos de potência, como por exemplo, relés de proteção, unidades de controle, etc., que sejam capazes de trocar informações e/ou ações de comando com outros dispositivos.

Automação de Subestações (SAS) (Hou e He, 2010; Hassan e Radman, 2010; Xin-Wei e Qiang, 2010; McDonald, 2007). Esta necessidade foi estabelecida após a desregulamentação do setor elétrico, iniciada mundialmente nos anos 1990. No entanto, para atingir esses objetivos, as informações a serem resgatadas não estão apenas em uma SE, mas sim distribuídas. A fim de manter o SEP operando de forma normal e segura, é necessário aproveitar todas as tecnologias modernas disponíveis, como as redes de comunicação de dados, tecnologia da informação e automação distribuída. Nesse cenário cabe ressaltar a capacidade de comunicação e integração dos IEDs ao SAS. Esse conjunto de características representa o arcabouço sobre o qual os *smart grids* são estabelecidos (Hassan e Radman, 2010; Moslehi e Kumar, 2010).

Nesse panorama, muitos protocolos de comunicação para a automação das SEs foram criados. Este fato pode se tornar um obstáculo para a expansão e integração de diversos SAS pois, soluções caras e complexas precisam ser implementadas para possibilitar a troca de informações entre protocolos distintos. Além disso a comunicação direta (*peer-to-peer*) entre IEDs pode se tornar inviável. Para resolver essas questões, o padrão internacional IEC 61850, Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações, foi criado para uniformizar diversos aspectos de comunicação entre equipamentos da SE, de acordo com suas 10 partes constituintes (Mackiewicz, 2006; IEC, 2003a).

A proposta fundamental do padrão mencionado anteriormente é prover uniformidade para as redes de comunicação de dados, com a possibilidade de comunicação direta entre IEDs, adaptação a tecnologias futuras², bem como menores custos de implantação e manutenção, por exemplo, no âmbito de um SAS (Mackiewicz, 2006; IEC, 2003a; Proudfoot, 2002). Sua adoção implica em mudanças nos paradigmas das concessionárias de energia elétrica, o que envolve a formação dos profissionais, seja no planejamento, execução, comissionamento ou operação das SEs (Zhang e Nair, 2008; Brand, 2007).

O padrão supracitado define a representação de objetos e informações para descrever os elementos do SEP. Ele apresenta modelos de interface, *Abstract Communication Service Interface* (ACSI), que expõem a forma abstrata como os dados são trocados. Os objetos criados são independentes de protocolos subjacentes, o que implica em tornar possível o mapeamento desses para outro protocolo futuro que possua procedimentos de comunicação adequados e que satisfaçam os requisitos de dados e serviços postos pelo padrão IEC 61850.

Os modelos definidos dividem as funções do SAS em elementos fundamentais denominados de

²Como por exemplo, a inserção de novos modelos para elementos do sistema elétrico e aplicação em outros tipos de instalações, como as usinas hidroelétricas.

Nós Lógicos (NLs), constituindo, aproximadamente, 90 tipos distintos. Cada NL representa um elemento de interesse no contexto das SEs, como um disjuntor ou chave seccionadora, além de funcionalidades, recursos e métodos, como elementos de proteção, pontos de controle, monitoramento, algoritmos, etc. (Lloret *et al.*, 2007; Rodrigues *et al.*, 2006; IEC, 2003c,d). Esse conjunto de padronizações para interfaces e objetos possibilita a interoperabilidade entre diferentes tipos de IEDs, independentemente de seu fabricante.

Para cada tipo de aplicação, como o envio do sinal de abertura ao disjuntor ou bloqueio, por exemplo, o fluxo da informação através dos NLs irá implicar em requisitos de desempenho distintos, de acordo com restrições de tempo padronizadas. Desta forma, o padrão IEC 61850, em sua quinta parte, descreve cinco tipos de mensagens, entre as quais mensagens para fins de proteção e comando, sendo as de maior interesse as do tipo 1 (mensagens rápidas), utilizadas, por exemplo, para intertravamentos e 1A para *trip*³, classificadas como *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE)⁴ (IEC, 2003c). Neste trabalho, a utilização do padrão mencionado, está focada no tipo de comunicação *peer-to-peer*, ou seja, a transferência bidirecional da informação entre dois NLs através de mensagens GOOSE do tipo 1A/1 (Kim e Lee, 2005; Sidhu e Gangadharan, 2005; IEC, 2004b, 2003c).

Nessa nova concepção de SE a rede de comunicação de dados aplicada é do tipo *Local Area Network* (LAN) e está disposta em até três níveis hierárquicos do SAS, a saber: processo, *bay* e estação, conforme a representação simplificada apresentada na Figura 1.1 (Olifer e Olifer, 2006; Schumacher *et al.*, 2007; Rodrigues, 2005). O nível de processo contém os transdutores de medidas, os dispositivos de manobra, seccionamento, transformação, entre outros. Já o nível de estação contém os dispositivos de comunicação, o sistema *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e todas as Interfaces Homem Máquina (IHMs) e estações de configuração necessárias a supervisão e controle da SE.

O nível de *bay* contém os IEDs existentes na SE, os quais recebem informações do nível de processo por meio do Barramento de Processo (BP) e trocam informações entre si pelo Barramento de Estação (BE), ambos estão definidos nas partes 8.1 e 9.2 do padrão IEC 61850, respectivamente (Kaneda *et al.*, 2008; IEC, 2004b,c).

Para o nível de *bay* é possível utilizar mais de um tipo de topologia física, como ponto-a-ponto, estrela, anel ou malha, cada uma com características particulares, conforme descrição

³Sinal enviado por uma função de proteção a um disjuntor de alta tensão para promover sua abertura.

⁴É uma mensagem ou mecanismo de transmissão rápida de eventos de subestações, que contém o relatório assíncrono de eventos dos IEDs como comandos, alarmes, indicações e mensagens.

Figura 1.1: Níveis hierárquicos para o SAS.

apresentada na Seção 3.3. Neste trabalho será utilizada apenas a topologia em estrela, devido às facilidades de instalação e reconfiguração da rede, robustez, simplicidade em identificar e isolar falhas (Mo *et al.*, 2010; Forouzan, 2007; Olifer e Olifer, 2006; IEEE, 2006; Tanenbaum, 2002). Para a finalidade de análise de tráfego, a topologia em estrela é a melhor representação pois, os IEDs estão interconectados através de um único enlace de rede, o que diminui os atrasos fim-a-fim existentes.

Os elementos que compõem a LAN da SE, bem como suas configurações, implicam diretamente em seu desempenho e confiabilidade (Chelluri *et al.*, 2010; Sidhu *et al.*, 2008). Dessa forma, a afirmação anterior se torna objeto de maior preocupação em relação ao funcionamento global da SE, particularmente no que se refere ao Sistema de Proteção (SP), pois, é preciso assegurar que as funções que o compõem atuarão corretamente quando forem necessárias (Blackburn e Domin, 2007; Elmore, 2004).

O uso do padrão IEC 61850 para automação de SEs é incipiente no Brasil e no mundo (Herrmann *et al.*, 2006). Segundo Abboud *et al.* (2008) a subestação Guarujá 2, de propriedade da companhia Elektro Eletricidade e Serviços S.A., é um dos primeiros exemplos de construção de um SAS baseado em IEDs que utilizam o padrão IEC 61850. Sua implementação data do ano de 2007. Logo, vê-se que o padrão mencionado ainda passa por um processo de implantação no SEP brasileiro e, portanto, é de fundamental importância a capacitação de pessoal, a realização de experimentos práticos que comprovem a eficiência das novas soluções por ele trazidas e o desenvolvimento de novas metodologias de análise, ressaltando-se também as dificuldades que

são encontradas e como estas foram superadas (Santos e Pereira, 2007).

Os autores Sidhu e Yin (2007) apresentam em seu trabalho modelos computacionais genéricos para IEDs, desenvolvidos com o auxílio da ferramenta *OPNET Modeler*. A utilização dos modelos criados e seu uso conjunto com o ambiente de simulação fornecem uma solução adequada para resolver problemas relativos ao desempenho de um SAS. Nota-se ainda a necessidade do uso do mecanismo de prioridade de mensagens para diminuição dos atrasos fim-a-fim em condições de tráfego acentuadas.

Sidhu *et al.* (2008) discutem os desafios para implementação prática de um SAS baseado no padrão IEC 61850. São analisadas em detalhes questões relativas ao sistema de comunicação para o BE e BP, como por exemplo, topologia física da rede de comunicação de dados, desempenho das mensagens e coordenação de funções distribuídas. Além disso, tópicos referentes ao planejamento e funcionalidades são debatidas, como confiabilidade, redundância e treinamento de pessoal. Um conjunto de prescrições baseadas nos pontos analisados é fornecida, visando ao estabelecimento de um SAS com adequada configuração, confiabilidade, desempenho e custo.

Kanabar e Sidhu (2011) analisaram para o BP, o desempenho das mensagens do tipo *sample values* para fins de controle e proteção, em relação ao seu tempo de entrega e extravio. O sistema corretivo proposto no estudo, baseado na estimação de valores amostrados, compensa as perdas ou atrasos de tempo que tais mensagens possam sofrer, com baixo esforço computacional e pequeno erro de estimação. A influência dos parâmetros de rede sobre o tempo de entrega e extravio das mensagens observados, fornecem subsídios para uma melhor configuração do SAS.

Utilizando a ferramenta de simulação *OPNET modeler*, os pesquisadores Sidhu *et al.* (2010) programaram em modelos de IEDs quatro algoritmos distintos para escalonamento de pacotes. Foi analisada em detalhes a influência de cada algoritmo sobre o tempo de transferência de mensagens GOOSE durante as condições de tráfego caracterizadas. Os resultados mostram uma diminuição de 87% do valor inicial para o tempo de transferência, considerando o algoritmo de escalonamento de melhor desempenho.

No contexto delineado, se observa, portanto, que estabelecer um SAS sobre o padrão IEC 61850 com desempenho adequado, confiabilidade e sem efeitos prejudiciais sobre o SP é uma tarefa complexa. Existem várias considerações relativas a sua constituição, configuração e operação a serem feitas, as quais necessitam serem apoiadas em fatos que explicitem as relações de causa/efeito prováveis para cada decisão tomada.

1.2 Objetivo da Pesquisa

O objetivo desta pesquisa é estabelecer inicialmente um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens GOOSE. Esse parâmetro de dimensionamento e avaliação de desempenho foi obtido através do levantamento experimental da curva do tempo de transferência das mensagens GOOSE *versus* a ocupação percentual da largura de banda dos IEDs.

A obtenção daquele foi realizada através do estabelecimento de uma plataforma experimental que representa em escala reduzida um SAS baseado no atual paradigma de construção de uma SE, ou seja, pelo uso de IEDs e o padrão IEC 61850. Para tal foram empregados IEDs, *switch* gerenciáveis, microcomputadores do tipo PC, cordões de fibra óptica, cabos do tipo par trançado sem blindagem, aplicativos de *software* para configuração dos equipamentos, geração de sobrecarga sobre os IEDs e análise de resultados.

A partir do parâmetro supracitado foi desenvolvido um sistema preditivo para monitorar a ocupação da banda dos IEDs que compõe o SAS. O objetivo desse é acompanhar de forma permanente a ocupação da banda dos IEDs e caso essa ultrapasse um certo limiar característico, determinado pelo parâmetro anteriormente obtido, alertar de forma prévia a operação da SE.

Esse sistema será executado através de uma interface computacional em uma plataforma de *hardware* do tipo PC compatível. Para isso serão utilizados o *Simple Network Management Protocol* (SNMP) e Redes Neurais Artificiais (RNAs) pelo uso da linguagem de programação C/C++ em conjunto com o sistema operacional GNU/Linux.

1.3 Contribuições da Pesquisa

Em relação ao tema aqui abordado esta pesquisa de doutorado irá auxiliar a construção do conhecimento das seguintes formas:

- Contribuir para surgimento de massa crítica em relação ao uso do padrão IEC 61850;
- Analisar o comportamento do tempo de transferência considerando a ocupação percentual da banda dos IEDs;
- Propor uma metodologia para realizar esse tipo de análise;
- Propor um parâmetro para comparação de desempenho do tempo de transferência;

- Desenvolver um sistema preditivo de monitoramento de ocupação da banda dos IEDs.

1.4 Organização do Texto

Em sua totalidade, este documento é composto por sete capítulos, os quais serão brevemente apresentados a seguir.

O Capítulo 1, intitulado “Um Novo Paradigma para as Subestações de Energia Elétrica” apresenta o contexto em que este trabalho se insere, os objetivos propostos, as contribuições esperadas, bem como a organização deste documento. No Capítulo 2, “Panorama Geral da Proteção de Sistemas Elétricos de Potência” são expostos, de forma concisa, os elementos que constituem o SP, suas funções, as demandas a serem atendidas, bem como alguns elementos da filosofia da proteção, com o intuito de familiarizar o leitor com relação ao objeto de estudo deste trabalho.

No Capítulo 3, “Fundamentos das Redes de Computadores aplicadas a Subestações de Energia Elétrica”, o leitor é apresentado ao modelo ISO/OSI e às características das redes LAN aplicadas as SEs, fornecendo subsídios para melhor entendimento dos capítulos 4 e 5. O Capítulo 4, denominado “O Padrão IEC 61850”, fornece ao leitor uma visão geral sobre o padrão IEC 61850, destacando os pontos principais desse, aplicados na realização da etapa experimental desta pesquisa. No Capítulo 5, “Parâmetro de Dimensionamento para Mensagens GOOSE”, é descrito o arranjo em laboratório utilizado para estabelecer um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens GOOSE entre IEDs.

O Capítulo 6, “Sistema Preditivo de Monitoramento de Banda”, é apresentada a concepção de um sistema computacional desenvolvido para monitorar de forma permanente a ocupação percentual da banda de comunicação dos IEDs. São descritos em detalhes seus módulos componentes e apresentados os resultados obtidos com esse. Por fim, no Capítulo 7, denominado “Conclusões” são apresentadas as principais conclusões sobre os resultados obtidos e os pontos de continuidade para a pesquisa.

1.5 Comentários Finais

A área de proteção de sistemas elétricos é conservadora, logo é necessário apresentar, através de experimentos e avaliações práticas, as diferenças entre o novo e o antigo modelo para

composição de SPs, com foco em suas vantagens, desafios, benefícios e possibilidades.

Segundo o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) o padrão IEC 61850 é apontado como um dos cinco padrões internacionais fundamentais para o estabelecimento de *Smart Grids* confiáveis, eficientes e seguros ciberneticamente, de modo que desenvolvimentos científicos e tecnológicos que enfoquem o uso desse padrão são relevantes (NIST, 2010).

As demais normas fundamentais, segundo o NIST (2010) são o IEC 61970 (*Energy Management System Application Program Interfaces*), IEC 61968 (*Application Integration at Electric Utilities*), IEC 60870-6 (*IEC 60870-6-503: TASE.2 Services and Protocol; IEC 60870-6-702: Functional Profile for Providing the TASE.2 Application Service in End Systems; IEC 60870-6-802: TASE.2 Object Models; and IEC TR 60870-6-505 Amendment 1: TASE.2 User Guide*) e IEC 62351 (*Power Systems Management and Associated Information Exchange - Data and Communications Security*).

As mudanças trazidas pela adoção do padrão IEC 61850 não podem ser negligenciadas na concepção, execução, formação de recursos humanos e operação das SEs. Esta mudança de paradigma necessitará de certo tempo para ser adequadamente aplicada, devido ao conhecimento necessário acerca da tecnologia desenvolvida. Tal fato é observado em relação a sua utilização no Brasil e no mundo, a qual é incipiente no começo dos anos 2000.

Como foi apontado ao longo deste capítulo, vê-se que um SP estabelecido através do padrão IEC 61850 pode ter seu funcionamento comprometido devido a anomalias, como defeitos em *softwares*, uso abusivo de recursos da rede, falhas em equipamentos, erros em configurações e ataques, na rede de comunicação de dados (Zarpelão, 2010). Dessa forma, é preciso especificar adequadamente os IEDs, além de monitorar de forma permanente as condições de tráfego na rede de comunicação de dados, para poder alertar a operação da SE a respeito de qualquer irregularidade iminente.

Com este trabalho é mostrado a gestores, projetistas e demais interessados no planejamento e operação do SEP um estudo consistente e aplicado para entendimento e utilização de redes de IEDs sob o padrão IEC 61850, visando a manutenção de adequado desempenho e confiabilidade do SP.

Capítulo 2

Panorama da Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Neste capítulo são expostos os elementos que constituem o SP, suas funções, as demandas a serem atendidas, bem como alguns elementos da filosofia da proteção, com o intuito de familiarizar o leitor em relação ao objeto de estudo desta pesquisa.

2.1 Elementos Componentes do Sistema de Proteção

Convencionou-se chamar de SEP ao conjunto de infraestruturas responsáveis pela geração, transmissão e distribuição da energia elétrica (Santos e Pereira, 2007). A Figura 1 ilustra, de forma genérica, um SEP, para o qual: 1 – Geração, 2 – Subestação Elevadora, 3 – Transmissão, 4 – Subestação Abaixadora, 5 – Distribuição e 6 – Uso Final.

Figura 2.1: Pontos notáveis do Sistema Elétrico de Potência.

Fonte: Energies (2011)

Independentemente ao porte do SEP, o mesmo está sujeito a uma série de fenômenos que podem implicar em afastamento das condições tidas como normais e seguras para sua operação, como por exemplo, os curtos-circuitos (Sato, 2005).

Suas vulnerabilidades e consequentemente as implicações técnicas e econômicas que acarretam, motivaram a criação do SP. Pode-se dizer que o SP é um conjunto de filosofias e equipamentos para detecção de situações anormais à operação do SEP, com o intuito de prevenir danos permanentes aos equipamentos que o compõe, salvaguardar a integridade física das pessoas que o operam e seus usuários, buscar tempos de interrupção no fornecimento de energia elétrica tão pequenos quanto possível e minimizar a influência de um defeito local sobre o restante do SEP (Anderson, 1999; Harder e Cunningham, 1997).

Para que os objetivos do SP sejam atingidos é necessário que todos os subsistemas envolvidos funcionem adequadamente em conjunto e com elevada confiabilidade (Elmore, 2004). A Figura 2.2 ilustra o conjunto desejável de qualidades para um SP.

Figura 2.2: Requisitos para o sistema de proteção.

Sobre os atributos apresentados na Figura 2.2 se pode dizer (Blackburn e Domin, 2007; Maezono, 2003):

- Seletividade: maximizar a continuidade do serviço de fornecimento de energia, desconectando o mínimo do sistema em situação de falta;
- Confiabilidade: assegurar que a proteção atuará corretamente quando for necessária, distinguindo entre situações de falta e condições normais de operação;
- Velocidade: característica que garante o mínimo tempo de falha, para um mínimo de danos

ou instabilidade no comportamento do sistema protegido;

- Economia: No sentido de se ter máxima proteção ao menor custo, considerando sempre o aspecto custo x benefício.
- Simplicidade: Característica que leva em conta o menor uso de equipamentos e circuitos na execução da filosofia de proteção desejada;
- Manutenibilidade: É a capacidade da proteção permitir manutenção rápida e precisa, reduzindo-se ao mínimo o tempo fora de serviço e os custos de manutenção.

O SP é constituído por uma série de subsistemas, que trabalham de forma coerente, no processo de detecção e remoção de uma falta (Coury *et al.*, 2007). A Figura 2.3 apresenta os principais subsistemas que compõe o SP, identificados pelo TC, Transformador de Potencial (TP), alimentação auxiliar, relé de proteção e disjuntor de alta tensão. Cabe dizer que não existe necessariamente simultaneidade na presença de ambos os tipos de transformadores para instrumento em um SP, seu uso estará condicionado aos tipos de funções de proteção desejadas para a instalação em foco.

Figura 2.3: Subsistemas de proteção.

Fonte: Maezono (2003)

Da Seção 2.2 a Seção 2.5 serão descritos brevemente cada um desses subsistemas.

2.2 Alimentação Auxiliar

Em SEs e usinas geradoras de energia elétrica as cargas prioritárias, esquemas de controle e proteção são alimentadas em corrente contínua. Em geral, um arranjo construtivo redundante composto por um retificador/carregador e por um banco de baterias é utilizado para esse fim. A Figura 2.4 exhibe o exposto.

Figura 2.4: Esquema de ligação para a alimentação auxiliar.

Fonte: Araújo *et al.* (2005)

Em condição normal de operação da SE as cargas são alimentadas por um transformador de distribuição geralmente denominado Transformador de Serviço Auxiliar (TSA), o qual é conectado ao retificador/carregador do banco de baterias. O retificador/carregador irá suprir às cargas prioritárias da subestação com corrente contínua e manter em flutuação¹ ou em carga o banco de baterias, enquanto o suprimento de tensão auxiliar proveniente do TSA estiver normal.

Havendo um problema qualquer com o TSA ou retificador/carregador, um esquema automático de transferência retira de operação o retificador/carregador e o banco de baterias passa a suprir em corrente contínua as cargas prioritárias da SE. Nesta composição, o banco de baterias é o elemento que garante a confiabilidade do sistema de alimentação auxiliar em corrente contínua, pois o mesmo não faz parte do SEP. Em geral são utilizadas baterias do tipo chumbo-ácidas para compô-lo (Berndt, 2003; Franke, 2003).

O valor de tensão em corrente contínua usualmente aplicado em subestações de energia elétrica é de 125V, o que acaba por implicar na existência de um banco de baterias composto por aproximadamente 60 elementos (baterias), pois cada elemento fornece aproximadamente 2,2V (Araújo *et al.*, 2005).

¹A flutuação é um regime de carga em que a bateria é conservada a plena carga. Neste regime é mantido um nível de tensão que garante uma circulação de corrente suficiente para compensar as perdas por autodescarga Karasinski e da Silva Dias (2003).

2.3 Transdutores para Instrumentos

A amplitude das correntes e tensões primárias no SEP é demasiadamente elevada para que se realize a conexão de equipamentos de medição, controle ou proteção diretamente a ele. Fora o fato desse tipo de conexão ser potencialmente perigosa para as pessoas que operam as SEs, pois a isolamento entre usuário do equipamento e o SEP é garantida apenas pelo isolamento do equipamento em questão (GEC Alsthom, 1995).

A forma encontrada para contornar essa questão foi desenvolver os transformadores para instrumentos, que representam uma forma segura e tecnicamente adequada para prover os sinais de tensão e corrente que os SPs, controle e medição necessitam (Petch e Rushton, 1981). A segurança é obtida a partir da sua construção básica, a qual permite conveniente isolamento galvânica entre os instrumentos de medição, controle ou proteção e o SEP no qual estão inseridos, além daquela fornecida pelo equipamento a ele conectado (Hojo, 2002).

A Figura 2.5 exibe uma divisão básica para os transformadores para instrumentos.

Figura 2.5: Classificação dos transformadores para instrumentos.

2.3.1 Transformadores Eletromagnéticos

A construção básica dos transformadores eletromagnéticos consiste em um núcleo de material ferromagnético, um conjunto de espiras designadas por enrolamento primário e outro conjunto de espiras designadas por enrolamento secundário. Essa construção é possível pois, está embasada na lei de Lenz². Cabe ainda dizer que os transformadores para instrumentos são monofásicos.

²Para um melhor detalhamento consultar Kosow (1964).

Transformador de Corrente

O TC possui a função de reduzir a corrente do SEP para valores adequados à construção dos equipamentos de medição, controle ou proteção. Esses valores são padronizados em 1A ou 5A, sendo o segundo valor mais corriqueiro no Brasil (ABNT, 1992a).

A conexão do primário do TC é feita em série com o SEP, sendo o mesmo válido para o(s) equipamento(s) conectados ao seu secundário. As ligações mais comuns entre os TCs de cada fase do SEP são estrela ou triângulo. O primário do TC é composto por poucas espiras, chegando até a não possuir primário próprio. Já o secundário é constituído por muitas espiras. A corrente que circula no primário do TC é determinada pela corrente de carga no circuito ao qual ele está conectado, dessa forma a corrente em seu secundário é a reprodução, dentro de certos limites de fidelidade, da corrente que circula pelo SEP (Kindermann, 1999).

Existem vários tipos de TC, cada qual adequado a uma determinada situação de instalação ou operação. Os mais comuns são os TCs do tipo Bucha, Janela, Barra e Pedestal (Araújo *et al.*, 2005).

TC de Proteção x TC de Medição

A diferença fundamental entre um TC utilizado para medição ou proteção reside em sua curva de saturação, conforme a Figura 2.6. Depreende-se então, que um TC para medição é projetado para atingir a saturação com correntes iguais ou superiores a $4 \times I_2$, já o TC para proteção atingirá o ponto de saturação para correntes iguais ou superiores a $20 \times I_2$ (Paithankar e Bhide, 2010).

Figura 2.6: Curva de saturação de TCs.

Fonte: de Almeida (2000)

Transformador de Potencial

O TP possui a função de reduzir a tensão do SEP para valores adequados à construção dos equipamentos de medição, controle ou proteção. O valor de tensão no enrolamento secundário é padronizado em 115V (Horowitz e Phadke, 1995; ABNT, 1992b).

De acordo com o projeto do TP, existem três grupos de ligação: grupo 1 para ligação fase-fase, grupo 2 para ligação fase-neutro em sistemas diretamente aterrados e grupo 3 para ligação fase-terra em sistemas nos quais não se garante a eficácia do aterramento (ABNT, 1992b). As ligações mais comuns entre os TPs de cada fase do SEP são estrela, triângulo, delta aberto, residual e monopolar.

A conexão do primário do TP é feita em paralelo com o SEP, sendo que o mesmo vale para o(s) equipamento(s) conectados ao seu secundário.

Ao contrário do TC, o TP não possui diferença apreciável entre uso para proteção e medição (Petch e Rushton, 1981). Basicamente existem dois tipos de TP, a saber:

TP indutivo

São transformadores similares aos transformadores de força, diferindo apenas em relação a refrigeração, isolamento e aspecto mecânico (GEC Alsthom, 1995). São conectados ao SEP como anteriormente mencionado, com um ou mais enrolamentos secundários. São aplicados com maior frequência em sistemas de baixa, média e alta tensão.

TP capacitivo

Para sistemas de Extra-Alta Tensão (EAT) o uso do TP indutivo fica construtivamente proibitivo devido à classe de isolamento empregada, por torná-lo excessivamente grande, pesado e conseqüentemente caro (Hojo, 2002). Para contornar essas desvantagens, foi desenvolvido o TP capacitivo, que basicamente é constituído por um TP convencional onde o primário é composto por um divisor de tensão capacitivo. Em relação ao TP indutivo apresenta elevada confiabilidade, além de servir como elemento de conexão em sistemas *carrier*³ de comunicação (Araújo *et al.*, 2005).

³Para um melhor detalhamento consultar Kindermann (2006).

2.3.2 Sensor Óptico de Corrente

O sensor óptico de corrente é uma tecnologia relativamente recente aplicada ao SEP (Mullikin, 2007). Atualmente seu uso no Sistema Interligado Nacional (SIN) ainda é raro, estando restrito a centros de pesquisa. Os custos de aquisição e adaptação dos SP existentes a ela representam dois entraves preliminares para sua adoção maciça.

Este sensor está baseado em um efeito magneto-óptico conhecido como efeito Faraday, o qual modifica o plano de polarização de um feixe luminoso quando esse se propaga através de um material, como por exemplo o *Terbium Gallium Garnet* ($\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$), paralelamente a um campo magnético externo, conforme a Figura 2.7. O valor do ângulo Θ é proporcional a intensidade do campo magnético $\vec{H}$ e portanto à corrente que o origina (Liehr, 2006; Cruden *et al.*, 1993).

Figura 2.7: Efeito Faraday.

Fonte: Sohlström (1993)

Para a qual: $\vec{E}$ = Campo elétrico associado ao feixe luminoso; $\vec{H}$ = Campo magnético externo; Θ = ângulo de rotação do plano de polarização do feixe luminoso e l = Comprimento do caminho percorrido pelo feixe luminoso.

A Figura 2.8(a) apresenta um arranjo que utiliza o efeito Faraday para medição de corrente, o qual será explicado a seguir. Um feixe de luz emitido por uma fonte luminosa (1) é conduzido por um guia de fibra óptica até um polarizador (2), após passar pelo polarizador tem-se um feixe de luz polarizada, ou seja, uma onda eletromagnética que oscila em apenas um eixo. Este feixe polarizado é defletido pelo prisma (P1) e encaminhado para o interior de um cristal de quartzo (3A), no qual um campo magnético é induzido pela corrente primária (I_1) que flui através da bobina. O campo magnético promove a rotação do plano de polarização da luz.

O prisma (P2) deflete o feixe de luz deslocado para o interior do cristal de quartzo (3B), o qual está ao potencial da terra, por sua vez, este, está inserido em um campo magnético induzido pela corrente secundária (I_2). A direção do campo é escolhida de tal forma que o plano de polarização é compensado, assim $I_1 W_1 = I_2 W_2$, W_1 e W_2 são o número de espiras das bobinas ao redor dos

cristais de quartzo. Em consequência o ângulo de rotação δ_1 da luz no cristal (3A) é compensado pela rotação $\delta_2 = -\delta_1$ no cristal (3B). Em seguida o feixe de luz atravessa o prisma separador, Wollaston prism, (4) e então atinge ambos os foto-detectores. Por essa razão a intensidade da luz em ambos os foto-detectores (A) e (B) são iguais e o sinal na entrada do amplificador diferencial (6) é zero (Ungrad *et al.*, 1995).

A rotação do plano de polarização faz com que um dos detectores seja iluminado de forma mais intensa que o outro e isso implica na geração de um sinal diferencial. O sinal de saída do amplificador diferencial é a corrente secundária I_2 , a qual é uma representação fiel da corrente primária I_1 (Ungrad *et al.*, 1995).

A Figura 2.8(b) exhibe o aspecto construtivo para um tipo de TC óptico. Existem outras topologias para esse transdutor. Por fim, um TC baseado nesse princípio fornece isolamento completa em relação ao SEP, pois não existe nenhuma conexão com o condutor primário, além do fato de que sua construção, por não possuir núcleo magnético e enrolamentos primário ou secundário, o torna menor em tamanho e mais leve em relação aos TCs convencionais. A ausência de núcleo ferromagnético é ainda benéfica pois o torna imune a problemas de saturação (Mullikin, 2007).

Figura 2.8: Detalhes TC óptico.

Fonte: Ungrad *et al.* (1995); NxtPhase T&D Corporation (2006)

2.3.3 Sensor Óptico de Tensão

O sensor óptico de tensão está baseado no efeito Pockels, que será explicado com o auxílio da Figura 2.9. Um TP baseado neste efeito é composto por um divisor de tensão constituído por um capacitor C_1 e por uma célula Pockels de capacitância C_2 conectada entre os pontos que representam a tensão que se deseja medir. A tensão através de C_2 gera um campo elétrico proporcional a tensão no primário. O feixe de luz originado na fonte (3) é direcionado para o polarizador (4) o qual, então, produz duas ondas defasadas em $\pi/2$ rad. Estas são direcionadas a célula Pockels (2). Em função do campo elétrico, as duas ondas de luz possuem velocidades de propagação distintas, que por sua vez criam o defasamento angular mencionado. Este deslocamento angular é adiantado em $1/4$ do comprimento da onda ao passar pelo material de $\lambda/4$ comprimento de onda (5) antes de ser aplicado ao analisador (6). A intensidade da luz na saída do analisador é proporcional ao deslocamento angular, o qual, por sua vez, é proporcional a tensão no primário. O foto-diodo converte a intensidade da luz em um valor de tensão que é amplificado em (8) para produzir a tensão secundária U_2 (Ungrad *et al.*, 1995).

Figura 2.9: Efeito Pockels.

Fonte: Ungrad *et al.* (1995)

O aspecto físico externo do TP óptico assemelha-se ao do TC óptico, sem mudança apreciável. Por fim, cabe dizer que um TP baseado nesse princípio fornece isolamento completa em relação ao SEP pois não existe nenhuma conexão com o condutor primário, além do fato de que sua construção, por não possuir núcleo magnético e enrolamentos primário ou secundário, o torna menor em tamanho e mais leve em relação aos TPs convencionais (Mullikin, 2007).

2.4 Disjuntor de Alta Tensão

O disjuntor de alta tensão pode ser definido como um dispositivo mecânico de manobra capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes nas condições normais de circuito, assim como estabelecer, conduzir durante um tempo especificado e interromper correntes sob condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito (IEC, 1984; IEEE PES, 1992).

De forma geral, pode-se dizer que um disjuntor de alta tensão é composto pelos seguintes elementos (Colombo, 1986):

- Unidade de comando - A unidade de comando representa o conjunto de elementos de comando, controle e supervisão do disjuntor. Devido a variedade de meios extintores do arco elétrico e dos sistemas de acionamento não há unidade singela e sim uma grande variedade da mesma;
- Sistema de acionamento - A função primária do sistema de acionamento é a de abrir e/ou fechar os contatos principais do disjuntor. Cabe comentar que esse sistema é de vital importância, uma vez que a maioria dos disjuntores, após ser colocado em operação, permanece fechado por longos períodos de tempo. Logo, quando for solicitado a abrir, deve ser capaz de fazê-lo de forma confiável e sem atraso de tempo extra para essa operação. Existem diferentes tipos de sistemas de acionamento. Contudo, todos eles possuem em comum o fato de armazenar energia potencial em algum meio elástico para esse fim, o qual é carregado por uma fonte de energia de baixa potência (Garzon, 2002). Os principais tipos são solenóide, ar comprimido e hidráulico (Colombo, 1986);
- Unidade interruptora - A câmara de extinção ou unidade interruptora é a responsável pela extinção do arco elétrico originado no processo de separação dos contatos principais do disjuntor. Este elemento representa o estado da arte na produção e pesquisa deste tipo de equipamento, uma vez que as demais partes que o compõe não variam sobremaneira de fabricante à fabricante pois, atingiram adequada maturidade tecnológica. Os principais tipos de câmaras de extinção utilizadas na construção de disjuntores de alta tensão são: Sopro magnético, Ar comprimido, Grande volume de óleo, Pequeno volume de óleo, SF₆ (hexafluoreto de enxofre) e Vácuo (Vorpe *et al.*, 1995; Colombo, 1986; Morton, 1985; de Azevedo Moraes, 1985).

2.5 Relés

O relé de proteção representa o mais apurado conjunto de elementos de monitoramento, detecção, classificação e decisão para discernir se uma determinada condição do SEP ou de um de seus elementos constituintes representa ou não um defeito (Blackburn e Domin, 2007). Existem, basicamente, três tecnologias de fabricação de relés de proteção, a saber: Eletromecânica, Estática e Digital, sendo a primeira a precursora das demais. Diversos fatores motivaram o desenvolvimento de novas bases tecnológicas para a criação de relés de proteção, pode-se citar, por exemplo, a crescente complexidade e o estabelecimento de rígidos requisitos de desempenho para o SEP (Horowitz e Phadke, 1995).

Os relés podem ser classificados de acordo com a tecnologia construtiva envolvida e com a finalidade que o mesmo possui (Elmore, 2004). Quanto a finalidade podem ser:

- Relé de proteção - responsável por comandar a abertura de um ou mais disjuntores quando da existência de um defeito.
- Relé de monitoramento - verifica condições do SEP, como por exemplo, detectores de falta, monitores de canais de comunicação, etc.
- Relé de religamento - responsável pelo religamento de linhas de transmissão.
- Relé regulador - é utilizado quando algum parâmetro de monitoramento do SEP desvia-se dos limites operacionais determinados, como por exemplo, relé regulador de tensão.
- Relé auxiliar - opera em resposta a decisão de funcionamento de outro relé, alguns exemplos de relé auxiliar são relés temporizadores, multiplicadores de contato, etc.
- Relé de sincronismo - assegura a existência de adequadas condições para realizar a interconexão entre dois circuitos distintos.

Quanto a tecnologia construtiva podem ser:

- Eletromecânicos - são construídos com predominância de elementos mecânicos acionados por acoplamentos elétricos e magnéticos.
- Estáticos - são construídos com dispositivos eletrônicos e não possuem elementos mecânicos móveis.

- Digitais - são relés eletrônicos gerenciados por um microprocessador e controlados por um *software* específico à proteção.

Neste trabalho foram enfocados apenas os relés de proteção, os quais podem ser definidos como um equipamento cuja função é remover rapidamente de serviço qualquer elemento do SEP que esteja sob efeito de um curto-circuito ou operando em alguma condição anormal e intolerável, que possa causar danos ou interferir no funcionamento do restante do sistema (Mason, 1962). A seguir serão apresentadas brevemente as tecnologias construtivas aplicadas aos relés de proteção.

2.5.1 Relés Eletromecânicos

A primeira base tecnológica aplicada ao projeto e construção de relés de proteção foi a eletromecânica, nos idos de 1900, sendo, portanto, a precursora das demais tecnologias aplicadas à proteção. Pode-se definir o relé eletromecânico como sendo aquele no qual a operação lógica é produzida pelo movimento relativo de elementos mecânicos, sob ação de uma grandeza elétrica nos circuitos de entrada (ABNT, 1981).

Os relés eletromecânicos podem ser divididos quanto ao seu princípio de funcionamento, sendo os mais comuns os do tipo de Atração (axial ou em charneira), disco e tambor de indução, D'Arsonval (Elmore, 2004; Araújo *et al.*, 2005):

Vantagens e Desvantagens dos Relés Eletromecânicos

Uma proteção eletromecânica possui algumas características vantajosas, podendo-se citar:

- Durabilidade e robustez - com a devida manutenção, pode-se conseguir elevada vida útil.
- Tolerância a altas temperaturas - não representa fator crítico para o adequado funcionamento do mesmo.
- Baixa sensibilidade a surtos eletromagnéticos - É necessário que a energia associada a esse tipo de fenômeno seja relativamente alta para causar algum dano.
- Confiabilidade - em relação a sua atuação para as condições especificadas.

Algumas das desvantagens desse tipo de proteção são:

- Custo de instalação - uso de maior espaço físico e maior quantidade de cabos para compor o SP.
- Precisão - quão maior a exigência por precisão maior o custo do relé.
- Manutenção - exige mão de obra experiente e específica, além de haver dificuldade em encontrar peças de reposição
- Limitação de funcionalidades - não é possível implementar características acessórias adequadas para enfrentar a crescente complexidade do SEP, como por exemplo oscilografia.

A Figura 2.10 exhibe o aspecto de um relé de proteção eletromecânico.

Figura 2.10: Exemplo de relé eletromecânico.

Fonte: Rush (2002)

2.5.2 Relés Estáticos

A evolução do SEP sob o ponto de vista da complexidade das interligações, aumento dos níveis de curto-circuito e demanda por melhor desempenho motivou a pesquisa pela melhoria na concepção dos relés de proteção, com foco em sua velocidade de atuação, seletividade, estabilidade e sofisticação de suas características gerais (Horowitz e Phadke, 1995; Araújo *et al.*, 2005). Na década de 1960 começaram as experimentações em relação a construção de relés de proteção baseados em componentes eletrônicos, sendo que na década de 1970 sua utilização tornou-se intensa (J.W.Hodgkiss, 1981; Maezono, 2002). O termo estático surge da comparação com os relés eletromecânicos que possuíam partes móveis, sendo o relé estático caracterizado pela ausência

de elementos mecânicos móveis (Kindermann, 1999). No âmbito de utilização, os relés estáticos são aplicados de igual maneira a composição de um SP como os eletromecânicos (GEC Alsthom, 1995). A Figura 2.11 ilustra a constituição genérica e elementar para os relés estáticos.

Figura 2.11: Diagrama de blocos para um relé estático genérico.

Fonte: Ungrad *et al.* (1995)

As variáveis de entrada (I) e/ou (U) são encaminhadas para o bloco 1, que é responsável por ajustar os sinais de entrada a valores compatíveis para serem utilizados pelos circuitos eletrônicos posteriores. Fornece ainda isolamento galvânica entre os circuitos subsequentes e o SEP. Os valores de saída provenientes do bloco 1 são comparados com valores de referência no bloco 2, o qual terá seu limiar de operação ativado se os valores de referência forem ultrapassados, sendo que a saída gerada irá iniciar o bloco temporizador (3). O bloco lógico (4) examina se o valor proveniente da saída do bloco 2 continua ativo após o tempo ajustado para bloco (3) ter expirado. Caso isso ocorra, o bloco (5) de *trip* será ativado, além do bloco (6) de sinalização. O bloco (7) fornece a alimentação auxiliar para o relé estático. Já o bloco (8) é empregado em rotinas de teste da proteção utilizando para esse fim informações de origem interna ou externa ao equipamento (Ungrad *et al.*, 1995).

Vantagens e Desvantagens dos Relés Estáticos

Uma proteção estática possui algumas características vantajosas, podendo-se citar:

- Maior velocidade - consequência direta da ausência de partes mecânicas móveis.

- Baixo consumo - representam uma carga menor para os TCs.
- Facilidade de manutenção - tornou-se mais simples e direta.
- Confiabilidade - obtida em função da construção modular.

Algumas desvantagens desse tipo de proteção são:

- Maior sensibilidade a surtos - componentes eletrônicos são danificados com quantidades menores de energia associada a um surto se comparados com os relés eletromecânicos.
- Envelhecimento - possuem alguns elementos constituintes com vida útil reduzida, como os capacitores eletrolíticos por exemplo.
- Influência do meio ambiente - a temperatura e a umidade passa a ser fatores de influência sobre o funcionamento desses equipamentos, devido a tolerância dos mesmos a esses fatores.

A Figura 2.12 exibe o aspecto de um relé de proteção estático.

Figura 2.12: Exemplo de relé estático.

Fonte: Gurevich (2006)

2.5.3 Relés Digitais

Os primeiros trabalhos que contemplavam o uso de relés digitais remontam aos anos 1960. Na década seguinte, houve um expressivo desenvolvimento do *hardware* computacional e dos algoritmos para fins de proteção e resultados promissores foram obtidos, os quais indicavam um desempenho tão bom quanto as tecnologias majoritárias de então (Johns e Salman, 1995; Phadke e Thorp, 1994). A tecnologia digital, no princípio de século XXI, tornou-se a base da maioria dos sistemas de uma SE, atuando nas funções de medição, comunicação, proteção e controle, por exemplo. Desta forma, o relé digital pode ser aplicado para desempenhar outras tarefas no ambiente da SE. A Figura 2.13 ilustra o aspecto construtivo geral dos relés digitais.

Figura 2.13: Arquitetura de um relé digital.

Fonte: Bulgarelli e Senger (2006)

Resumidamente, pode-se dizer que esses equipamentos se comportam da seguinte forma (Bulgarelli e Senger, 2006):

“Os sinais de entrada de corrente e de tensão são condicionados e isolados através de TPs e TCs. Os sinais analógicos isolados são filtrados através de filtros passa baixa, utilizando-se filtros analógicos, de forma a minimizar o efeito de *aliasing* produzido por harmônicas e ruídos em faixas de elevadas frequências acima da metade da frequência de amostragem, de acordo com o Critério de *Nyquist* ou Teorema da Amostragem.

Após a filtragem analógica, os sinais são então amostrados e convertidos em dados digitais através do Conversor Analógico/Digital (A/D), que atualmente possuem resolução de 16 bits, adequados à faixa dinâmica de correntes normalmente existentes em sistemas elétricos de potência. O *Digital Signal Processor* (DSP) processa os dados digitais convertidos e executa os algoritmos de proteção existentes, carregados em memórias do tipo *FLASH*. Os dados intermediários, gerados durante os cálculos, são armazenados em memórias do tipo *Synchronous Dynamic RAM* (SDRAM).

O processador digital é o responsável pela execução da lógica e das funções de entrada/saída. Os circuitos de entradas digitais fornecem ao processador de sinais o valor de status dos respectivos contatos. Os circuitos das saídas digitais do relé, através dos seus contatos, executam as funções de alarme e de *trip* do relé.”

A Figura 2.14 ilustra as características dos relés digitais de proteção a partir de um ponto de vista funcional. Percebe-se a capacidade de execução de diversas tarefas no contexto do SEP além de seu propósito fundamental, que é o de integralizar um SP. Essa flexibilidade é obtida a partir de sua construção, de forma simplificada, é composta pelo conjunto *hardware* e *firmware*. As informações de entrada e/ou saída, providas por qualquer uma das vias de acesso do equipamento, entradas e/ou saídas digitais, interfaces de comunicação e valores analógicos de medida, estão disponíveis para uso por qualquer uma das funcionalidades componentes dos relés digitais de proteção a qualquer tempo. Esse caráter multifuncional é marcante pois, o distingue das tecnologias prévias aplicadas a construção de relés de proteção e implica em pensar e operar o SP de forma distinta do que era feito até então. A Figura 2.15 exhibe o aspecto físico de um relé de proteção digital.

Vantagens e Desvantagens dos Relés Digitais

Uma proteção digital possui algumas características vantajosas, dentre elas pode-se citar:

- Auto-verificação e confiabilidade - pode monitorar continuamente os subsistemas de *hardware* e *software*, de modo a detectar imediatamente possíveis falhas;
- Integração de sistemas digitais - os sistemas digitais possibilitam uma maior integração entre seus componentes, o que permite uma maior flexibilidade e velocidade na obtenção das informações registradas pelos equipamentos, notadamente através de interfaces de comunicação;
- Flexibilidade funcional e adaptabilidade - Capacidade de alteração dos seus parâmetros de configuração de acordo com a topologia da rede. Uma vez que esses

Figura 2.14: Funcionalidades genéricas de um relé de proteção digital.

Fonte: Reichenbach (2001)

dispositivos podem conter múltiplos grupos de ajustes ⁴, o estado de chaves seccionadoras, disjuntores e comandos locais/remotos, provoca a mudança nos ajustes das funções de proteção e outras funcionalidades dos relés digitais.

Algumas desvantagens desse tipo de proteção são:

- Sensibilidade a surtos - necessitam de proteção especial contra surtos e interferências eletromagnéticas.
- Sensibilidade a temperatura - sensíveis a altas temperaturas, necessitam portanto, de dispositivos especialmente desenvolvidos para essa condição.
- *Software* não portátil - os algoritmos desenvolvidos para um *hardware* específico, em geral, não são aplicáveis a outro.
- Padrão IEC 61850 - uso incipiente, passa, ainda, por uma processo de implantação no SEP brasileiro, demandando por formação de recursos humanos e definição de metodologias de projeto, análise de desempenho e comissionamento, por exemplo.

⁴Entende-se por grupo de ajustes o conjunto de funcionalidades, parâmetros e características operativas do relé digital.

(a) Aspecto físico.

(b) Detalhe construtivo.

Figura 2.15: Exemplo de relé digital comercial.

Fonte: GE (2011b)

As características mencionadas anteriormente fazem com que essa tecnologia construtiva seja a base para novas soluções aplicadas aos SEPs visando a melhora de desempenho, maior continuidade no fornecimento da energia elétrica e aprimoramento da segurança operacional das SEs e usinas geradoras. Nesse contexto o uso conjunto de ferramentas computacionais inteligentes, como as as RNAs, os Sistemas *Fuzzy* (SFs), os Algoritmos Genéticos (AGs) e os Agentes, aliadas às redes de comunicação, baseadas no padrão IEC 61850, devem ser ressaltadas e representam a próxima geração dos dispositivos de proteção aplicados aos SEPs (Cidrás *et al.*, 2009; Coury *et al.*, 2007; Kezunovic, 2002).

2.6 Zonas de Proteção

Um ponto de vista comum para aplicação de relés de proteção consiste em segmentar o SEP em porções pré-definidas, denominadas de zonas de proteção, e para essas prover um ou mais esquemas de proteção pertinentes, visando ao reconhecimento e eliminação das faltas, retirando de operação a menor porção do SEP possível com o menor tempo de permanência de falta, implicando em um mínimo de danos e/ou instabilidade sobre o restante do SEP (Elmore, 2004).

As zonas de proteção mais comuns são:

1. Proteção de geradores;
2. Proteção de transformadores;
3. Proteção de barramentos;

4. Proteção de linhas de transmissão e distribuição;
5. Proteção de motores.

A Figura 2.16 apresenta um SEP hipotético com suas respectivas zonas de proteção. Os limites de cada zona são definidos através dos TCS instalados no SEP e suas respectivas conexões aos relés existentes. Pode-se perceber, pela análise da Figura 2.16, a sobreposição intencional de duas zonas de proteção distintas. Isso é feito para garantir que nenhum elemento do SEP ficará sem algum tipo de proteção (Coury *et al.*, 2007; Elmore, 2004).

Figura 2.16: Representação esquemática das zonas de proteção.

Fonte: Coury *et al.* (2007)

2.6.1 Proteção Principal, Alternada e de Retaguarda

A proteção principal é definida como aquela responsável pela correta eliminação de uma falta, no menor tempo possível, para uma determinada zona de proteção. Contudo, tal proteção está sujeita a apresentar defeito, logo, uma prática usual para sistemas de grande importância, como por exemplo um sistema de EAT, consiste em replicar a proteção principal (Horowitz, 2007).

Esse procedimento é comumente denominado de proteção alternada e pode ser realizado pelo

uso de relés de fabricantes distintos ou com princípios operativos diferentes para evitar falhas comuns a ambas as proteções. Contudo, é praxe utilizar relés idênticos. Os ajustes utilizados e a lógica de *trip* são os mesmos para a proteção principal e a alternada (Horowitz, 2007). A prática de duplicar os dispositivos de proteção não é aplicada integralmente aos demais subsistemas do SP, como por exemplo os TCS⁵, devido aos custos associados (Kindermann, 2006).

A proteção de retaguarda é aquela responsável por detectar a mesma falta observada pela proteção principal, porém o seu funcionamento é temporizado de forma intencional para que se aguarde a atuação daquela. Quando de sua atuação, um porção maior do SEP pode ser retirada de operação. Ela pode ser dividida em (Horowitz, 2007):

- Retaguarda Local - é instalada no mesmo lugar físico e utiliza alguns dos subsistemas do SP da proteção principal. Dessa forma, pode falhar pelas mesmas razões da proteção principal;
- Retaguarda Remota - é instalada em um local físico distinto sendo completamente independente dos subsistemas do SP utilizados pela proteção principal, logo não está sujeita aos mesmos problemas daquela.

Cabe dizer, que não necessariamente as funções de proteção de retaguarda são iguais em natureza às da proteção principal ou alternada, podendo ser distintas conforme a filosofia de projeto adotada (Maezono, 2003).

Para a Figura 2.17, R_1 e R_5 são a proteção principal da Linha de Transmissão (LT) AB; R_2 é a proteção alternada de R_1 ; R_3 ⁶ é a retaguarda local para R_1 e R_2 ; R_4 , R_9 e R_{10} representam a retaguarda remota para a LT AB.

2.6.2 Seletividade e Coordenação

Após separar o SEP em zonas de proteção e definir as proteções Principal, Alternada e de Retaguarda, é preciso estabelecer de que forma essas irão interagir. Esse relacionamento é definido a partir dos princípios da seletividade e coordenação, os quais, serão explicados com o uso da Figura 2.18.

Para o sistema radial apresentado na Figura 2.18 são destacadas suas zonas de proteção e, de forma simplificada, as respectivas proteções principais, representadas pelos relés R_1 a R_8 .

⁵Para esses dispositivos em particular é comum a especificação de um TC com múltiplos núcleos,

⁶Para o caso de IEDs multifunção, R_3 pode estar integrada a R_1 , a R_2 ou a ambas.

Figura 2.17: Proteção principal, alternada e retaguarda.

Fonte: Coury *et al.* (2007)

Figura 2.18: Sistema radial com uma fonte e ponto de falta.

Tomando como exemplo a ocorrência de uma falta no ponto F, é de competência da proteção R₈ detectá-la e enviar um comando de *trip* para o disjuntor D₈ o mais rápido possível, retirando de operação apenas o elemento em falta pertencente àquela zona de proteção, mantendo o restante do SEP em operação normal. O comportamento da proteção R₈ para a falta caracterizada ilustra o princípio da seletividade (Sleva, 2009; Cidrás *et al.*, 2009).

Os demais relés, R₁ a R₇, são sensibilizados pela corrente de defeito associada a falta no ponto F, contudo só devem atuar se houver algum defeito em R₈. Quando solicitados, sua operação é encadeada em sentido decrescente, ou seja de R₇ para R₁ com o objetivo de desligar sempre a menor porção do sistema necessária para a eliminação da falta, contudo mais elementos e zonas de proteção serão envolvidas nesse processo. Esse comportamento é conhecido como coordenação da proteção (Sleva, 2009; Cidrás *et al.*, 2009). Sua obtenção é usualmente feita através das seguintes formas (Prévé, 2006; Engineering e Technology, 1995):

1. Amperimétrica – baseada no fato de que a corrente de falta em diferentes partes do SEP irá apresentar valores distintos, devido as impedâncias envolvidas entre a fonte e o ponto de falta;
2. Temporal – consiste em ajustar temporizações distintas para os vários dispositivos de proteção ao longo do sistema, é a técnica mais usual;
3. Lógica – Consiste na troca de informações de bloqueio e permissão para envio do comando de *trip* entre dispositivos de proteção adjacentes;
4. Direcional – é obtida a partir do uso de funções de proteção sensíveis ao sentido de circulação da corrente de defeito.

Independente da forma pela qual ela é obtida, sua relevância consiste em manter a maior continuidade de fornecimento de energia elétrica possível, a qual, do ponto de vista da proteção do SEP só é atingida a partir da correta atuação, em tempo e sequencia, dos dispositivos de proteção envolvidos (Blackburn e Domin, 2007; Kindermann, 1999).

Cabe ressaltar, que caso a seletividade não seja respeitada, dado um distúrbio qualquer no SEP, uma parcela maior do sistema será retirado de operação, o que pode implicar na instabilidade do mesmo, levando a um efeito cascata e um desligamento de grandes proporções (Kundur, 2007).

2.7 Comunicação de Dados Aplicada aos Relés Digitais

Os avanços na área de telecomunicações, como as redes móveis de comunicação e a *Internet* por exemplo, estão presentes em vários segmentos da sociedade, modificando, de forma notável hábitos e práticas cotidianas. Essas mudanças foram absorvidas pelos relés digitais de proteção, os quais passaram a contar com interfaces de comunicação, a partir das quais foi possível propor um novo modelo de concepção e operação do SEP. Inicialmente foram utilizadas interfaces de comunicação seriais e paralelas para prover os relés de proteção com capacidade de comunicação, posteriormente interfaces e tecnologias de redes de computadores foram aplicadas.

A interface serial envolve o envio de um *bit* de dados de cada vez ao longo do canal de comunicação enquanto que a interface paralela é capaz de enviar vários *bits* simultaneamente. Cabe dizer que a comunicação paralela utiliza mais fios do que a comunicação serial porém, é capaz transmitir uma certa quantidade de dados mais rapidamente.

Vários padrões de comunicação serial são utilizados na automação das SEs. Um desses é o RS232C que permite uma comunicação bidirecional apenas entre dois dispositivos (ponto-a-ponto). Devido a essa característica esse padrão não é adequado para a automação de uma SE, contudo é muito utilizado para modificar os ajustes dos IEDs, além de ser útil em conjunto com uma linha telefônica e um modem para resgate remoto de dados de processo, como oscilografias por exemplo. O comprimento máximo do cabo utilizado entre dispositivos é igual a 15m com uma taxa de transmissão de 20Kbps.

Devido as limitações do padrão RS232C foram desenvolvidos os padrões RS422 e RS485, os quais permitem a conexão de múltiplos dispositivos a um mesmo canal de dados pelo uso de uma conexão simples com cabo do tipo par trançado. Em adição a essa característica, houve aumento na distância máxima de conexão, a qual passa a ser de 1200m, e taxa de transmissão a qual passa a ser igual a 10Mbps para um comprimento de cabo de 9m e de 100Kbps para um comprimento de cabo de 1200m. O padrão RS422 permite a conexão de até 10 dispositivos na rede, enquanto que o padrão RS485 permite a conexão de até 32 dispositivos. O padrão RS422 utiliza um cabo com dois pares trançados (4 fios) para a comunicação dos dispositivos, logo seu modo de operação é do tipo *full-duplex*, enquanto que o padrão RS485 utiliza apenas um par trançado blindado, logo o seu modo de operação é *half-duplex*. Todos os meios físicos mencionados até o momento utilizam interfaces com conectores DB-25 e DB-9, porém essa não é uma regra geral.

Os padrões mencionados anteriormente não especificam quais protocolos de comunicação

devem ser utilizados, dessa forma, uma rápida menção aos protocolos de automação comumente utilizados em SEs, será apresentada a seguir:

- O protocolo Modbus foi desenvolvido para estabelecer a comunicação entre equipamentos, como IEDs, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), atuadores, etc., em um arranjo mestre/escravo e opera, essencialmente, em um modo de requisição/resposta. A transmissão dos dados pode ser serial, RS232C/RS485, ou através do *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) sobre *Ethernet*, em relação ao tipo de dado esses podem ser discretos ou analógicos;
- O protocolo IEC 60870-5-101 define todas as funções em nível de aplicação e objetos de dados para proporcionar aplicações de telecontrole através de longas distâncias, como por exemplo entre uma SE e um centro de controle através de uma técnica de comunicação serial com taxa de transmissão de até 64 kbps;
- O protocolo IEC 60870-5-103 é utilizado para prover comunicação entre uma unidade mestre e um ou mais relés de proteção, em um arranjo mestre/escravo, no qual a unidade mestre continuamente interroga os escravos a fim de verificar se há alguma informação pronta para ser enviada por esses. A distancia de transmissão pode chegar a 1000m, desde que seja utilizada uma conexão em fibra óptica. Os valores típicos de taxa de transmissão são iguais a 9600 Kbps e 19200 Kbps. Como são permitidas mensagens com um formato privado, isso acaba por comprometer a interoperabilidade entre dispositivos de fabricantes distintos;
- O protocolo IEC 60870-5-104 é uma extensão do protocolo IEC 60870-5-101, com modificações nos serviços das camadas física, *link*, rede e transporte. Utiliza a interface padrão TCP/IP para redes com conectividade LAN e roteadores para conexão com *Wide Area Network* (WAN);
- O protocolo *Distributed Network Protocol 3.0* (DNP3.0) foi desenvolvido para ser utilizado em sistemas SCADA provendo comunicação entre Unidades Terminais Remotas (UTRs), IEDs e estações mestre. Ele foi baseado em partes do protocolo IEC 60870-5, especificamente as partes 5-1, 5-2 e 5-3, e, portanto, guarda similaridades com os protocolos IEC 60870-5-101/104, como por exemplo a operação por requisição (*polling*) e por *Report by Exception* (RBE) (é enviada apenas a informação(ões) que foi(ram) modificada(s)). Como exemplo das diferenças entre ambos, ressalta-se que o DNP3.0 trabalha com mensagens

que podem conter múltiplos tipos de dados, desde que esses pertençam ao mesmo tipo de função, além disso, não há um tamanho lógico definido para as mensagens da aplicação, pois o DNP3.0 fragmenta-as e envia cada fragmento, com um tamanho típico de 2048 *bytes*, de forma que a mensagem no receptor é recebida e montada em sequência;

- O protocolo IEC 61850 é o mais recente aplicado a automação de SEs e tem como objetivo uniformizar os diversos aspectos relativos a comunicação no interior da SE. Mais detalhes sobre esse protocolo serão apresentados no 4.

2.8 Comentários Finais

Neste capítulo foi apresentado um panorama geral do SP com foco nos elementos que o constituem e em algumas idéias que norteiam seu estabelecimento. No seu decorrer, vê-se que as demandas por desempenho e correto funcionamento fazem do SP um dos elementos que compõe o SEP de maior relevância.

A utilização da base tecnológica digital em conjunto com meios e protocolos de comunicação, além da aplicação das ferramentas computacionais inteligentes, como as RNAs e os SFs, estabelecem um novo modelo para composição do SP, o qual ainda está sendo assimilado. Dessa forma, os capítulos 3 e 4 tem por objetivo fornecer a base teórica para a realização dos capítulos 5 e 6 e conclusões apresentadas no capítulo 7.

Capítulo 3

Redes de Computadores Aplicadas a Subestações de Energia Elétrica

Neste capítulo serão apresentadas de forma breve as características das redes LAN aplicadas às SEs, ressaltando o modelo ISO/OSI, as topologias lógica e física, alguns dispositivos de *hardware* utilizados, além de uma descrição geral da automação de SEs.

3.1 Automação de Subestações de Energia Elétrica

Conforme apontado por Usida (2007), a reestruturação do setor elétrico brasileiro, iniciada em meados da década de 1990, estabeleceu um ambiente competitivo para as transações comerciais envolvendo a energia elétrica, com os objetivos de garantir a segurança do seu suprimento, promover a modicidade tarifária e os programas de universalização de atendimento.

Esse contexto de reestruturação levou as empresas de energia elétrica a implementar mudanças em sua organização e forma de trabalho, visando a melhora em seu desempenho e redução de custos, por exemplo. Uma dessas mudanças ocorreu na operação das SEs pelo uso de sistemas de controle e proteções digitais, os quais tornaram possível uma operação mais sofisticada, integrada, eficiente, segura e barata (Grandi, 2000; Brittes, 1996).

As funções que o SAS exerce são o comando remoto de equipamentos, monitoramento de equipamentos e dispositivos, alarmes, registro sequencial de eventos, proteção, armazenamento de informações históricas da operação, intertravamentos, recomposição automática do sistema, controle de tensão e reativos, religamento automático e sincronização (Evans, 2007; Grandi,

2000).

Para efetivá-las, uma série de dados precisam ser adquiridos através de um variado conjunto de equipamentos, como os IEDs, UTRs, transdutores, multimedidores, *Programmable Logic Controllers* (PLCs), entre outros, para então serem utilizados pelo sistema SCADA (Evans, 2007; Grandi, 2000). Cabe dizer que, para as SEs atuais, os elementos básicos para aquisição das informações são os IEDs (McDonald, 2007).

Os equipamentos multimedidores e informações mencionadas são utilizados através de um conjunto de tecnologias como redes de computadores, sistemas de comunicação de dados e tecnologia da informação, com o objetivo de estabelecer um SAS eficiente e seguro (Costa, 2007; da Silveira e dos Santos, 2004).

Deve ser ressaltada a importância das redes de computadores na instalação do SAS pois representam o elemento central para utilização das demais tecnologias mencionadas. Dessa forma, as próximas seções apresentarão um panorama das redes de computadores aplicadas as SEs.

3.2 Topologia Lógica para *Local Area Network*

O termo topologia logica faz referência à forma como o fluxo de informações será transmitido através da rede, bem como a estrutura do seu funcionamento. Existem várias tecnologias de rede aplicáveis às LANs, como *Ethernet*, *Token Ring*, *Token Bus*, *Fiber Distributed Data Interface* (FDDI) e *LAN Asynchronous Transfer Mode* (ATM) (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007). Neste trabalho será enfocada a tecnologia *Ethernet* proposta por Metcalfe e Boggs (1976) e padronizada pelo padrão *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.3 por ser a tecnologia de rede LAN dominante e sobre a qual o padrão IEC 61850 foi desenvolvido (Piliouras, 2005; 200, 2008).

3.3 Topologia Física para *Local Area Network*

Para que as informações de interesse em uma SE possam ser utilizadas de forma produtiva para sua operação, é necessário que estruturas computacionais e de comunicação de dados sejam aplicadas para esse fim. Nesse contexto, a utilização de uma LAN se apresenta como paradigma para as SEs.

Segundo Coury *et al.* (2007), uma *Intranet* pode ser definida como uma rede privada de

dispositivos baseados em padrões e tecnologias utilizados pela *Internet*, com o intuito de partilhar recursos e disseminar informações. Essa rede privada é estabelecida como uma LAN e, portanto, pode conter uma série de dispositivos distintos, como computadores, IEDs, medidores, etc., além de ser limitada geograficamente.

Um aspecto a ser abordado sobre a LAN é a sua topologia física, a qual, de forma geral, trata a forma pela qual os vários dispositivos existentes em uma rede são interconectados. As principais topologias físicas são: a barramento, estrela e anel, as quais serão descritas a seguir.

3.3.1 Topologia em Barramento

É composta por uma mídia multiponto, que pode ser um condutor singelo ou um cabo, ao qual cada dispositivo de rede é conectado de forma apropriada através de uma interface de *hardware*. Ao final do barramento é instalado um dispositivo de *hardware* denominado terminador, cuja função é eliminar as reflexões do sinal existente no cabo, a Figura 3.1 ilustra seu aspecto (Stallings, 2000).

Figura 3.1: Topologia em barramento.

Fonte: Forouzan (2007)

Como vantagens dessa topologia se pode citar (Forouzan, 2007; Marçula e Benini Filho, 2005):

- Facilidade de implementação e manutenção;
- A mídia pode ficar situada ao longo de um caminho mais eficiente, implicando em menor utilização do cabeamento para interligação dos dispositivos;
- Facilidade de ampliação, em relação ao número de dispositivos e extensão do cabeamento;
- Menor custo.

Como desvantagens, pode-se citar (Forouzan, 2007; Marçula e Benini Filho, 2005):

- Aumento sensível no número de colisões, devido ao *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* (CSMA/CD), caso o número de dispositivos no mesmo enlace seja muito grande;
- Se ocorrer algum problema no barramento, como sua ruptura, toda a rede será afetada.

3.3.2 Topologia em Estrela

É composta por um dispositivo de conexão comum ao qual os demais elementos da rede estão conectados. A ligação desses ao elemento centralizador é realizada através de uma conexão física ponto-a-ponto. O dispositivo centralizador pode ser um *Hub* ou um *Switch*, a Figura 3.2 ilustra o seu aspecto (Stallings, 2000; Stamper, 1994).

Figura 3.2: Topologia em estrela.

Fonte: Forouzan (2007)

Como vantagens dessa topologia se pode citar (Forouzan, 2007; Pozzuoli e Moore, 2006; Marçula e Benini Filho, 2005):

- Uma falha no cabo não afeta toda a rede, somente o segmento defeituoso;
- Facilidade de expansão, em função da existência do elemento de conexão comum;
- Escalabilidade, se a capacidade do elemento centralizador for excedida basta trocá-lo por outro de maior capacidade;
- Menor latência, devido ao menor número de “Hops ¹” entre os elementos da rede.

¹Trata-se da extensão de um caminho de transmissão individual entre dois nós (sem nós intermediários)

Como principal desvantagem, pode-se citar (Forouzan, 2007; Marçula e Benini Filho, 2005):

- Toda a rede pode ser retirada de operação se houver um problema com o elemento centralizador;

3.3.3 Topologia em Anel

Esta topologia consiste em um número de repetidores, cada um conectado a outros dois através de um *link* unidirecional para formar um único caminho fechado. Os dados são transmitidos sequencialmente através do anel de um repetidor para o outro em um único sentido, conforme a Figura 3.3 (Stallings, 2000; Stamper, 1994).

Figura 3.3: Topologia em anel.

Fonte: Forouzan (2007)

Como vantagens dessa topologia se pode citar (Forouzan, 2007; Stallings, 2000):

- Os *links* de comunicação entre dispositivos são do tipo ponto-a-ponto, o que implica em manutenção mais simples, em relação a conexões multiponto;
- O sinal transmitido é regenerado a cada nó da rede, logo distâncias maiores do que aquelas obtidas com a topologia em barramento, através da técnica de transmissão em banda-base, podem ser obtidas;
- Instalação e reconfiguração não são complexas, pois, cada dispositivo está conectado a apenas outros dois;

- Facilidade no isolamento de falhas, pois, se um dispositivo não receber um sinal em um determinado tempo um alerta é emitido.

Como desvantagens, pode-se citar (Forouzan, 2007; Marçula e Benini Filho, 2005; Muller, 2003; Stallings, 2000):

- O rompimento de qualquer *link* implica em reconfiguração da rede pelo *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP) ;
- Tráfego unidirecional pode ser uma desvantagem em caso de interrupção do anel;
- Ampliações demandam que a rede seja retirada de operação;
- Há uma limitação prática no número de repetidores no anel, devido a questões de confiabilidade, manutenção e acúmulo de atrasos;
- Para aumentar a confiabilidade da rede é necessário duplicar os elementos do anel, o que implica em aumentar seu custo.

3.4 *Hardware Utilizado em Local Area Networks*

Diversos dispositivos de *hardware* como *switches*, *bridges*, servidores, unidades de armazenamento, repetidores, roteadores e cartões de rede, podem estar presentes nas LANs. Contudo, para este trabalho serão apresentados apenas o cartão de rede e o *switch*, pois, esses elementos foram utilizados no estabelecimento do aparato experimental abordado no Capítulo 5.

3.4.1 **Cartão de Interface de Rede**

O cartão de interface de rede (*Network Interface Card* (NIC)) consiste na interface física entre um dispositivo de rede e a mídia de comunicação utilizada, como por exemplo a fibra óptica ou cabo *Unshielded Twisted Pair* (UTP). Uma vez que o NIC é o elemento que prove tal interface, é demandado que ele tenha a capacidade de aderir à metodologia de acesso ao meio da arquitetura de rede à qual está ligado. As regras de controle de acesso ao meio físico da LAN, implementadas no NIC, são conhecidas como *Media Access Control* (MAC) e são representadas na subcamada MAC da camada de enlace do modelo OSI de sete camadas (Goldman, 2005; Held e Jagannathan, 2004).

As funções que o NIC realizam são basicamente a preparação dos dados a serem enviados, o envio desses para o meio, o controle do fluxo de dados entre o dispositivo e o meio, a recepção dos dados vindos do meio de comunicação e a conversão dos sinais digitais em elétricos ou ópticos (Goldman, 2005; Held e Jagannathan, 2004).

3.4.2 *Switch*

O *switch* é um dispositivo que provê um ponto de conexão física comum aos diversos elementos da LAN. Os *switches* operam na camada 2 do modelo OSI estabelecendo domínios de colisão distintos e, portanto, melhorando o desempenho da rede como um todo, pois, baseado no endereço MAC (o qual é único para cada equipamento) dos dispositivos conectados ao *switch*, uma mensagem é enviada apenas da origem ao destino e não para toda a rede, diminuindo assim o tráfego existente. Existem 4 tipos distintos de *switches*, a saber (Jones e Kovacs, 2003):

- *Cut-through*—Apenas o MAC de destino dos *frames* recebidos é verificado, e baseado nesse endereço, o *frame* recebido é encaminhado, nenhuma outra verificação é realizada;
- *Store and forward*—Todo o *frame* é copiado para uma memória interna do *switch* e é realizada uma checagem de erro, para só então ser enviado ao destino;
- *Hybrid*—São uma combinação do *Store and Forward* e *Cut-Through*, até um certo limiar de erro operam como o primeiro tipo, após esse limiar como o segundo ;
- *Fragment-free*—Verifica os primeiros 64 *bytes* do *frame* recebido a procura de erros, se nenhum for encontrado o *frame* é enviado para o destino, sem ser armazenado no *switch*, serve também para aprender a relação fonte/destino da mensagem;

3.5 Modelo OSI

O modelo OSI foi introduzido pela *International Organization for Standardization* (ISO) nos final dos anos 1970 com o objetivo de promover a integração entre sistemas diferentes, sem a necessidade de realizar mudanças na lógica do *hardware* e *software* de cada sistema. Este modelo é, portanto, uma forma para compreender e projetar uma arquitetura de rede (Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002).

Ele é composto por sete camadas distintas, ordenadas e relacionadas entre si, responsáveis

pelo processo de transferência de informações através da rede, a Figura 3.4 ilustra de forma geral o modelo OSI (Forouzan, 2007; Daigle *et al.*, 2006).

Segundo Tanenbaum (2002), os princípios utilizados para se obter as sete camadas do modelo OSI são:

- Sempre que houver a necessidade de abstração adicional uma camada deve ser criada;
- Cada camada executa uma função bem definida;
- A função da camada deve ser escolhida levando em conta protocolos definidos internacionalmente;
- Deve-se minimizar o fluxo de informações pelas interfaces através de adequada escolha dos limites da camada;
- O número de camadas deve ser balanceado de forma a conter poucas camadas para promover o adequado controle da arquitetura e grande o bastante para que funções distintas não façam parte da mesma camada.

Figura 3.4: Modelo OSI.

Fonte: Forouzan (2007)

Em linhas gerais, no interior de cada máquina, uma camada solicita os serviços da camada subjacente e fornece serviços para a camada superior através da interface. Já para comunicação

entre máquinas, cada camada se comunica com sua correspondente na outra máquina, através de protocolos apropriados através de um processo *peer-to-peer* (Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002).

Quando uma mensagem é enviada do dispositivo A para o B, no interior de cada máquina ela passará por todas as camadas. Porém, ao trafegar pela rede ela pode passar por um ou mais nós intermediários, que podem ser um roteador ou um *switch*, por exemplo. Nesse caso, em geral, até a terceira camada poderá ser utilizada (Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002).

A Tabela 3.1, de forma resumida, descreve cada camada do modelo OSI (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002; Boed, 2000):

Tabela 3.1: Descrição camadas modelo OSI.

Camada	Descrição
7 - Aplicação	Fornece ao usuário uma interface para acesso aos recursos da rede, como transferência e acesso a arquivos, gerenciamento de bancos de dados, <i>e-mail</i> , entre outros. Nesta camada estão protocolos como TELNET e <i>Hypertext Transfer Protocol</i> (HTTP), por exemplo
6 - Apresentação	É responsável pela sintaxe e semântica das informações trocadas e conversão dos dados, de diferentes protocolos, para um formato que possa ser utilizado de forma conveniente pelo programa de aplicação utilizado
5 - Sessão	Fornece mecanismos para organizar e estruturar diálogos entre aplicações através da rede sincronizando a interação entre sistemas que se comunicam
4 - Transporte	Responsável pela entrega processo-a-processo de toda a mensagem de forma transparente. Realiza as funções de correção de erros, controle de fluxo e qualidade de serviço fim-a-fim requerida pelas aplicações, além disso, melhora a confiabilidade da camada de rede pois, busca garantir que um dado estará disponível de forma confiável para a camada de rede de outro nó ou computador
3 - Rede	Realiza as funções de chaveamento e roteamento para estabelecer, manter, encerrar conexões entre a origem e o destino da informação a ser transmitida. Fornece um endereço lógico para cada dispositivo da rede
2 - Enlace	Coloca as mensagens em conjunto, atribui cabeçalhos apropriados para serem enviados ou recebidos, assegura que as mensagens são entregues entre dois pontos. Controla o acesso a camada física através de processos para início e término das conexões, realiza o endereçamento físico, controle de fluxo e erros
1 - Física	Fornece as características físicas, funcionais e processuais para ativar, manter e desativar o fluxo de bits através do meio físico. Define as características físicas das interfaces, do meio de transmissão, representação de bits, topologia física, modo de transmissão, sincronização e taxa de dados

Segundo Forouzan (2007) e Tanenbaum (2002), o modelo OSI nunca foi implementado de forma plena, sendo relevante apenas como referência para o entendimento das redes de computadores. Comercialmente, esse foi substituído pelo modelo TCP/IP, o qual foi testado de forma intensiva na *Internet*, sendo seus protocolos aplicados de forma geral. O modelo TCP/IP será

apresentado a seguir.

3.5.1 *Ethernet*

Diversas tecnologias de rede para as camadas física e de enlace foram desenvolvidas ao longo do tempo, tais como *Ethernet*, *Token Ring*, *Token Bus* e FDDI, para serem aplicadas às LANs. Contudo, devido a sua simplicidade, escalabilidade, alta velocidade, baixo custo do *hardware* associado, a *Ethernet* se tornou a tecnologia majoritária para redes LAN (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007; Daigle *et al.*, 2006; Littman, 2002).

Originalmente, a *Ethernet* foi criada em meados da década de 1970 no *Palo Alto Research Center* (PARC) da Xerox, por Metcalfe e Boggs (1976). Em 1985 foi iniciado pelo IEEE o projeto 802, com o objetivo de padronizar a *Ethernet* promovendo a comunicação entre equipamentos de diferentes fabricantes para essa tecnologia de rede (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007; 200, 2008). A partir de então evoluiu em quatro gerações, conforme a Figura 3.5, cada uma delas tendo como objetivo básico o aumento na velocidade, manutenção de compatibilidade com a geração de rede anterior e preservação do quadro *Ethernet* (Kurose e Ross, 2009). Cabe dizer, que os padrões *Ethernet* e *Fast Ethernet*, são neste início da década do ano 2000, os mais comuns para IEDs.

Figura 3.5: Evolução da *Ethernet*.

Fonte: Kurose e Ross (2009)

O padrão para *Ethernet* desenvolvido pelo IEEE subdividiu a camada de enlace do modelo OSI em duas subcamadas, a *Logic Link Control* (LLC) e a MAC, conforme a Figura 3.6.

A finalidade da camada LLC é prover o controle de fluxo, de erro, sequenciamento de mensagens e reconhecimento de mensagens para as camadas superiores que demandem por tais serviços, através de um protocolo singular, ocultando as diferenças entre os diversos tipos de redes 802, fornecendo um único formato e interface para a camada de rede (Kurose e Ross, 2009; Tanenbaum, 2002; Stamper, 1994).

Figura 3.6: Representação camada física e enlace IEEE 802.

Fonte: Kurose e Ross (2009)

A subcamada MAC é responsável por fornecer os meios para acesso específico ao meio de transmissão para cada tipo de rede LAN. Para a *Ethernet*, o CSMA/CD é amplamente utilizado, provendo um tipo de método de acesso e formato de *framing* específico para o protocolo LAN correspondente (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002).

O CSMA/CD funciona basicamente da seguinte maneira (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002; Stallings, 2000):

1. Se o meio de comunicação estiver disponível transmita, caso contrário vá ao passo 2;
2. Se o meio de comunicação estiver ocupado continue ouvindo até o canal estar disponível; então transmita imediatamente;
3. Se uma colisão for detectada durante a transmissão, envie um sinal breve de interferência para assegurar que todas as estações saibam que ocorreu uma colisão e então parem de transmitir;
4. Após a transmissão do sinal de bloqueio, aguardar por um tempo aleatório; então tentar transmitir novamente (repetir a partir do passo 1).

A camada física do modelo padronizado pelo IEEE depende da implementação e meio físico adotado para cada tipo de LAN. A Tabela 3.2 apresenta alguns tipos de camada física existentes (Forouzan, 2007; Marçula e Benini Filho, 2005).

Tabela 3.2: Breve descrição das camadas físicas *Ethernet*.

Tipo	Descrição
10Base2	Utiliza como meio de transmissão cabo coaxial fino; com conectores do tipo <i>Bayonet Neil Concelman</i> (BNC); tem velocidade de transmissão de 10 Mbps; permite um número máximo de cinco segmentos com 30 dispositivos conectados e comprimento máximo por segmento de 185 m. Utiliza topologia física em barramento
10Base5	Utiliza como meio de transmissão cabo coaxial grosso; com transceptores “vampiro”; tem velocidade de transmissão de 10 Mbps; permite um número máximo de cinco segmentos com 100 dispositivos conectados e comprimento máximo por segmento de 500 m. Utiliza topologia física em barramento
10BaseT	Utiliza como meio de transmissão cabo do tipo par trançado; com conector do tipo RJ-45; tem velocidade de transmissão de 10 Mbps; comprimento máximo por segmento de 100 m. Utiliza topologia física em estrela
10BaseFL	Utiliza como meio de transmissão cabos de fibra óptica; tem velocidade de transmissão de 10 Mbps; comprimento máximo por segmento de 2 Km
10BaseFB	Utiliza como meio de transmissão cabos de fibra óptica; tem velocidade de transmissão de 10 Mbps; para centrais de comunicação em alta velocidade
10BaseFP	Utiliza como meio de transmissão cabos de fibra óptica; tem velocidade de transmissão de 10 Mbps; comprimento máximo por segmento de 2 Km. Utiliza topologia física em estrela
100BaseTX	Utiliza como meio de transmissão dois pares, de um cabo com 4 pares, do cabo do tipo par trançado; tem velocidade de transmissão de 100 Mbps; comprimento máximo por segmento de 100 m
100BaseT2	Utiliza como meio de transmissão dois pares do cabo do tipo par trançado categoria 3; tem velocidade de transmissão de 100 Mbps
100BaseT4	Utiliza como meio de transmissão quatro pares do cabo do tipo par trançado categoria 3, 4 ou 5; tem velocidade de transmissão de 100 Mbps; comprimento máximo por segmento de 100 m
100BaseFX	Utiliza como meio de transmissão um par de fibras ópticas; tem velocidade de transmissão de 100 Mbps; comprimento máximo por segmento de 412 m
1000BaseT	Utiliza como meio de transmissão cabo do tipo par trançado categoria 4 e 5; tem velocidade de transmissão de 1000 Mbps
1000BaseCX	Utiliza como meio de transmissão cabo do tipo <i>Shielded Twisted Pair</i> (STP); tem velocidade de transmissão de 1000 Mbps
1000BaseLX	Utiliza como meio de transmissão fibra ópticas monomodo ou multimodo com comprimento de onda de 1300 nm; tem velocidade de transmissão de 1000 Mbps
1000BaseSX	Utiliza como meio de transmissão fibra ópticas monomodo com comprimento de onda de 850 nm; tem velocidade de transmissão de 1000 Mbps

3.5.2 O Modelo TCP/IP

O modelo TCP/IP foi proposto inicialmente por Cerf e Kahn (1974), no escopo da *Advanced Research Projects Agency Network* (ARPANET), uma rede de pesquisa patrocinada pelo departamento de defesa dos Estados Unidos. O nome do modelo é determinado pelos dois protocolos principais que o compõem, o TCP, cuja função é transportar de forma confiável as mensagens entre dispositivos ou sistemas e o IP, que é responsável pelo encaminhamento dos pacotes através das sub-redes, desde a origem até o destino (Kurose e Ross, 2009; Tanenbaum, 2002; Stallings, 2000; Stamper, 1994).

O objetivo dessa arquitetura é promover a conexão entre redes distintas de forma transparente, de ser capaz de manter as conexões entre as máquinas de origem e destino, mesmo se houver a perda do *hardware* de sub-rede, como um roteador ou *gateway*, além de ser flexível, com capacidade de se adaptar a aplicações com requisitos divergentes, como transferência de arquivos e transmissão de voz (Tanenbaum, 2002; Stamper, 1994).

A Figura 3.7, apresenta uma comparação entre o modelo OSI e o TCP/IP, o qual possui quatro camadas, Aplicação, Transporte, Inter-Redes e *Host-Rede*. As primeiras camadas fornecem funções de padrões físicos, interfaces de rede, ligação entre redes e transporte, já a última camada contém os diversos protocolos utilizados pelas aplicações de usuário (Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002). A não correspondência entre as camadas do modelo OSI e do TCP/IP se deve ao fato deste ter sido desenvolvido antes do modelo OSI (Forouzan, 2007).

Ao contrário do modelo OSI, o TCP/IP não é definido por uma entidade como a ISO e sim por uma série de documentos denominados *Request for Comments* (RFC), os quais são publicados por uma comunidade internacional aberta denominada *Internet Engineering Task Force* (IETF) e contém, de forma geral, propostas e padrões de protocolos que descrevem o funcionamento interno do TCP/IP e da *Internet* (McBride, 2007).

Ambos os modelos, OSI e TCP/IP, possuem similaridades, como o fato de serem baseados em pilhas de protocolos com funções análogas. As diferenças mais marcantes entre eles residem no fato de que para o modelo OSI os protocolos utilizados pelas camadas são mais bem encapsulados, pois, o modelo foi concebido antes dos protocolos correspondentes, tornando-o flexível e genérico, de forma que esses podem ser substituídos com certa facilidade em função de mudanças na tecnologia (Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002).

Já para o modelo TCP/IP os protocolos foram desenvolvidos primeiro, o que acabou por

Figura 3.7: Camadas OSI *vs* TCP/IP.

Fonte: Tanenbaum (2002)

moldar a criação do modelo. Outro aspecto a ser abordado, é que o modelo TCP/IP aceita dois modos de operação para a camada de transporte: orientada e não orientada a conexão. Já o modelo OSI aceita apenas o modo de operação orientado a conexão (Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002).

A Tabela 3.3, de forma resumida, descreve cada camada do modelo TCP/IP (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007; Tanenbaum, 2002; Stallings, 2000).

Tabela 3.3: Descrição camadas modelo TCP/IP.

Camada	Descrição
Aplicação	Equivalente às camadas de aplicação, apresentação e sessão do modelo OSI e contém os protocolos de nível mais alto, como por exemplo, <i>Simple Mail Transfer Protocol</i> (SMTP), <i>File Transfer Protocol</i> (FTP), HTTP entre outros necessários para as aplicações do usuário
Transporte	Equivale a camada de transporte no modelo OSI e é responsável por manter a conversação entre os hosts de origem e destino. Esta camada contém os protocolos TCP e UDP
Inter-Redes	Equivale a camada de rede do modelo OSI e realiza a função de roteamento de pacotes entre origem e destino através de redes distintas; o protocolo IP está contido nesta camada
Host-Rede	É equivalente às camadas física e de enlace do modelo OSI, define os padrões de transmissão de informações através da mídia de comunicação. O modelo TCP/IP não define nenhum protocolo em particular para essa camada, contudo ela suporta todos os protocolos-padrão e proprietários, como LAN- <i>Ethernet</i> e WAN-ATM

3.5.3 *User Datagram Protocol*

O UDP é o segundo protocolo utilizado na camada de transporte do modelo TCP/IP e implementa um serviço sem conexão e não confiável para prover comunicação entre processos, ao invés de *hosts* em cada extremidade da transmissão (Forouzan, 2007; Held, 2003; Postel, 1980).

O UDP é utilizado em aplicações que não requerem controle de fluxo, erro e nem manutenção da sequência de mensagens enviadas, sendo amplamente utilizado em consultas e aplicações diretas do tipo cliente/servidor implementadas na aplicação através de um mecanismo de solicitação/resposta. Como exemplo, pode-se citar seu uso em conjunto com aplicações de gerenciamento de rede (SNMP, servidor de arquivos remoto (*Network File System* (NFS)), protocolo de roteamento (*Routing Information Protocol* (RIP)), *multicasting*, entre outros (Kurose e Ross, 2009; Malinowski e Wilamowski, 2005).

Uma aplicação que o utilize pode enviar datagramas de forma independente, sem a necessidade de estabelecer ou liberar previamente uma conexão com o destinatário da informação. Dessa forma, o processo de comunicação é simplificado e implica em baixo *overhead*² (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007; Held, 2003).

Os datagramas não são numerados e podem ser entregues corrompidos, fora de ordem ou ainda serem perdidos, além disso não há confirmação de sua entrega. Não é implementado nenhum controle de fluxo, de retransmissão após a recepção de um datagrama incorreto. Já o controle de erros é feito pelo *checksum*³ (Forouzan, 2007; Olifer e Olifer, 2006; Peterson e Davie, 2003; Stallings, 2000).

A maneira pela qual o UDP realiza a recepção das informações provenientes de diversos serviços da camada de aplicação é chamada de multiplexação. O procedimento inverso, a disponibilização das informações provenientes da camada de rede aos diversos serviços da camada de aplicação é chamado de demultiplexação. Esses ocorrem através de um localizador abstrato chamado “porta”, cuja idéia básica consiste no envio de uma mensagem por um processo fonte para uma “porta” e pelo recebimento da mensagem por um processo de destino através de uma “porta” (Olifer e Olifer, 2006; Malinowski e Wilamowski, 2005; Peterson e Davie, 2003; Reynolds, 2002).

²Pode ser entendido como o uso excessivo de algum recurso durante a execução de uma tarefa, como, por exemplo, uso de memória ou largura de banda.

³Em sua forma mais simples consiste em um método para detecção de erros, baseado na comparação da soma dos dados enviados com a soma dos dados recebidos. Se ambas forem iguais não há erro, se forem diferentes, os dados transmitidos serão descartados. Cabe dizer que existem diferentes tipos de *checksum*, os quais utilizam diferentes polinômios e tamanhos de palavra de checagem

As “portas” são, de forma simplificada, essencialmente filas para o recebimento/envio de pacotes da/para a camada de rede e são agrupadas em três categorias, descritas a seguir (Olifer e Olifer, 2006; Malinowski e Wilamowski, 2005; Peterson e Davie, 2003; Reynolds, 2002):

- Portas padrão - variam de zero a 1023 e são aplicadas a serviços comuns como o *Telnet*, por exemplo;
- Portas registradas - variam de 1024 a 49.151 e tem seu uso controlado para evitar possíveis conflitos entre diferentes aplicativos que tentem utilizar a mesma porta para ouvir conexões de entrada;
- Dinâmicas e privadas - variam de 49.152 a 65.535 e são utilizadas por conexões de saída, em geral atribuídas à primeira porta disponível acima de 49.152.

As duas primeiras categorias são registradas e controladas pela *Internet Assigned Numbers Authority* (IANA). Já a terceira não segue necessariamente suas prescrições. A Tabela 3.4 apresenta algumas portas e suas respectivas aplicações para a categoria padrão (Reynolds, 2002; Malinowski e Wilamowski, 2005).

Tabela 3.4: Portas padrão utilizadas com o UDP.

Porta	Protocolo	Descrição	RFC/STD
7	Echo	<i>Ecoa um datagrama recebido ao emissor do mesmo</i>	STD20
9	Discard	<i>Descarta qualquer datagrama recebido</i>	STD21
11	Users	<i>Usuários ativos</i>	STD24
13	Daytime	<i>Fornecer o valor de data e horário no formato American Standard Code for Information Interchange (ASCII)</i>	STD25
17	Quote	<i>Fornecer uma indicação do dia no formato ASCII com até 512 caracteres</i>	STD23
19	Chargen	<i>Fornecer um vetor de caracteres de tamanho variável entre 0 a 512 caracteres</i>	STD22
37	Time	<i>Fornecer o valor em segundos acumulado desde 1/1/1900 em um formato de 32 bits</i>	STD26
53	Nameserver	<i>Sistema de nome de domínio Domain Name Service (DNS)</i>	STD13
67	Bootps	<i>Protocolo utilizado para fornecer o endereço IP (Bootstrap Protocol Server)</i>	RFC951
68	Bootpc	<i>(Protocolo utilizado para obter um endereço IP Bootstrap Protocol Client)</i>	RFC951
69	TFTP	<i>Protocolo de transferência de arquivos (Trivial File Transfer)</i>	STD33
111	RPC	<i>Chamada remota de procedimento (SUN Remote Procedure Call)</i>	RFC1831
123	NTP	<i>Network Time Protocol</i>	STD12
161	SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>	STD62

3.6 Qualidade de Serviço (QoS)

Segundo Kampichler (2005), a *Quality of Service* (QoS) se refere à habilidade dos elementos de uma rede, como por exemplo, uma aplicação, um *host* ou um roteador, em fornecer algum nível de garantia e restrição de tempo para a entrega de um dado através da rede. Trata-se, portanto, do desempenho de certos parâmetros característicos que um fluxo de dados deve alcançar (Wang, 2001; ISO/IEC, 1998).

Os parâmetros, mais comumente utilizados, são (Donoso, 2009; Forouzan, 2007; Kampichler, 2005):

- Confiabilidade - se um pacote ou confirmação é perdida, essa informação deve ser retransmitida;
- Atraso - refere-se ao atraso origem-destino entre a transmissão e recepção de um pacote;
- *Jitter* - é a variação do atraso entre pacotes que pertencem ao mesmo fluxo;
- Largura de banda - capacidade de transmissão de um enlace;
- *Throughput* - é o valor instantâneo do tráfego sobre um determinado enlace;
- Perda de pacotes - são pacotes que deixam de ser entregues ou o são com atrasos tão significativos que passam a ser contabilizados como perdas.

Para cada tipo de aplicação, como por exemplo, tráfego de voz, vídeo, transferência de arquivos e *e-mail*, haverá requisitos bem definidos de desempenho para os parâmetros mencionados anteriormente. Conforme apontado por Donoso (2009), o congestionamento da rede é a principal causa para falhas e longos tempos de resposta para aplicações sensíveis a atrasos. Dessa forma, segundo Stallings (2006), é necessário que cada tipo de tráfego existente na rede seja tratado de maneira distinta para obter a QoS desejada.

Para que cada tipo de tráfego seja tratado de forma apropriada é necessário marcá-lo e agrupá-lo em classes bem definidas. Esse tipo de mecanismo é conhecido como *Class of Service* (CoS) (Donoso, 2009). Para redes *Ethernet*, basicamente constituídas por equipamentos de camada 2 do modelo ISO/OSI, é utilizado o mecanismo de priorização definido pelo IEEE (2004), o qual agrupa o tráfego da rede em oito classes distintas, conforme a Tabela 3.5. Para esta classificação, o valor de prioridade 0 (valor padrão) representa a menor prioridade, enquanto o valor 7 representa a maior prioridade possível.

Tabela 3.5: Classes de tráfego.

Prioridade	Acrônimo	Tipo de Tráfego	Descrição
0	BE	<i>Best effort</i>	Tráfego corriqueiro da LAN
1	BK	<i>Background</i>	Transferência de grandes quantidades de informações sem interferir com outros serviços de rede
2	–	Disponível	–
3	EE	<i>Excellent Effort</i>	Tipo de serviço com melhores garantias de QoS fornecido a aplicações mais importantes
4	CI	<i>Controlled load</i>	Aplicações comerciais importantes que requerem disponibilidade de banda quando o fluxo de dados é solicitado
5	VI	Video	Caracterizado por atrasos e <i>jitter</i> < 100 ms
6	VO	Voz	Caracterizado por atrasos e <i>jitter</i> < 10 ms
7	NC	<i>Network control</i>	Caracterizado por requisitos que devem ser atingidos para manter a infraestrutura de rede

A classificação do tráfego, conforme apontado na Tabela 3.5, é realizada através da inserção do campo de prioridade do usuário no quadro *Ethernet*, conforme a Figura 3.8 (IEEE, 2004; Stallings, 2000). São utilizados 2 *bytes* para definir o *Tag Control Information* (TCI), o qual contém o campo de prioridade do usuário, com tamanho igual a 3 *bits*, o *Canonical Format Identifier* (CFI), com tamanho igual a 1 *bit*, utilizado para diferenciar quadros *Ethernet* de quadros *Token Ring* e o VLAN ID, com tamanho igual a 12 *bits* utilizado para agrupar dispositivos de uma forma lógica (Olifer e Olifer, 2006; Stallings, 2000).

Figura 3.8: Quadro MAC *Ethernet* com marcação de prioridade.

Fonte: Olifer e Olifer (2006)

Após a classificação do tráfego, é necessário definir os mecanismos que irão utilizá-la para fornecer a QoS pretendida. Basicamente, existem quatro métodos utilizados, que são (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007):

- escalonamento - mecanismo no qual diferentes classes de tráfego são tratadas de maneira equilibrada e apropriada. Um exemplo dessa técnica é a formação de fila do tipo *First-in, First-out* (FIFO);
- formatação de tráfego - nesta técnica é controlada a quantidade e a velocidade com que o

tráfego é transmitido pela rede, como, por exemplo, o balde furado (*Leaky bucket*);

- controle de admissão - utiliza parâmetros predefinidos para aceitar ou rejeitar um fluxo de dados;
- reserva de recursos - é realizada uma alocação prévia de recursos como tamanho de *buffer* e largura de banda para cada tipo de tráfego;

O *switch Ethernet* utilizado no Capítulo 5 faz uso do mecanismo de escalonamento através da técnica de formação de filas do tipo *Weighted Fair Queuing* (WFQ), a qual funciona de acordo com a Figura 3.9 da seguinte forma (Forouzan, 2007):

“Nessa técnica, os pacotes recebem diferentes classificações e são admitidos em filas diferentes. As filas, porém, são ponderadas em termos de prioridade das filas; prioridade maior significa peso maior. O sistema processa pacotes em cada fila, em rodízio, com o número de pacotes selecionados de cada fila com base no peso correspondente. Por exemplo, se os pesos forem 3, 2 e 1, serão processados três pacotes da primeira fila, dois da segunda fila e um da terceira fila. Se o sistema não impuser prioridade para as classes, todos os pesos podem ser iguais. Dessa maneira, temos formação de filas ponderadas com prioridade.”

Figura 3.9: Formação de filas ponderadas - WFQ.

Fonte: Forouzan (2007)

Segundo (Kurose e Ross, 2009),

“A WFQ garante que, em qualquer intervalo de tempo durante o qual houver pacotes da classe i para transmitir, a classe i receberá uma fração de serviço igual a $\frac{w_i}{\sum w_j}$, onde o denominador é a soma de todas as classes que também têm pacotes enfileirados para transmissão. No pior caso, mesmo que todas as classes tenham pacotes na fila, a classe i ainda terá garantido o recebimento de uma fração $\frac{w_i}{\sum w_j}$ da largura de banda. Assim, para um enlace com taxa de transmissão R , a classe i sempre conseguirá uma vazão de, no mínimo, $R \times \frac{w_i}{\sum w_j}$. Essa é uma descrição ideal da WFQ pois, não foi considerado o fato de que os pacotes são unidades discretas de dados e que a transmissão de um pacote não será interrompida para dar a início à transmissão de outro.”

Com base na classificação apresentada e nos métodos de formação de fila, um equipamento como um *switch Ethernet*, ou roteador, pode possuir um número de filas suficiente para acomodar vários tipos de tráfego. A Tabela 3.6 apresenta a associação entre número de filas e tipo de tráfego atendido segundo o IEEE (2004).

Tabela 3.6: Número de filas por classes de tráfego.

Nº Filas	Tipo de tráfego atendido							
1	BE							
2	BE				VO			
3	BE			Cl		VO		
4	BK	BE		Cl		VO		
5	BK	BE		Cl	VI	VO		
6	BK	BE	EE	Cl	VI	VO		
7	BK	BE	EE	Cl	VI	VO	NC	
8	BK	–	BE	EE	Cl	VI	VO	NC

3.7 Comentários Finais

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos relativos às redes de computadores aplicadas às SEs, com ênfase aos conceitos de LAN, topologia física e lógica, aos modelos ISO/OSI, TCP/IP, qualidade de serviço e alguns dispositivos de *hardware* empregados. Além disso, foi apresentada uma visão geral da automação de SEs. Ao final deste capítulo, o leitor irá adquirir subsídios para melhor entender os Capítulos 4 e 5.

Capítulo 4

O Padrão IEC 61850

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma visão geral sobre o padrão IEC 61850 apontando as características necessárias para o entendimento da etapa laboratorial descrita no Capítulo 5, além de algumas vantagens e desvantagens em sua utilização.

4.1 Motivações e Histórico sobre o Padrão IEC 61850

As demandas por desempenho, qualidade técnica, satisfação dos clientes e lucro, por exemplo, apresentam-se como elementos motivadores para a digitalização de SEs. Para que tais demandas sejam satisfeitas é necessário que uma grande quantidade de informações sejam adquiridas e processadas pelo SAS. Para que tal volume seja utilizado de forma ágil e confiável é necessário que uma rede de comunicação de dados seja aplicada para esse fim.

Existem vários equipamentos que podem compor um sistema de automação de subestações, como, por exemplo, PLCs, computadores industriais, processadores de comunicação de dados, IEDs, etc. A existência de várias regras, proprietárias ou não, para comunicação de dados, ou seja, protocolos de comunicação, estabelece um problema para integração destes equipamentos no âmbito do SAS. A Figura 4.1 ilustra esse argumento.

Tal restrição acaba por se tornar um obstáculo para a engenharia, devido ao fato de que se em uma subestação de energia houver a necessidade de que diferentes equipamentos, com protocolos próprios, sejam usados, será necessário implementar onerosas e complexas conversões entre os protocolos aplicados. Isso por si só aumenta os custos de implantação e manutenção da subestação e os custos de treinamento das equipes de trabalho envolvidas, além de impossibilitar

Figura 4.1: Principais protocolos usados para automação.

Fonte: Brand *et al.* (2005)

a comunicação direta entre equipamentos (*peer-to-peer*).

Posto esse cenário, no ano de 1988 o *Electric Power Research Institute* (EPRI) iniciou os trabalhos de desenvolvimento do *Utility Communications Architecture* (UCA), o qual vem a ser uma proposição para uma arquitetura de comunicação de dados para as concessionárias de energia elétrica. A citada arquitetura, ao ser publicada em 1999, versava sobre dois aspectos em geral: a comunicação entre centros de controle e a comunicação entre dispositivos de campo (de Oliveira *et al.*, 2003).

Contemporaneamente, o *International Electrotechnical Commission* (IEC) trabalhava para padronizar as interfaces para dispositivos de telecontrole através de um conjunto de normas denominadas IEC-60870-5. As quais, resumidamente, eram compostas pelos seguintes documentos (Rodrigues, 2005):

- IEC-60870-5-101: padronização da comunicação entre UTR e centros de controle para o sistema de potência;
- IEC-60870-5-103: padronização da comunicação serial de dispositivos de proteção digital;
- IEC-60870-5-104: a comunicação em redes LAN e WAN, baseado no uso de *Ethernet* com TCP/IP.

Em 1994, foram criados grupos de trabalho compostos por especialistas do mundo todo, nas normas IEC-60870-5 e a UCA 2.0, para estabelecer uma padronização mais abrangente para redes de comunicação de dados e sistemas em subestações de energia elétrica. Os referidos grupos estavam subordinados ao comitê técnico IEC-TC57 IEC (2003a). Por fim, houve um acordo entre a IEC e o EPRI para o estabelecimento de um único padrão para as redes de comunicação e sistemas em subestações. Este padrão seria denominado IEC-61850 (Rodrigues, 2005).

4.2 Composição Geral

Em linhas gerais pode-se dizer que o objetivo do padrão IEC 61850 é promover a troca de informações entre equipamentos distintos, em fabricação e propósito, no âmbito das subestações de energia elétrica. Além de garantir a adaptação a novas tecnologias de comunicação, bem como fornecer ao usuário a possibilidade de configurar as funções que são de seu interesse conforme as necessidades de uma aplicação em particular. Como característica acessória, pode-se citar a demanda das concessionárias de energia elétrica pela intercambialidade entre IEDs de fabricantes distintos IEC-61850 (2007). O recebimento de dados e serviços de comunicação, no âmbito deste padrão, está baseado na idéia de “definição abstrata”, a qual vem a ser, de forma simplificada, o estabelecimento de objetos e serviços independentemente de qualquer outro protocolo, o que acaba por implicar em um mapeamento para diversas regras de comunicação que possam atender aos dados e serviços solicitados (Mackiewicz, 2006). A título de informação a Tabela 4.1 apresenta o conjunto de documentos referentes ao padrão IEC 61850 (IEC-61850, 2007).

Nas próximas seções serão descritas brevemente as partes relativas ao padrão IEC 61850 necessárias ao estabelecimento do aparato experimental apresentado no Capítulo 5.

4.3 Parte 5 - Requisitos de Comunicação para Funções e Modelos de Dispositivos

Esta parte da documentação aborda os requisitos de comunicação para as funções e modelos de objetos nas subestações de energia elétrica. Por funções entenda-se as tarefas a serem executadas na subestação, como por exemplo, a monitoração do estado do disjuntor. As funções estão distribuídas em todos os níveis do sistema de automação de subestações. A Figura 4.2 ilustra o exposto, para a qual: 1 - Troca de dados de proteção entre os níveis de *bay* e estação; 2 - Troca

Tabela 4.1: Documentação para o padrão IEC 61850.

Tema do Documento	Parte	Descrição
Aspectos do Sistema	1	Introdução e Visão Geral
	2	Glossário
	3	Requisitos Gerais
	4	Gerenciamento de Sistema e Projeto
	5	Requisitos de Comunicação para Funções e Modelos de Dispositivos
Configuração	6	Linguagem de Configuração para IEDs de SEs (SCL)
Estrutura de Comunicação Básica para equipamentos de SEs	7.1	Princípios e Modelos
	7.2	ACSI
	7.3	Classes de Dados Comuns
	7.4	Classes de Nós Lógicos e de Dados Compatíveis
Mapeamento de Serviços de Comunicação Específicos	8.1	Mapeamento para <i>Manufacturing Messaging Specification</i> (MMS) (ISO/IEC 9506 Parte 1 e Parte 2) e para ISO/IEC 8802-3
	9.1	Valores Amostrais sobre Enlace Serial Unidirecional <i>Multidrop</i> Ponto-a-Ponto
	9.2	Valores Amostrais sobre ISO/IEC 8802-3
Ensaaios	10	Testes de Conformidade

de dados de proteção entre os níveis de *bay* e proteção remota; 3 - Troca de dados no interior do nível de *bay*; 4 - Troca de dados instantâneos dos TCs e TPs entre os níveis de processo e *Bay*; 5 - Troca de dados de controle entre os níveis de processo e *bay*; 6 - Troca de dados de controle entre os níveis de *bay* e estação; 7 - Troca de dados entre a subestação e o local de trabalho da engenharia; 8 - Troca de dados entre os *bays*, especialmente para funções rápidas como intertravamentos; 9 - Troca de dados no interior do nível de estação e 10 - Troca de dados de controle entre os dispositivos da subestação e o centro de controle remoto.

Funções distintas, que podem estar inseridas em equipamentos físicos e níveis do sistema de automação diferentes, serão integradas pelo padrão IEC 61850. A Figura 4.3 será utilizada para ilustrar tal integração. Nessa figura existem duas funções de automação definidas, F1 e F2. Estas foram implementadas pelo uso de vários dispositivos físicos distintos (*Physical Devices*, PD), PD1, PD2 e PD3. Cada dispositivo físico possui um conjunto de subfunções (*Logical Nodes*, LN), LN0, LN1, LN2, LN3, LN4, LN5 e LN6. Essas subfunções podem trocar informações entre si através de conexões lógicas (*Logical Connections*, LN), LC12, LC14, LC35, LC36 e LC56. Cabe dizer que as conexões também podem ser físicas, ou seja, entre dispositivos físicos (*Physical Connections*, PC), como PC12, PC13 e PC23.

Um elemento relevante é o nó lógico, que vem a ser a menor parte de uma função que troca informações (Apostolov, 2006). O nó lógico possui um conjunto de dados e esse por sua vez um conjunto de atributos. Esse modelamento retrata os elementos físicos existentes nas subesta-

Figura 4.2: Níveis para o sistema de automação de subestações.

Fonte: IEC (2003c)

ções de energia elétrica, como por exemplo um disjuntor. Essa representação é suficientemente minuciosa para caracterizá-los adequadamente. Os nós lógicos estão agrupados em dispositivos lógicos. Os dispositivos lógicos, por sua vez, estão inseridos nos IEDs. Logo, uma informação que venha a circular pela rede de comunicação de dados sobre o padrão IEC 61850 possuirá a seguinte sintaxe:

Dispositivo Físico/Dispositivo Lógico.Nó Lógico.Dado.Atributo

A Figura 4.4 exibe a estrutura geral do nó lógico (Mackiewicz, 2006; Gurjão *et al.*, 2007).

Os nós lógicos são agrupados conforme sua natureza, ou seja, fazem referência a um tipo de informação existente nas subestações de energia elétrica. A Tabela 4.2 apresenta os grupos de nós lógicos existentes (IEC, 2003d).

A nomenclatura dos nós lógicos é iniciada pela definição do grupo, seguida pelo nome do elemento a ser utilizado. Como exemplo, pode-se citar:

- *RREC* - Religamento automático;
- *CSWT* - Controlador de Chaveamento;
- *MMXU* - Medição Operativa/Indicativa;

Figura 4.3: Conexões entre nós lógicos.

Fonte: IEC (2003c)

Figura 4.4: Relação entre nó lógico, dispositivo lógico e IED.

Fonte: Proudfoot (2002)

- *PDIS* - Proteção de Distância;
- *XSWI* - Chave Seccionadora.

A utilização de um nó lógico não é singular, ou seja, é possível empregá-lo mais de uma vez. Para isso acrescenta-se um sufixo ao nome do nó lógico, individualizando-o. Como exemplo, pode-se trabalhar em um mesmo IED com informações advindas de dois disjuntores. Para tanto, cada um deles será denominado por *XCBR1* e *XCBR2* (Mackiewicz, 2006).

Cada nó lógico possui em seu interior um conjunto de dados pertinentes a sua função e que fazem referência a um elemento físico existente nas subestações de energia elétrica. Tomando o nó lógico que representa o disjuntor, *XCBR*, por exemplo, o mesmo contém vários dados. Abaixo

Tabela 4.2: Grupos de nós lógicos segundo a versão 1.0 da IEC 61850..

Grupo	Tipo de Nó Lógico	N. Elementos Conjunto
A	Controle Automático	4
C	Controle Supervisionado	4
G	Função Genérica Referenciada	3
I	Interface e Arquivamento	4
L	Sistema de Nó Lógico	2
M	Contador e Medição	7
P	Função de Proteção	27
R	Função de Proteção Relacionada	10
S	Sensores	3
T	Transformador de Instrumento	2
X	Disjuntor/Seccionadora	2
Y	Transformador de Força	4
Z	Equipamentos Extras	14

estão apresentados alguns desses.

- *Pos* - Posição;
- *OpCnt* - Contador de operações;
- *BlkOpn* - Bloqueado para comando de abertura;
- *BlkCls* - Bloqueado para comando de fechamento;

Por sua vez, cada dado pertencente a um nó lógico, possui em seu interior um conjunto de atributos. Tal conjunto, expressa as informações a serem obtidas/enviadas para o modelo de objeto com o qual se está trabalhando. Tomando-se como exemplo o dado *Pos*, do nó lógico *XCBR*, esse pode possuir diversos atributos. Abaixo dois deles são apresentados (IEC, 2003b):

- *Control* - são informações que se modificam a partir do recebimento de um comando, como o estado do disjuntor e;
- *Status value* - são informações que representam tanto o estado de um processo quanto de uma função alocada a um nó lógico.

4.4 Parte 6 - Linguagem de Configuração

Esta parte da documentação aborda a linguagem de configuração do sistema de automação de uma subestação como um todo. Visto que, diversos IEDs e nós lógicos podem ser aplicados, certo formalismo no encaminhamento das informações se faz necessário. Isto é conseguido através da

SCL. Logo, com o uso da SCL é possível descrever as interações entre o sistema de automação da subestação e os equipamentos de pátio através das configurações dos IEDs, com os parâmetros e funções necessárias no contexto da subestação. A linguagem de configuração SCL está baseada na *eXtender Markup Language* (XML) versão 1.0.

O conteúdo de um arquivo *Substation Configuration Description* (SCD) é, basicamente, composto pelos dados gerais da subestação, dos equipamentos de manobra, das funcionalidades utilizadas dos IEDs e serviços de comunicação de dados. Isso implica na capacidade de troca de informações entre ferramentas de configuração de fabricantes distintos (Gurjão *et al.*, 2007). A Tabela 4.3 exibe um resumo dos arquivos SCL (IEC, 2004a). A Figura 4.5 apresenta a relação entre os diversos arquivos mencionados.

Tabela 4.3: Arquivos SCL.

Arquivo	Descrição
<i>System Specification Description</i> (SSD)	Descreve o diagrama e a funcionalidade da automação da subestação associado aos nós lógicos
SCD	Descreve a configuração completa da subestação incluindo a rede de comunicação e informações sobre o fluxo de dados de comunicação
<i>IED Capability Description</i> (ICD)	Descreve as capacidades e pré-configurações dos IEDs
<i>Configured IED Description</i> (CID)	Descrição da configuração de um IED específico, ou seja, dos dados que serão fornecidos pelos nós lógicos de cada IED

Figura 4.5: Linguagem de configuração da subestação.

Fonte: de Carvalho Paulino (2006)

4.5 Parte 8 - Serviços de Comunicação Específicos

O objetivo desta parte da documentação é o de especificar um método de troca de dados, com ou sem prioridade, através da LAN, com o uso da ACSI, o qual define o mapeamento dos objetos de dados e serviços (IEC, 2004b).

A pilha de protocolos utilizada pelo padrão IEC 61850 é composta pelo serviço de geração de dados, camadas de transporte, rede e enlace. A Figura 4.6 exibe tal organização. Quanto à referida figura, cabe notar que apenas a camada de enlace é comum a todos os tipos de mensagem. A camada de enlace se utiliza do protocolo *Ethernet*, para a qual há a possibilidade de estabelecimento de prioridade de envio/recebimento nas mensagens.

Figura 4.6: Pilha de protocolos IEC 61850 simplificada.

Fonte: Gurjão *et al.* (2007)

As mensagens envolvidas no âmbito deste padrão podem ser divididas naquelas que não possuem restrição de tempo de tráfego e aquelas que o têm. Para a Figura 4.6 as mensagens denominadas cliente/servidor (MMS) não possuem restrição de tempo. Portanto, utilizam toda a pilha de protocolos até chegar a camada de enlace. Para as demais mensagens, GOOSE e valores amostrados, existe restrição quanto ao tempo de tráfego. Logo, são mapeadas diretamente até a camada de enlace (Gurjão *et al.*, 2007). A Tabela 4.4 apresenta a classificação das mensagens para o padrão IEC 61850 (IEC, 2004b).

Mensagens GOOSE

As mensagens de alta prioridade, 1 e 1A, de acordo com a Tabela 4.4, recebem a designação *Generic Substation Events* (GSE). Uma subclassificação é atribuída a tais mensagens, a saber:

Tabela 4.4: Classificação de mensagens para o padrão IEC 61850.

Tipo Mensagem	Descrição
1	Mensagem rápida
1A	<i>Trip</i>
2	Mensagem de média velocidade
3	Mensagens lentas
4	Dados em rajada
5	Funções de transferência de arquivos
6	Mensagens de sincronismo de tempo

GOOSE e *Generic Substation Status Event* (GSSE).

A diferença entre elas reside no fato de que para as mensagens GOOSE a informação é configurável e utiliza um grupo de dados (*dataset*). Enquanto que as mensagens GSSE trabalham com uma estrutura fixa para as informações de estado, a qual é disponibilizada na rede de comunicação de dados da subestação (Pereira *et al.*, 2007).

As mensagens GOOSE utilizam um datagrama ISO não orientado a conexão que contém em seu cabeçalho as informações de endereço, nome do emissor, tempo do evento que disparou e o tempo esperado para uma nova mensagem GOOSE. Essas mensagens são do tipo *multicast*, devendo cada IED da rede de comunicação, quando receber uma mensagem GOOSE, determinar o emissor da mensagem e se o dado recebido é de seu interesse ou não (Bastos e Castro, 2005).

Através do uso das mensagens GOOSE ou GSSE é possível realizar a troca de informações diretamente entre dois IEDs, comunicação *peer-to-peer*, em alta velocidade. Essa característica acaba por implicar na modificação do circuito funcional de uma SE, pois o número de ligações elétricas, feitas com condutores metálicos, é sensivelmente diminuída.

Ainda sobre as mensagens GOOSE é adequado mencionar que as mesmas fazem uso do serviço *Specific Communication Service Mapping* (SCSM), o qual vem a ser uma estratégia de retransmissão de mensagens até que o emissor das mesmas receba uma confirmação de entrega pelo receptor ou receptores desejados (Pereira *et al.*, 2007).

A Figura 4.7 ilustra o funcionamento desse mecanismo, sendo: T0 - retransmissão em condições estáveis, ou seja, não há ocorrência de nenhum evento por um longo período de tempo; (T0) - a retransmissão em condição estável, e será diminuída na ocorrência de um evento; T1 - Menor tempo de retransmissão após um evento e T2, T3 - tempo de retransmissão até o retorno a T0.

Em condições estáveis de transmissão, o tempo em que as mensagens GOOSE são enviadas

Figura 4.7: Mecanismo de retransmissão de mensagens GOOSE.

Fonte: IEC (2004b)

é igual a T_0 . Quando um evento ocorre, o tempo T_0 é diminuído para $T(0)$ e então a mensagem GOOSE é enviada e repetida no intervalo T_1 , e repetida em T_1 e em intervalos crescentes T_2 e T_3 até retornar ao estado de transmissão estável T_0 . A cada tentativa de envio, o tempo de espera para a confirmação é incrementado de acordo com um critério escolhido por cada fabricante, visando a minimizar o congestionamento na rede de comunicação (IEC, 2004b).

Em conjunto às mensagens reenviadas, um parâmetro chamado *timeAllowedToLive* é transportado. Sua função é informar ao receptor o tempo máximo para a próxima retransmissão. Se uma nova mensagem não for recebida nesse intervalo de tempo, então, o receptor assume que houve perda do pacote.

Tempo de Transferência

O tempo de transferência é definido de acordo com a Figura 4.8 e representa o tempo no qual a função f_1 , pertencente ao IED 1, envia um dado para a função f_2 , existente no IED 2. Ele é constituído pelos tempos individuais dos processadores de comunicação de cada IED, t_a e t_c , e do tempo de tráfego na rede de comunicação de dados, t_b , o que inclui tempos de espera e processamento (latência) dos vários dispositivos nela existentes IEC (2003c). O tempo de transferência, segundo a IEC (2003c), não leva em conta o tempo de processamento que o IED utiliza para gerar a saída da função f_1 , tão pouco a mesma norma define como esse tempo deve ser medido.

Foi publicado pelo *UCA International Users Group*, (Nordell *et al.*, 2012) uma sugestão de ensaio chamado “*Round Trip*” para determinar t_a , t_b e t_c . Contudo, neste trabalho, não se está interessado em discriminá-los. Dessa forma o tempo de transferência será entendido como o tempo médio entre a publicação de uma informação em um dispositivo e seu recebimento em

outro. Tal interpretação possui um significado maior e prático para a operação do SP pois, trata-se do tempo de aplicação necessário ao trabalho do engenheiro de proteção.

Figura 4.8: Tempo de transferência.

As grandezas representadas na Figura 4.8 são:

- t_a - Tempo entre o IED 1 colocar um dado no topo da sua pilha de comunicação e a mensagem correspondente ser enviada para a rede;
- t_b - Tempo em que a mensagem trafega pela rede;
- t_c - Tempo entre o IED 2 retirar a mensagem da rede e extrair o dado da sua pilha de comunicação.

O tempo de transferência é agrupado em classes de desempenho distintas, para acomodar as diferentes demandas de cada funcionalidade da SE. Basicamente, existem dois grandes grupos: as aplicações de proteção e controle e aquelas para medição e Qualidade da Energia Elétrica (QEE) Apostolov e Tholomier (2006); IEC (2003c). O conceito das classes de desempenho pode ser entendido como uma analogia ao tempo de atuação dos circuitos de *trip* em estado sólido tradicionais com fios. Dessa forma, os tempos das classes de desempenho devem ser, pelo menos, tão bons quanto àqueles obtidos com a tecnologia anterior.

Os requisitos de tempo para o grupo de proteção e controle são mais rigorosos, em função dos efeitos do tempo de atuação de uma função do SP sobre a estabilidade do SEP ou ainda sobre um elemento em falta. Esse grupo é subdividido em três classes distintas, Apostolov e Tholomier (2006); IEC (2003c):

- Classe P1 - aplicada a *bays* de distribuição ou para casos nos quais um baixo desempenho pode ser aceito, sendo o tempo de transferência igual a 10ms;

- Classe P2 - aplicada a *bays* de transmissão ou em caso contrário por decisão do usuário, sendo o tempo de transferência igual a 3ms;
- Classe P3 - aplicada a *bays* de transmissão onde um desempenho elevado é necessário, sendo o tempo de transferência igual a 3 ms.

Nesta pesquisa, será utilizada a Classe P1 para mensagens GOOSE do tipo 1/1A, o que implica em um tempo de transferência máximo igual a 10 ms.

Barramento de Processo

O padrão IEC 61850 permite trabalhar, basicamente, com duas arquiteturas para integração dos três níveis de um sistema de automação de subestações. A Figura 4.9 apresenta uma concepção convencional para atingir tal objetivo, a qual está baseada no uso intensivo de condutores metálicos e construção de circuitos funcionais para troca de informação entre o nível de processo e nível de *bay* do sistema de automação. Logo, existe apenas um barramento de comunicação de dados entre o nível de *bay* e o nível de estação.

Figura 4.9: Arquitetura para automação contendo apenas barramento de estação.

Fonte: Andersson *et al.* (2003)

Ao se prover uma interface IEC 61850 aos equipamentos de pátio, acaba-se por introduzir um novo barramento de comunicação na subestação, a saber: o barramento de processo, o qual interliga o nível de processo ao nível de *bay*. Esta nova arquitetura acaba por implicar em uma

mudança acentuada para a construção de subestações de energia elétrica, pois com seu uso há acentuada redução do uso de fiação elétrica e, conseqüentemente, estabelece-se uma mudança nos circuitos funcionais da subestação. Agora, as informações, comandos, etc. passam a circular, majoritariamente, através de redes de comunicação de dados entre os três níveis. A Figura 4.10 exibe a arquitetura mencionada.

Figura 4.10: Arquitetura para automação contendo barramento de processo e estação.

Fonte: Andersson *et al.* (2003)

Um elemento responsável por prover tal interface é a *Merging Unit* (MU), a qual realiza a amostragem dos sinais de interesse, tensão, corrente, estado de equipamentos, mediante uma taxa de amostragem predeterminada. As unidades de interface MU disponibilizam os dados para outros IEDs para realizar as atividades necessárias no contexto da subestação.

A comunicação adotada para as MUs é serial e *multidrop*, isto é, pode-se conectar mais de um elemento na rede. Além de ser *simplex*, dados em uma única direção, e ponto-a-ponto. A Figura 4.11 ilustra uma MU.

Cada pacote enviado pela MU possui uma estampa de tempo associada para fins de sincronização entre os diversos pontos de medição, pois cada IED pode utilizar dados provenientes de qualquer MU existente na SE (Kanabar, 2011). Os requisitos de sincronismo de tempo segundo a parte 5 do padrão IEC 61850, IEC (2003c), são atendidos por duas técnicas principais, o *Inter Range Instrumentation Group* (IRIG) no formato B e o padrão IEEE 1588 (IEEE, 2011, 2008; Council, 1998).

Figura 4.11: Exemplo de MU.

Fonte: IEC (2003e)

O IRIG no formato B é a técnica mais difundida para sincronismo de tempo em SEs, com uma precisão da ordem de microsegundos. Sua instalação é realizada em uma rede dedicada com cada dispositivo e o relógio sincronizador conectados em cascata ou em estrela. Já o IEEE 1588 é uma solução para sincronismo de tempo através da rede de comunicação de dados com precisão da ordem de nanosegundos, porém o *switch Ethernet* utilizado deve ser capaz de trabalhar com pacotes do IEEE 1588.

4.6 Vantagens e Desvantagens do Padrão IEC 61850

Segundo Pereira *et al.* (2009) e Dawidczak e Oliveira (2007) as vantagens, resumidamente, do padrão IEC 61850 são:

- **Redução de custos** - Propicia um sistema de comunicação aberto no qual equipamentos de diferentes fabricantes podem trocar informações diretamente entre si, eliminando a necessidade de conversores de protocolos, implicando em redução nos custos de implantação do SAS;
- **Melhor Relação Custo/Benefício do Investimento** - Ampliação da vida útil de dis-

positivos e sistemas em função da escalabilidade do padrão, ou seja, acomodação de tecnologias futuras;

- **Simplificação da Engenharia** - Facilidade de implantação, atualização, ensaio e manutenção do SAS ao longo da vida útil da SE;
- **Flexibilidade** - Ser capaz de comportar inovações tecnológicas, por parte dos fabricantes de equipamentos, e mudanças de ponto de vista dos usuários, como por exemplo, a utilização de uma UTR ao invés de automação descentralizada;
- **Funções distribuídas** - Maior inteligência de processamento pela automação distribuída e proteção adaptativa.

A despeito dos benefícios apresentados, certos aspectos diametrais devem ser considerados, tais como (Holbach *et al.*, 2007; Kaneda *et al.*, 2008):

- O estabelecimento de SAS compostos por múltiplos fornecedores de IEDs ainda ocorre de forma experimental - a grande maioria das instalações em funcionamento utilizam IEDs de um único fabricante;
- Há variações na implementação do padrão IEC 61850 entre fabricantes de IEDs - a ordem das informações enviadas em uma mensagem nem sempre é a mesma para todos os fabricantes, o que pode gerar um entrave para uso de ferramentas automáticas de configuração;
- Não uniformidade nas ferramentas de configuração de cada fabricante de IEDs - aplicativos distintos possuem parâmetros opcionais diferentes, o que implica em um obstáculo para a configuração automática do SAS;
- Para se obter eficiência na troca de mensagens com restrição de tempo, é necessário aplicar à construção do SAS *switches* capazes de manipular mensagens com campo de prioridade e *Virtual LAN* (VLAN);

4.7 Comentários Finais

Salto tecnológico invariavelmente implicam em mudanças de paradigma, que por sua vez, necessitarão de certo tempo para serem adequadamente assimilados, demandando, portanto, em construção de conhecimento acerca das novidades trazidas consigo. Tal fato é observado em

relação a utilização do padrão de comunicação IEC 61850, a qual é incipiente no começo dos anos 2000 em âmbito mundial.

As Figuras 4.12(a) a 4.12(e) apresentam dados de utilização do padrão IEC 61850 obtidos com 9 concessionárias de energia elétrica brasileira pelo Comitê de Estudos CE-B5 do Cigré-Brasil (CEB5, 2010). As concessionárias analisadas são a AES, Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), Companhia Energética de Minas Gerais S.A.(Cemig), Companhia Paranaense de Energia (Copel) G&T e Copel D, Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP), Furnas, Itaipu e Light. Ao analisa-las fica claro que o padrão IEC 61850 representa o novo paradigma para automação de SEs. Observa-se que 67% das empresas já utilizam o padrão IEC 61850 e as que ainda não o utilizam irão fazê-lo em um horizonte de até 3 anos. Vê-se ainda, que são poucas SEs sob esse padrão. Contudo, os novos projetos, em sua maioria, serão realizados sob o padrão IEC 61850. Dessa forma, neste capítulo foram apresentadas as características gerais do padrão de comunicação IEC 61850 necessárias para que o leitor entenda de forma adequada os experimentos realizados no Capítulo 5.

(a) Utilização do padrão IEC 61850 pelas empresas pesquisadas.

(b) Tempo estimado para adoção do padrão IEC 61850.

(c) Quantidade de SEs em operação que utilizam o padrão IEC 61850 por empresa.

(d) Quantidade de SEs em implementação que utilizaram o padrão IEC 61850 por empresa.

(e) Percentual de SEs IEC 61850 nos novos empreendimentos por empresa.

Figura 4.12: Dados utilização IEC 61850 no Brasil.

Fonte: CEB5 (2010)

Capítulo 5

Parâmetro de Dimensionamento para Mensagens GOOSE

Neste capítulo é descrito o aparato experimental utilizado para estabelecer um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens GOOSE. Além disso, são apresentados alguns resultados e suas discussões.

5.1 Fluxograma de Trabalho

A etapa experimental da pesquisa foi realizada segundo o fluxograma apresentado na Figura 5.1, o qual será detalhado a seguir.

A análise experimental da transferência de mensagens GOOSE *vs* a ocupação percentual da banda de comunicação dos IEDs foi planejada para atingir o objetivo de estabelecer um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência das mensagens GOOSE.

Para tanto, foi realizada a montagem dos equipamentos, a qual consiste na instalação em painéis de 19" dos IEDs, *switch* gerenciável, relógio sincronizador *Global Positioning System* (GPS) e *Uninterruptible Power Supply* (UPS). Após a montagem, foi definida a topologia física para a rede de comunicação de dados e, conseqüentemente, foram realizadas as interligações dos equipamentos à mesma e ao relógio sincronizado por GPS. Por fim, foi estabelecida a infraestrutura de alimentação segura em corrente alternada para todo o aparato utilizado.

Realizada a atividade de montagem foi definido e configurado o esquema de ensaio. Para isso

Figura 5.1: Fluxograma de trabalho.

foram ajustados os parâmetros indispensáveis, referentes a todos os equipamentos utilizados, para execução do ensaio. Esses consistem em determinar o modo de comunicação, o endereçamento lógico (endereço IP), a classificação das mensagens, a instalação de aplicativos de *software*, o envio e recepção de mensagens GOOSE, o sinal de sincronismo de tempo, os valores de tensão auxiliar de alimentação, o Registro Sequencial de Eventos (RSE) e a sinalização na IHM dos IEDs.

Em seguida foram definidos os cenários de ensaio, os quais consistem na discriminação dos valores de tráfego extra aplicado e suas características, em determinar os equipamentos que terão suas interfaces de rede sobrecarregadas, em ajustar o aplicativo de *software* que irá gerar o tráfego extra, em definir as configurações do *switch* gerenciável e em estabelecer um fluxo controlado de mensagens GOOSE entre um IED e aqueles dispositivos que serão sobrecarregados.

Concluídas as etapas anteriores foi realizada a execução dos ensaios a partir do conjunto de situações definidas previamente. Finalizada a execução dos ensaios foi obtida uma base de dados experimental a partir do resgate do RSE de cada IED.

Posteriormente foi realizada a análise dos dados experimentais a partir de um aplicativo computacional desenvolvido para extração das características de interesse da massa de dados obtida previamente. Essas características são o desvio padrão, o valor máximo, o valor mínimo e a média para o tempo de transferência, além da contabilização do total de mensagens perdidas. Todos esses valores serão apresentados em gráficos pertinentes para análise e discussão. Por fim, a partir das discussões sobre os resultados, com consequente apresentação das inferências sobre os mesmos, é proposto um parâmetro de dimensionamento e comparação de desempenho para o tempo de transferência e para a perda das mensagens GOOSE.

A próxima fase desta pesquisa consiste no desenvolvimento de um sistema de monitoramento contínuo da ocupação de banda da interface de comunicação dos IEDs, que em conjunto com o parâmetro de dimensionamento proposto, serve para indicar se o desempenho das mensagens GOOSE dos IEDs monitorados está de acordo ou não com os limites determinados pelo padrão IEC 61850. A descrição geral dessa fase será apresentada no Capítulo 6.

5.2 Avaliação do Comportamento do Tempo de Transferência considerando Variações na Configuração de QoS e Ocupação da Banda dos IEDs

Os elementos componentes aplicados na construção do aparato experimental utilizado nesta pesquisa são os mesmos encontrados em SEs reais, sendo sua montagem e configuração similares ao que de fato se encontraria em campo. A Figura 5.2 apresenta seu aspecto físico.

Este aparato foi utilizado porque representa adequadamente, em escala reduzida, a rede de comunicação de dados e o SP de uma SE, conforme será exemplificado através da Figura 5.3 e Figura 5.4. Esta abordagem é distinta daquela utilizada em outros trabalhos sobre o padrão IEC 61850 realizados em ambientes de simulação computacional.

A seguir são apresentadas as principais características, relevantes a esta pesquisa, dos elementos utilizados no aparato experimental.

Painéis de 19"

Foi adquirido 01 painel com medida padrão de 19", semelhante àqueles encontrados em SEs, para alojar a montagem física dos equipamentos utilizados no aparato laboratorial. Esse foi

Figura 5.2: Montagem dos equipamentos utilizados.

identificado pelo acrônimo de PNL1.

IEDs

Foram utilizados 03 IEDs de proteção, sendo dois de um mesmo fabricante, com interface de rede óptica multi-modo, emissor óptico com tecnologia *Light-Emitting Diode* (LED) e comprimento de onda de 820nm, velocidade de 100Mbps, com conector *Straight Tip* (ST), suporte ao padrão IEC 61850, capacidade de armazenamento de 1000 linhas para o RSE com precisão da medição de 1ms, recepção de sinal GPS através do IRIG no formato B demodulada (IRIG-B002) e IHM configurável.

Microcomputadores

Foram utilizados 03 microcomputadores do tipo PC para executar os aplicativos de configuração, monitoramento, análise e geração de tráfego para os equipamentos constituintes da referida estrutura laboratorial. O primeiro possui um processador Intel® Core™ 2 Quad Q9450 com velocidade de *clock* de 2,66GHz, placa de rede Intel® 82566DC-2 Gigabit, 4GB de memória

Random Access Memory (RAM) *Double Data Rate* (DDR)3 de 1333MHz, 500GB para armazenamento e sistema operacional Ubuntu 11.10 com *Kernel* linux 3.0.4 de 32 bits. O segundo computador possui um processador Intel® Core™ 2 Duo P9600 com velocidade de *clock* de 2,66GHz, placa de rede Intel® 82567LM Gigabit, 4GB de memória RAM DDR2 de 800MHz, 250GB de armazenamento e sistema operacional *Windows Professional* 7® de 64 bits. O terceiro possui um processador Intel® Core™ 2 Duo P8600 com velocidade de *clock* de 2,4GHz, placa de rede *Ethernet* Gigabit modelo Realtek RTL8168C(P), 4GB de memória RAM DDR2 de 800MHz, 500GB de armazenamento e sistema operacional Ubuntu 11.10 de 32 bits.

Switch para rede *Ethernet*

Foi utilizado 01 *switch ethernet* gerenciável, de camada 2 do modelo ISO/OSI, do tipo *Store and forward*, com *IEEE 802.3x full-duplex flow - control, non-blocking*, com interfaces de comunicação 10/100 Mbps com uma taxa de pacotes de 14880/148800 pps, com conectores ST para fibra óptica multi-modo e RJ45 para cabo UTP, *buffer* de pacotes de 240KB, padrões de rede *Ethernet* v1.0/v2.0 IEEE 802.3: 10 Base-T; IEEE 802.3u: 100Base-TX, 100Base-FX; IEEE 802.1p: *Priority protocol*; IEEE 802.1d: *Spanning tree protocol*; IEEE 802.1q: *VLAN tagging*; IEEE 802.3x: *Flow control*, latência igual a $5/15\mu\text{s}$ + tempo do pacote para 10/100 Mbps, em conformidade com IEEE P1613 - *Standard for Environmental and Testing Requirements for Communications Networking Devices Installed in Electric Power Facilities* e IEC 61850-3 - *General requirements*, com duas filas de prioridade do tipo ponderada (WFQ).

Relógio GPS

Foi utilizado um relógio GPS com entrada IRIG no formato B, modulada ou IRIG-B compatível com *Transistor-Transistor Logic* (TTL) demodulada, com conectores BNC ou bloco de pinos (“pin-in”) e suporta os formatos IRIG-B002 e IRIG-B120. Possui 16 saídas IRIG-B demoduladas com conector DB-9 e formato IRIG-B002.

UPS

Foi utilizada uma UPS com entrada monofásica em 115/127/220Vac, frequência de 60Hz, potência de saída de 3000 VA, 115Vac, fator de potência 0,62, com capacidade das baterias de 17Ah, correspondendo aproximadamente, para este aparato, em um tempo de 3,4h de autonomia.

Materiais de consumo e ferramentas

Foram utilizados diversos materiais para compor a estrutura desejada, como por exemplo uma caixa de cabo UTP-Categoria 5e, uma bobina de cabo manga com 26 vias, cordões em fibra óptica multi-modo com conectores ST, conectores RJ45, abraçadeiras, condutores elétricos, parafusos do tipo porca-gaiola, fita isolante, etc. Quanto as ferramentas, foram utilizadas ferramentas para construção de redes de comunicação de dados, como alicate crimpador, testadores de cabo, etc, além de ferro de solda, multímetro, alicates diversos, como universal, de bico e de corte, chaves de fenda, chaves de precisão, entre outras.

Softwares

Foram utilizados *softwares* para configuração e controle dos equipamentos, como por exemplo o *AcSELerator QuickSet*, versão 5.2.0.1, o *EnerVista Launchpad*, versão 5.01 e o *AcSELerator Architect*, versão 1.1.99.0, a linguagem de computação técnica MatLab[®] R2010a para realizar a análise dos resultados, os aplicativos *WAN Killer*[®] e *SNMP Real-Time Graph*[®] 9.2.0.47, para geração e monitoramento de tráfego, respectivamente. Alguns desses são nativos dos equipamentos com os quais se está trabalhando, outros são aplicativos de uso geral que se adequam as necessidades desta pesquisa.

Definição da Topologia Física da Rede

A topologia física em estrela foi escolhida em função das características mencionadas no Item 3.3.2 e por ser, de acordo com discussões feitas com profissionais da área ao longo desta pesquisa, preferencial quando se busca uma estrutura de rede de menor custo.

Como exemplo é apresentado o diagrama unifilar simplificado, Figura 5.3, de uma SE real composta por um arranjo em barra dupla a quatro chaves, três *bays* de máquina, dois *bays* de linha, três transformadores de 230/13,8/13,8 kV - 170MVA cada, seis geradores e um *bay* de acoplamento. Cabe ressaltar que a proteção de barra utiliza o estado de todas as chaves seccionadoras e disjuntores através de mensagens GOOSE.

Observa-se, por esse diagrama unifilar que se trata de uma SE de grande importância. Mesmo assim, a topologia física adotada para a conexão dos IEDs, de acordo com a Figura 5.4, foi a estrela simples sem qualquer tipo de redundância.

Figura 5.3: Diagrama unifilar simplificado SE exemplo.

Configuração para a Montagem Laboratorial

Além das configurações apresentadas na Tabela 5.2 o RSE de cada IED foi configurado para registrar o envio e recepção das mensagens GOOSE utilizadas durante o ensaio, de acordo com a lógica apresentada na Figura 5.7.

Execução dos Ensaio

A rede de comunicação de dados da SE é utilizada para mais de uma atividade, como por exemplo, envio/recebimento de mensagens GOOSE, troca de informações pelo SCADA e obtenção de informações de processo, como oscilografias e RSEs. Cada uma dessas atividades possui requisitos distintos para o tempo de entrega de suas mensagens, tornando necessário classificar o tráfego que chega em um nó ativo da rede, como um *switch Ethernet* por exemplo, em diferentes classes de prioridade. Nesse contexto, tanto a configuração de QoS quanto a ocupação percentual da banda da interface de comunicação dos IEDs são variáveis a serem consideradas.

Conforme mencionado anteriormente, o *switch Ethernet* possui duas filas de prioridade e um método de formação de fila do tipo ponderada (*weighted fair queuing*), para o qual 8 valores distintos de peso podem ser aplicados. Neste trabalho foi verificada a influência desse ajuste sobre o tempo de transferência e perda de mensagens GOOSE, e denominado de “perfil”. A Tabela 5.3 resume os ajustes possíveis para os pesos.

Tabela 5.3: Ajuste dos pesos no mecanismo de QoS.

Peso	Encaminhamento Pacotes
Zero	O tráfego é enviado alternadamente a partir de cada fila e os pacotes são enfileirados alternadamente em cada fila
1	02 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote de fila de baixa prioridade
2	04 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote de fila de baixa prioridade
3	06 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote de fila de baixa prioridade
4	08 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote de fila de baixa prioridade
5	10 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote de fila de baixa prioridade
6	12 pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e um pacote de fila de baixa prioridade
7	Todos os pacotes são enviados a partir da fila de alta prioridade e nenhum pacote é enviado a partir fila de baixa prioridade

A outra variável para execução do ensaio é a ocupação percentual da banda do IED em estudo, pois suas variações influenciam diretamente no atraso e perda de mensagens GOOSE. Foram definidos 11 patamares de ocupação da banda nominal do IED em estudo, de acordo com a Tabela 5.4.

As ocupações de banda descritas foram obtidas a partir da geração de tráfego extra com um perfil de *bits* variável, conforme ilustra a Figura 5.6, a partir de uma sobrecarga do tipo *Denial*

of Service (DoS) aplicada somente ao IED 2 (Erickson, 2008; Forouzan, 2007).

Tabela 5.4: Patamares ocupação banda IED.

	Banda Nominal (BN)=100 Mbps										
Patamar N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
% BN	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
Pacotes/s	n/a	418	1.253	2.089	2.924	3.760	4.596	5.431	6.267	7.102	7.938

Figura 5.6: Exemplo de tráfego extra para 85% da ocupação de banda.

Foram utilizados os aplicativos de *software* *WAN Killer*[®] e *SNMP Real-Time Graph*[®] 9.2.0.47, para geração e monitoramento do tráfego extra, respectivamente (Solarwinds, 2009). O monitoramento foi possível, pois, o *switch ethernet* utilizado possui o SNMP implementado (Seifert e Edwards, 2008). Quanto ao gráfico apresentado na Figura 5.6, esse foi obtido com o uso do *SNMP Real-Time Graph*[®] 9.2.0.47 com um intervalo de requisição de 1s, e um tempo total de medição de 240s. Para tanto, foi utilizada a *Management Information Base* (MIB) *ifOutOctets* contida no *switch ethernet* (McCloghrie e Rose, 1991). Posteriormente, com os valores obtidos é calculada a ocupação da banda, conforme será apresentado no Capítulo 6 (Mauro e Schmidt, 2005).

Para a criação do tráfego extra foi utilizado o protocolo da camada de transporte UDP. Cada pacote enviado foi configurado com tamanho igual a 1496 *bytes*, além de utilizar a porta 1024 do UDP (Forouzan, 2007). A quantidade de pacotes por segundo gerados foi ajustada para representar o carregamento percentual da banda nominal da interface do IED em estudo, neste

caso 100Mbps, de acordo com a Tabela 5.4.

Em seguida foi definido um fluxo conhecido de mensagens GOOSE enviadas do IED 1 ao IED 2 para tornar possível a determinação do tempo de transferência e perda das mesmas. Segundo Flores *et al.* (2007), o tempo de transferência pode ser obtido a partir do RSE de cada IED. Isso é possível pois, para IEDs com relógios sincronizados com a mesma base de tempo basta realizar a subtração direta do valor da estampa de tempo do IED que recebeu a mensagem GOOSE que a publicou.

Para estabelecer a base de tempo necessária foi utilizado o IRIG no formato B, por esse atender aos requisitos de precisão demandados pelo padrão IEC 61850 (IEEE, 2007; IEC, 2003c; Council, 1998).

A Figura 5.7 ilustra a lógica desenvolvida com o uso do *software UR Setup*, versão 5.01 (GE, 2012), através de portas lógicas, implementada no IED1,(GE, 2011a), a qual gera uma sucessão de 44 mensagens GOOSE com duração de 1s e intervalo de 3s (conforme a Figura 5.8) entre as mesmas, para cada patamar de ocupação de banda caracterizado na Tabela 5.4. É possível ajustar a lógica de forma a executar sucessivos testes com as características mencionadas anteriormente. Além disso, cada mensagem possui uma estampa de tempo única atribuída por um relógio sincronizado por GPS.

Figura 5.7: Lógica digital para geração de mensagens GOOSE.

Figura 5.8: Saída da lógica desenvolvida.

Resumidamente, a lógica desenvolvida funciona da seguinte forma:

1. Inicia o envio de mensagens GOOSE a partir do IED 1 quando o botão PB-1 é pressionado. O *timer* 1 faz com que as entradas da porta *xor* 1 fiquem com níveis lógicos distintos por 1 segundo, fazendo com que sua saída vá a nível lógico 1, durante o tempo mencionado, excitando o *flip-flop*;
2. Habilita ou bloqueia o envio de mensagens GOOSE através das entradas *set* e *reset* do *flip-flop*;
3. Estabelece a cadência e duração das mensagens GOOSE. Quando a porta *xor* 2, estiver com uma de suas entradas em nível lógico 1, e a outra em nível lógico 0, o *timer* 2 será ativado através da porta *and* 1 fazendo com que a porta *xor* 3, após 3s, receba nível lógico 1. Como sua outra entrada está em nível lógico 0, sua saída será ativada publicando uma mensagem GOOSE 1. Decorrido o tempo de 1s ajustado para o *timer* 4, cessa o envio da mensagem GOOSE 1.
4. O contador 1 determina a quantidade de mensagens enviadas. Neste caso ajustado para 44. Após o limite ajustado ser atingido a saída desse contador é ativada e, através da porta *or* 3, o *flip-flop* será bloqueado, encerrando a publicação das mensagens GOOSE. Além disso a saída do contador 1 serve para bloquear o bloco funcional 3 e estabilizar a lógica desenvolvida, iniciar um novo conjunto de publicação de mensagens GOOSE após 1 minuto, conforme o ajuste dos *timers* 6 e 7, zerar o valor acumulado no contador 1 pelo *timer* 5, incrementar o contador 2 e gerar uma mensagem GOOSE 2, a qual indica o término da publicação de 44 mensagens GOOSE 1;

5. Contador que define a quantidade máxima de repetições das 44 mensagens GOOSE 1 definidas anteriormente;
6. Botão PB-2 a partir do qual o funcionamento da lógica desenvolvida é encerrado permanentemente, fazendo com que todos os contadores zerem os valores acumulados.

As sinalizações presentes na lógica para geração das mensagens GOOSE podem ser descritas conforme segue:

- Led L1, indica o início de um conjunto de teste;
- Led L2, indica o envio de uma mensagem GOOSE1;
- Led L3, indica o intervalo entre conjuntos de teste consecutivos (mensagem GOOSE2);
- Led L4, indica o término de todos os conjuntos de teste.

Para o IED 2 as sinalizações significam, respectivamente:

- Led L1, indica a recepção de uma mensagem GOOSE1;
- Led L2, indica o intervalo entre conjuntos de teste consecutivos (mensagem GOOSE2).

O NL escolhido para cada mensagem transmitida foi o *Generic Function References, Generic Process I/O* (GGIO), conforme estabelecido no padrão IEC61850. A Tabela 5.5 e a Figura 5.9 apresentam a associação e endereçamento das mensagens GOOSE1 e GOOSE2 para esse NL e entre os IEDs.

Tabela 5.5: Mapeamento das atribuições de dados do NL GGIO para os IEDs 1 e 2.

Tipo	Referência	Estrutura NL
GOOSE1	bloco 3	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
GOOSE2	bloco 4	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
GOOSE1	L1	IED ₂ .LD ₂ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
GOOSE2	L2	IED ₂ .LD ₂ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal

5.3 Resultados e Discussões

Nesta seção são descritos os resultados para as situações operativas caracterizadas anteriormente. A Figura 5.10 apresenta o fluxograma que representa o aplicativo computacional

Figura 5.9: Endereçamento das mensagens GOOSE 1 e 2.

desenvolvido para análise dos dados experimentais. Este aplicativo foi feito através da linguagem de computação técnica MatLab[®] R2010a dispondo de várias funções nativas da mesma, como, por exemplo, *fopen*, *fscanf*, *mean*, *max*, *min*, entre outras (Gilat, 2006; Chapman, 2006; Matsumoto, 2006). A determinação das perdas é feita através de um algoritmo desenvolvido para este trabalho, o qual é apresentado na Figura 5.11. Através do seu uso são calculados o tempo de transferência médio, o desvio padrão para o tempo de transferência médio, o valor máximo e mínimo para o tempo de transferência e as perdas de mensagens GOOSE para cada teste executado.

Com esses dados, os gráficos correspondentes a cada grandeza são traçados e o comportamento do IED em estudo é analisado. Quanto aos gráficos, suas abscissas foram definidas de acordo com os valores discretos apresentados na Tabela 5.4, e as ordenadas, em escala logarítmica, correspondem a cada uma das métricas definidas. A partir desses foi obtido o parâmetro de dimensionamento proposto.

Figura 5.10: Representação esquemática para o aplicativo de análise dos dados.

Figura 5.11: Algoritmo para determinação das perdas de mensagens GOOSE.

Para a Figura 5.11: j = índice do vetor de amostras do IED1; i = índice do vetor de amostras do IED2; L_{IED1} = Tamanho do vetor de amostras do IED1; $L_{IED1}(j)$ = Valor da amostra do IED1 na posição j e $L_{IED2}(i)$ = Valor da amostra do IED2 na posição i .

5.3.1 Validação do Aparato Laboratorial

Antes da execução dos ensaios, o aparato laboratorial foi verificado a fim de detectar se algum dos seus elementos constituintes poderia ter suas capacidades de rede saturadas e, portanto, influenciar nos resultados. As condições utilizadas para o carregamento, configuração e endereçamento são aquelas descritas na Seção 5.2. O *switch Ethernet* foi configurado para o perfil zero e o tráfego extra foi direcionado apenas ao IED2. Já as mensagens GOOSE foram publicadas para os IEDs 2 e 3.

A Figura 5.12 apresenta o tempo de transferência médio dos IEDs 2 e 3.

Figura 5.12: Resultados verificação sistema laboratorial.

O resultado apresentado na Figura 5.12(b) mostra que tanto o *switch Ethernet* quanto o enlace utilizado não foram comprometidos, pois, todo o carregamento enviado ao IED 2 não apresentou qualquer influência sobre o tempo de transferência entre o IED1 e IED3, o qual ficou em torno de 3,9ms. Contudo, o tempo de transferência para o IED 2, conforme a Figura 5.12(a), é influenciado pela ocupação de sua interface de rede, esse resultado será melhor explicado no Item 5.3.2. Dessa maneira, constata-se que o aparato laboratorial é adequado para a condução dos ensaios, conforme o planejamento prévio.

5.3.2 Resultados para o Perfil Zero

A Figura 5.13 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil zero para os IEDs 2 e 3. Observa-se para ambos os IEDs a existência de duas regiões com comportamento distinto para as perdas.

O IED 2, no intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, não apresentou perda de mensagens. Porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, as perdas aumentam para 45,73% em média, conforme a Figura 5.13(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, as perdas são nulas, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda, as perdas aumentaram para 100%, o que indica a perda de comunicação entre o IED1 e IED 3, conforme a Figura 5.13(b).

A Figura 5.14 apresenta o tempo de transferência médio das mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil zero para os IEDs 2 e 3. Novamente, observa-se a existência de duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência.

O IED 2 para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, apresentou um tempo de transferência igual a 4,46 ms. Porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, o tempo de transferência aumenta em média para 129 ms, conforme a Figura 5.14(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, o tempo de transferência médio é igual a 741,9 ms. Porém, entre 5% e 95% de ocupação de banda, região II, não há dados registrados para o tempo de transferência devido a perda de comunicação entre o IED1 e IED 3, conforme a Figura 5.14(b).

A Figura 5.15 apresenta os valores máximo, mínimo e desvio padrão para o tempo de transferência dos IEDs 2 e 3 obtidos durante o ensaio no perfil zero. Como nas métricas anteriores, também se nota a existência de duas regiões para os valores de máximo, mínimo e desvio padrão.

O IED 2, entre 0% e 15% de ocupação de banda apresenta valores médios de 6,03, 3,2 e 0,74ms para os valores máximos, mínimos e desvio padrão, respectivamente. Os valores médios de máximo e desvio padrão para a região II, intervalo entre 15% e 95%, aumentam para 729,31ms e 211,29ms respectivamente, enquanto que o valor médio para o mínimo permanece praticamente constante, sendo igual a 3,71ms, conforme a Figura 5.15(a). A região I da Figura 5.15(b) apresenta os valores médios de 2004,8, 3,15 e 504,82ms para o máximo, mínimo e desvio padrão respectivamente. Para a região II não há dados registrados, devido a perda de comunicação entre o IED1 e IED 3.

(a) Perdas IED2.

(b) Perdas IED3.

Figura 5.13: Perdas para o perfil 0.

(a) Tempo de Transferência IED2.

(b) Tempo de Transferência IED3.

Figura 5.14: Tempo de transferência para o perfil 0.

(a) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED2.

(b) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED3.

Figura 5.15: Valores máximos, mínimos e desvio padrão para o tempo de transferência do perfil 0.

5.3.3 Resultados para o Perfil 1

A Figura 5.16 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 1 para os IEDs 2 e 3. Observa-se para ambos os IEDs a existência de duas regiões com comportamento distinto para as perdas.

O IED 2 no intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, não apresentou perda de mensagens. Porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, as perdas aumentam para 48,57% em média, conforme a Figura 5.16(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, as perdas são nulas, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda as perdas aumentam para 100%, o que indica a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.16(b).

A Figura 5.17 apresenta o tempo de transferência médio das mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 1 para os IEDs 2 e 3. Novamente, observa-se a existência de duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência.

O IED 2 para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, apresentou um tempo de transferência igual a 4,36 ms, porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, o tempo de transferência aumenta em média para 88,72 ms, conforme a Figura 5.17(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, o tempo de transferência médio é igual a 502,15 ms, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda, região II, não há dados registrados para o tempo de transferência devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.17(b).

A Figura 5.18 apresenta os valores máximo, mínimo e desvio padrão para o tempo de transferência dos IEDs 2 e 3 obtidos durante o ensaio no perfil 1. Como as métricas anteriores, também se nota a existência de duas regiões para os valores de máximo, mínimo e desvio padrão.

Para o IED 2, entre 0% e 15% de ocupação de banda apresenta valores médios de 5,96, 2,86 e 0,69 ms para os valores máximos, mínimos e desvio padrão, respectivamente. Os valores médios de máximo, mínimo e desvio padrão para a região II, intervalo entre 15% e 95%, aumentam para 539,60, 4,17 e 150,44 ms respectivamente, conforme a Figura 5.18(a). A região I da Figura 5.18(b) apresenta os valores médios de 1362,1, 3,15 e 451,68 ms para o máximo, mínimo e desvio padrão respectivamente. Para a região II não há dados registrados, devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3.

(a) Perdas IED2.

(b) Perdas IED3.

Figura 5.16: Perdas para o perfil 1.

(a) Tempo de Transferência IED2.

(b) Tempo de Transferência IED3.

Figura 5.17: Tempo de transferência para o perfil 1.

(a) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED2.

(b) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED3.

Figura 5.18: Valores máximos, mínimos e desvio padrão para o tempo de transferência do perfil 1.

5.3.4 Resultados para o Perfil 2

A Figura 5.19 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 2 para os IEDs 2 e 3. Observa-se para ambos os IEDs a existência de duas regiões com comportamento distinto para as perdas.

O IED 2 no intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, não apresentou perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, as perdas aumentaram para 48,57% em média, conforme a Figura 5.19(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, as perdas são nulas. Porém, entre 5% e 95% de ocupação de banda as perdas aumentam para 100%, o que indica a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.19(b).

A Figura 5.20 apresenta o tempo de transferência médio das mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 2 para os IEDs 2 e 3. Novamente, observa-se a existência de duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência.

O IED 2 para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, apresentou um tempo de transferência igual a 4,46 ms, porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, o tempo de transferência aumentou em média para 94,51 ms, conforme a Figura 5.20(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, o tempo de transferência médio é igual a 451,65 ms, porém, entre 5% e 95% de ocupação de banda, região II, não há dados registrados para o tempo de transferência devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.20(b).

A Figura 5.21 apresenta os valores máximo, mínimo e desvio padrão para o tempo de transferência dos IEDs 2 e 3 obtidos durante o ensaio no perfil 2. Como as métricas anteriores, também se nota a existência de duas regiões para os valores de máximo, mínimo e desvio padrão.

Para o IED 2, entre 0% e 15% de ocupação de banda apresenta valores médios de 5,90, 3,46 e 0,75 ms para os valores máximos, mínimos e desvio padrão, respectivamente. Os valores médios de máximo, mínimo e desvio padrão para a região II, intervalo entre 15% e 95%, aumentam para 531,11, 3,86 e 152,21 ms respectivamente, conforme a Figura 5.21(a). A região I da Figura 5.21(b) apresenta os valores médios de 1572,55, 3,04 e 406,27 ms para o máximo, mínimo e desvio padrão respectivamente. Para a região II não há dados registrados, devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3.

(a) Perdas IED2.

(b) Perdas IED3.

Figura 5.19: Perdas para o perfil 2.

(a) Tempo de Transferência IED2.

(b) Tempo de Transferência IED3.

Figura 5.20: Tempo de transferência para o perfil 2.

(a) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED2.

(b) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED3.

Figura 5.21: Valores máximos, mínimos e desvio padrão para o tempo de transferência do perfil 2.

5.3.5 Resultados para o Perfil 3

A Figura 5.22 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 3 para os IEDs 2 e 3. Observa-se para ambos os IEDs a existência de duas regiões com comportamento distinto para as perdas.

O IED 2 no intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, não apresentou perda de mensagens. Porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, as perdas aumentam para 49,71% em média, conforme a Figura 5.22(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, as perdas são nulas, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda as perdas aumentam para 100%, o que indica a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.22(b).

A Figura 5.23 apresenta o tempo de transferência médio das mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 3 para os IEDs 2 e 3. Novamente, observa-se a existência de duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência.

O IED 2 para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, apresentou um tempo de transferência igual a 4,56 ms, porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, o tempo de transferência aumenta em média para 78,21 ms, conforme a Figura 5.23(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, o tempo de transferência médio é igual a 30,65 ms, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda, região II, não há dados registrados para o tempo de transferência devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.23(b).

A Figura 5.24 apresenta os valores máximo, mínimo e desvio padrão para o tempo de transferência dos IEDs 2 e 3 obtidos durante o ensaio no perfil 3. Como as métricas anteriores, também se nota a existência de duas regiões para os valores de máximo, mínimo e desvio padrão.

Para o IED 2, entre 0% e 15% de ocupação de banda apresenta valores médios de 6,50, 3,10 e 0,76 ms para os valores máximos, mínimos e desvio padrão, respectivamente. Os valores médios de máximo, mínimo e desvio padrão para a região II, intervalo entre 15% e 95%, aumentam para 289,90, 3,97 e 105,36 ms respectivamente, conforme a Figura 5.24(a). A região I da Figura 5.24(b) apresenta os valores médios de 103,35, 5,25 e 21,88 ms para o máximo, mínimo e desvio padrão respectivamente. Para a região II não há dados registrados, devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3.

(a) Perdas IED2.

(b) Perdas IED3.

Figura 5.22: Perdas para o perfil 3.

(a) Tempo de Transferência IED2.

(b) Tempo de Transferência IED3.

Figura 5.23: Tempo de transferência para o perfil 3.

(a) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED2.

(b) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED3.

Figura 5.24: Valores máximos, mínimos e desvio padrão para o tempo de transferência do perfil 3.

5.3.6 Resultados para o Perfil 4

A Figura 5.25 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 4 para os IEDs 2 e 3. Observa-se para ambos os IEDs a existência de duas regiões com comportamento distinto para as perdas.

O IED 2 no intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, não apresentou perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, as perdas aumentam para 46,59% em média, conforme a Figura 5.25(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, as perdas são nulas, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda as perdas aumentam para 100%, o que indica a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.25(b).

A Figura 5.26 apresenta o tempo de transferência médio das mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 4 para os IEDs 2 e 3. Novamente, observa-se a existência de duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência.

O IED 2 para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, apresentou um tempo de transferência igual a 4,43 ms, porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, o tempo de transferência aumenta em média para 103,01 ms, conforme a Figura 5.26(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, o tempo de transferência médio é igual a 861,25 ms, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda, região II, não há dados registrados para o tempo de transferência devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.26(b).

A Figura 5.27 apresenta os valores máximo, mínimo e desvio padrão para o tempo de transferência dos IEDs 2 e 3 obtidos durante o ensaio no perfil 4. Como as métricas anteriores, também se nota a existência de duas regiões para os valores de máximo, mínimo e desvio padrão.

Para o IED 2, entre 0% e 15% de ocupação de banda apresenta valores médios de 6,10, 3,16 e 0,77 ms para os valores máximos, mínimos e desvio padrão, respectivamente. Os valores médios de máximo, mínimo e desvio padrão para a região II, intervalo entre 15% e 95%, aumentam para 478,88, 3,97 e 151,82 ms respectivamente, conforme a Figura 5.27(a). A região I da Figura 5.27(b) apresenta os valores médios de 2281,75, 2,35 e 560,11 ms para o máximo, mínimo e desvio padrão respectivamente. Para a região II não há dados registrados, devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3.

(a) Perdas IED2.

(b) Perdas IED3.

Figura 5.25: Perdas para o perfil 4.

(a) Tempo de Transferência IED2.

(b) Tempo de Transferência IED3.

Figura 5.26: Tempo de transferência para o perfil 4.

(a) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED2.

(b) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED3.

Figura 5.27: Valores máximos, mínimos e desvio padrão para o tempo de transferência do perfil 4.

5.3.7 Resultados para o Perfil 5

A Figura 5.28 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 5 para os IEDs 2 e 3. Observa-se para ambos os IEDs a existência de duas regiões com comportamento distinto para as perdas.

O IED 2 no intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, não apresentou perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, as perdas aumentam para 48,57% em média, conforme a Figura 5.28(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, as perdas são nulas, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda as perdas aumentam para 100%, o que indica a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.28(b).

A Figura 5.29 apresenta o tempo de transferência médio das mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 5 para os IEDs 2 e 3. Novamente, observa-se a existência de duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência.

O IED 2 para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, apresentou um tempo de transferência igual a 5,26 ms, porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, o tempo de transferência aumenta em média para 109,77 ms, conforme a Figura 5.29(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, o tempo de transferência médio é igual a 435,60 ms, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda, região II, não há dados registrados para o tempo de transferência devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.29(b).

A Figura 5.30 apresenta os valores máximo, mínimo e desvio padrão para o tempo de transferência dos IEDs 2 e 3 obtidos durante o ensaio no perfil 5. Como as métricas anteriores, também se nota a existência de duas regiões para os valores de máximo, mínimo e desvio padrão.

Para o IED 2, entre 0% e 15% de ocupação de banda apresenta valores médios de 8,53, 3,03 e 0,90 ms para os valores máximos, mínimos e desvio padrão, respectivamente. Os valores médios de máximo, mínimo e desvio padrão para a região II, intervalo entre 15% e 95%, aumentam para 595,20, 4,18 e 165,64 ms respectivamente, conforme a Figura 5.30(a). A região I da Figura 5.30(b) apresenta os valores médios de 1501,35, 3,15 e 418,21 ms para o máximo, mínimo e desvio padrão respectivamente. Para a região II não há dados registrados, devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3.

(a) Perdas IED2.

(b) Perdas IED3.

Figura 5.28: Perdas para o perfil 5.

(a) Tempo de Transferência IED2.

(b) Tempo de Transferência IED3.

Figura 5.29: Tempo de transferência para o perfil 5.

(a) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED2.

(b) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED3.

Figura 5.30: Valores máximos, mínimos e desvio padrão para o tempo de transferência do perfil 5.

5.3.8 Resultados para o Perfil 6

A Figura 5.31 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 6 para os IEDs 2 e 3. Observa-se para ambos os IEDs a existência de duas regiões com comportamento distinto para as perdas.

O IED 2 no intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, não apresentou perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, as perdas aumentam para 48,57% em média, conforme a Figura 5.31(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, as perdas são nulas, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda as perdas aumentam para 100%, o que indica a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.31(b).

A Figura 5.32 apresenta o tempo de transferência médio das mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 6 para os IEDs 2 e 3. Novamente, observa-se a existência de duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência.

O IED 2 para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, apresentou um tempo de transferência igual a 4,46 ms, porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, o tempo de transferência aumenta em média para 106,38 ms, conforme a Figura 5.32(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, o tempo de transferência médio é igual a 131,80 ms, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda, região II, não há dados registrados para o tempo de transferência devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.32(b).

A Figura 5.33 apresenta os valores máximo, mínimo e desvio padrão para o tempo de transferência dos IEDs 2 e 3 obtidos durante o ensaio no perfil 6. Como as métricas anteriores, também se nota a existência de duas regiões para os valores de máximo, mínimo e desvio padrão.

Para o IED 2, entre 0% e 15% de ocupação de banda apresenta valores médios de 6,10, 3,20 e 0,81 ms para os valores máximos, mínimos e desvio padrão, respectivamente. Os valores médios de máximo, mínimo e desvio padrão para a região II, intervalo entre 15% e 95%, aumentam para 827,73, 4,26 e 203,71 ms respectivamente, conforme a Figura 5.33(a). A região I da Figura 5.33(b) apresenta os valores médios de 1137,70, 3,15 e 905,36 ms para o máximo, mínimo e desvio padrão respectivamente. Para a região II não há dados registrados, devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3.

(a) Perdas IED2.

(b) Perdas IED3.

Figura 5.31: Perdas para o perfil 6.

(a) Tempo de Transferência IED2.

(b) Tempo de Transferência IED3.

Figura 5.32: Tempo de transferência para o perfil 6.

(a) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED2.

(b) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED3.

Figura 5.33: Valores máximos, mínimos e desvio padrão para o tempo de transferência do perfil 6.

5.3.9 Resultados para o Perfil 7

A Figura 5.34 contém as perdas de mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 7 para os IEDs 2 e 3. Observa-se para ambos os IEDs a existência de duas regiões com comportamento distinto para as perdas.

O IED 2 no intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, não apresentou perda de mensagens, porém para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, as perdas aumentam para 52,92% em média, conforme a Figura 5.34(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, as perdas são nulas, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda as perdas aumentam para 100%, o que indica a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.34(b).

A Figura 5.35 apresenta o tempo de transferência médio das mensagens GOOSE registradas durante o ensaio realizado no perfil 7 para os IEDs 2 e 3. Novamente, observa-se a existência de duas regiões com comportamento distinto para o tempo de transferência.

O IED 2 para o intervalo entre 0% e 15% de ocupação de banda, região I, apresentou um tempo de transferência igual a 4,50 ms, porém, para o intervalo entre 15 e 95% de ocupação de banda, região II, o tempo de transferência aumenta em média para 88,98 ms, conforme a Figura 5.35(a). Já para o IED 3, entre 0% e 5% de ocupação de banda, região I, o tempo de transferência médio é igual a 36,25 ms, porém entre 5% e 95% de ocupação de banda, região II, não há dados registrados para o tempo de transferência devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3, conforme a Figura 5.35(b).

A Figura 5.36 apresenta os valores máximo, mínimo e desvio padrão para o tempo de transferência dos IEDs 2 e 3 obtidos durante o ensaio no perfil 7. Como as métricas anteriores, também se nota a existência de duas regiões para os valores de máximo, mínimo e desvio padrão.

Para o IED 2, entre 0% e 15% de ocupação de banda apresenta valores médios de 5,86, 3,26 e 0,76 ms para os valores máximos, mínimos e desvio padrão, respectivamente. Os valores médios de máximo, mínimo e desvio padrão para a região II, intervalo entre 15% e 95%, aumentam para 468,71, 3,71 e 133,48 ms respectivamente, conforme a Figura 5.36(a). A região I da Figura 5.36(b) apresenta os valores médios de 85,80, 11,15 e 17,32 ms para o máximo, mínimo e desvio padrão respectivamente. Para a região II não há dados registrados, devido a perda de comunicação entre o IED 1 e IED 3.

(a) Perdas IED2.

(b) Perdas IED3.

Figura 5.34: Perdas para o perfil 7.

(a) Tempo de Transferência IED2.

(b) Tempo de Transferência IED3.

Figura 5.35: Tempo de transferência para o perfil 7.

(a) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED2.

(b) Máximo, Mínimo e Desvio padrão IED3.

Figura 5.36: Valores máximos, mínimos e desvio padrão para o tempo de transferência do perfil 7.

5.4 Comentários Finais

A metodologia apresentada neste capítulo, utilizou dispositivos comerciais comumente encontrados em SEs contemporâneas para gerar as mensagens GOOSE e estabelecer a rede de comunicação de dados, a qual é uma vantagem pois, não foi necessário desenvolver um dispositivo de ensaio dedicado para realizar este estudo. A definição das métricas para análise do tempo de transferência fornecem dados, obtidos através de ensaios experimentais, que podem ser utilizados para especificação e análise de desempenho de IEDs aplicados ao projeto de uma SE de forma generalista.

A ocupação de banda é obtida com o uso de uma ferramenta especialista para essa tarefa, conforme apontado neste capítulo. O tratamento dos dados de ensaio é feito a partir de um algoritmo desenvolvido, o qual pode ser facilmente implementado em qualquer linguagem de programação. Por fim, os resultados são apresentados em forma gráfica, sendo possível analisar e comparar o desempenho de cada IED ensaiado. Esta metodologia pode ser utilizada no Programa de Inspeção e Ensaio (PIT)¹ dos IEDs.

As variações observadas nos resultados descritos podem ser explicadas devido ao acúmulo de atrasos de processamento, transmissão e de formação de filas nos dispositivos de rede (atraso fim-a-fim). A razão deste são os atrasos aleatórios de fila no *switch Ethernet*. Por causa desses atrasos variáveis dentro da rede, o tempo decorrido entre o momento em que uma mensagem é publicada pelo IED 1 e o momento em que é recebida pelos IEDs 2 e 3 pode variar de mensagem para mensagem (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007).

As Tabelas 5.7 e 5.9 apresentam de forma consolidada os resultados referentes a todos os perfis avaliados para os IEDs 2 e 3. Estas contêm as perdas de mensagens, o tempo de transferência médio, os valores máximos e mínimos e o desvio padrão de cada perfil estudado. Ao analisá-las, constata-se que a configuração de pesos para o tipo de técnica de formação de fila utilizada, WFQ, influencia nos valores do tempo de transferência e perda de mensagens GOOSE.

Para os dados do IED 2, Tabela 5.7, nota-se que para a região I, o perfil P1 apresenta quatro das cinco métricas utilizadas para avaliação com os menores valores registrados. Enquanto que para a região II o perfil P3 apresenta três das cinco métricas caracterizadas com os menores valores registrados.

Os dados do IED 3, Tabela 5.9, mostram que para a região I os perfis P3 e P7 apresentam

¹Trata-se de um conjunto de ensaios realizados em um IED antes deste ser colocado em operação.

Tabela 5.7: Comparação entre os resultados de cada perfil caracterizado para o IED 2.

		$\overline{TT}$ (ms) ¹	s (ms) ²	Max (ms) ³	Min (ms) ⁴	Perda (%)
Região I	P0	4,46	0,74	6,03	3,20	Zero
	P1	4,36	0,69	5,96	2,86	Zero
	P2	4,46	0,75	5,90	3,46	Zero
	P3	4,56	0,76	6,50	3,10	Zero
	P4	4,43	0,77	6,10	3,16	Zero
	P5	5,26	5,44	8,53	3,03	Zero
	P6	4,46	0,81	6,10	3,20	Zero
	P7	4,50	0,76	5,86	3,26	Zero
Região II	P0	129	211,29	729,31	3,71	45,73
	P1	88,72	150,44	539,60	4,17	48,57
	P2	94,51	152,21	531,11	3,86	48,57
	P3	78,21	105,36	289,90	3,97	49,71
	P4	103,01	151,82	478,66	3,97	46,59
	P5	109,77	165,64	595,20	4,18	48,57
	P6	106,38	203,71	827,73	4,26	48,57
	P7	88,98	133,48	468,71	3,71	52,92

¹ $\overline{TT}$ =Tempo de transferência médio; ² s= Desvio padrão para $\overline{TT}$;

³ Max.=Valor máximo para o tempo de transferência;

⁴ Min.=Valor mínimo para o tempo de transferência.

Tabela 5.9: Comparação entre os resultados de cada perfil caracterizado para o IED 3.

		$\overline{TT}$ (ms) ¹	s (ms) ²	Max (ms) ³	Min (ms) ⁴	Perda (%)
Região I	P0	741,9	504,82	2004,8	3,15	Zero
	P1	502,15	451,68	1362,1	3,15	Zero
	P2	451,65	406,27	1572,55	3,04	Zero
	P3	30,65	21,88	103,35	5,25	Zero
	P4	861,25	560,11	2281,75	2,35	Zero
	P5	435,60	418,21	1501,35	3,15	Zero
	P6	131,8	905,36	1137,70	3,15	Zero
	P7	36,25	17,32	85,80	11,15	Zero
Região II	P0			—		100
	P1			—		100
	P2			—		100
	P3			—		100
	P4			—		100
	P5			—		100
	P6			—		100
	P7			—		100

¹ $\overline{TT}$ =Tempo de transferência médio; ² s= Desvio padrão para $\overline{TT}$;

³ Max.=Valor máximo para o tempo de transferência;

⁴ Min.=Valor mínimo para o tempo de transferência.

duas das quatro métricas utilizadas com os menores valores registrados, contudo para a região II devido a perda de comunicação entre os IEDs 2 e 3 não há dados para serem analisados.

A constatação das regiões mencionadas é um dado relevante para a especificação dos IEDs, pois, o limiar entre as regiões I e II pode ser traduzido em um parâmetro de dimensionamento e avaliação para dispositivos distintos, sendo o de melhor desempenho o que possuir a maior região de operação desejável, ou seja, aquele capaz de manter o tempo de transferência abaixo da referência determinada, para um maior valor percentual de ocupação de sua banda nominal. Para o IED 2 foi obtido um limiar de 15% , enquanto que para o IED 3 um de 5%.

Outro dado relevante são os tempos de máximo e mínimo obtidos pois, a partir desses é possível coordenar o SP de forma apropriada. Uma vez detectada em qual região de operação o IED está, caso seja necessário, um novo grupo de ajustes pode ser ativado, mantendo o SP seletivo. Dessa forma, o parâmetro obtido pode ser usado em conjunto com o SNMP para compor um sistema de monitoramento da operação do IED no que diz respeito ao desempenho das mensagens GOOSE.

Quanto aos resultados referentes as perdas, vê-se que mesmo com o mecanismo de repetição das mensagens GOOSE, nem todas a partir do limiar característico de cada IED são entregues. Isso representa um comprometimento na confiabilidade do SP.

Capítulo 6

Sistema Preditivo de Monitoramento de Banda

Neste capítulo será descrito o desenvolvimento do sistema preditivo de monitoramento de banda para redes de IEDs a partir do parâmetro de dimensionamento obtido no Capítulo 5, bem como os resultados relativos a sua utilização.

6.1 Introdução

Conforme as discussões feitas nos capítulos anteriores, para o novo modelo do SEP, a rede de comunicação de dados representa um elemento relevante para o bom desempenho do SP (Farhangi, 2010). Contudo, seu funcionamento pode ser comprometido devido a anomalias, como, por exemplo, defeitos em *softwares*, uso abusivo de recursos da rede, falhas em equipamentos, erros em configurações e ataques (Zarpelão, 2010).

Dessa forma, para que a rede de comunicação de dados opere de forma estável, com bom desempenho e que satisfaça aos requisitos de qualidade estabelecidos por seus usuários, é necessário estabelecer um sistema de gerenciamento de redes (Kurose e Ross, 2009; Forouzan, 2007).

Neste trabalho é proposto um sistema preditivo de monitoramento de ocupação de banda baseado na utilização do SNMP e em RNAs para monitorar de forma permanente a interface de rede de IEDs utilizados em um SAS, de modo a minorar a influência de uma anomalia na rede de comunicação do SAS sobre a operação daqueles equipamentos. Este sistema fará uso do parâmetro de dimensionamento obtido no Capítulo 5.

A partir desse monitoramento preditivo serão obtidos para o SP maior confiabilidade e desempenho pois, qualquer alteração na ocupação da banda dos IEDs será observada fornecendo subsídios para um melhor acompanhamento do funcionamento da rede de comunicação de dados sobre a qual ele foi estabelecido.

6.2 *Simple Network Management Protocol*

O SNMP, definido pela RFC 1157, é um protocolo executado na camada de aplicação do modelo OSI, sobre tecnologia TCP/IP, a partir do qual variáveis de rede podem ser obtidas e modificadas, tornando possível realizar operações de monitoramento e manutenção em uma rede (Forouzan, 2007; Case *et al.*, 1990, 1989). Ele é largamente utilizado por fabricantes de *hardware* e *software*, tornando-se uma solução comum para a gerência de redes (Case *et al.*, 1990).

Esse protocolo utiliza o conceito de gerente e agente, no qual o gerente controla e monitora os agentes. O gerente é responsável por inquirir o agente e recuperar as informações que esse tem disponível para uso (Jiangyi e Yan, 2009).

O protocolo SNMP possui três versões, SNMPv1, SNMPv2 e SNMPv3 que coexistem, sendo que a diferença básica entre elas reside em implementações de segurança e aprimoramento de funções. Independentemente da versão, os componentes básicos do SNMP são o sistema de gerenciamento de rede, o agente, e a base de gerenciamento de informações (MIB) (Chavan *et al.*, 2008). O primeiro é responsável por prover a interface entre o gestor da rede o sistema de gestão, o segundo por fornecer as informações de interesse ao gestor e o último por conter e formatar as informações a serem enviadas.

A comunicação entre o sistema de gerenciamento de rede e o agente é realizada pelo protocolo da camada de transporte UDP através das portas 161 e 162.

O SNMP suporta uma variada gama de utilizações, tais como os gerenciamentos de falha, configuração, segurança e contabilização (Case *et al.*, 1989).

6.3 Séries Temporais

Um sistema variante no tempo, em geral, é estocástico e não-linear, não havendo, portanto, um modelo matemático que descreve seu comportamento. Dessa forma, séries temporais podem ser utilizadas para representar eventos que são dependentes do tempo (da Silva Soares, 2008).

Uma série temporal consiste em um conjunto de medidas, tomadas de forma discreta e equidistante ao longo do tempo, que descrevem o comportamento dinâmico e variante no tempo de um sistema qualquer, como por exemplo, o tráfego em uma rede de comunicação de dados, o valor de títulos financeiros ou o valor de demanda em um alimentador (da Silva *et al.*, 2010).

Uma série temporal pode ser descrita conforme apresentado em (6.1) (Morettin e de Castro Toloi, 2006):

$$X = \{X(t), t \in T\}, \quad (6.1)$$

em que T é um conjunto enumerável.

Associada à série temporal existem dois parâmetros de interesse: o horizonte de previsão, que representa um valor futuro da série, por exemplo $t + h$, dadas t -n observações prévias, e a janela de previsão, que representa a quantidade de elementos prévios utilizados no processo de previsão (Silva *et al.*, 2007).

Dessa forma, a utilização de um modelo não-linear, como uma RNA, é adequado para a tarefa de predição de uma série temporal, devido a sua capacidade de aprendizado a partir de exemplos e generalização, tornando-se capaz de fornecer uma resposta coerente a partir de qualquer sinal de entrada fornecido (da Silva *et al.*, 2010; da Silva Soares, 2008; Mandic e Chambers, 2001).

A predição dos valores futuros de uma série temporal pode ser feita por meio de seus valores passados, como pode ser visto em (6.2) (da Silva *et al.*, 2010):

$$x(t) = f(x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_p)) \quad (6.2)$$

para a qual n_p representa a quantidade de elementos passados necessários para realizar a predição do próximo valor de $x(t)$.

Baseada nessa premissa, uma rede *Perceptron* de Múltiplas Camadas (PMC) do tipo *Time Delay Neural Network* (TDNN) concentrada é uma arquitetura pertinente para resolver esse tipo de problema (da Silva *et al.*, 2010; Haykin, 2001).

6.4 Redes Neurais Artificiais

As RNAs, segundo Haykin (2001), representam um conjunto de processamento distribuído e paralelo constituído por unidades singelas de processamento, as quais possuem a característica intrínseca de armazenar conhecimento a partir de experiências e torná-lo disponível para uso. Essa estrutura se assemelha ao cérebro pois, o conhecimento é adquirido pela rede a partir do ambiente, através de um processo de aprendizado, sendo armazenado através de interconexões chamadas de pesos sinápticos.

O modelo matemático do neurônio artificial foi baseado no funcionamento do neurônio biológico, tal qual era conhecido a época, apresentando funções e arquitetura cognitiva parecidas (Rao, 1995; Mcculloch e Pitts, 1943). O modelo apresentado por Mcculloch e Pitts (1943) continua sendo o mais utilizado em diferentes arquiteturas de RNAs (da Silva *et al.*, 2010). A Figura 6.1 ilustra o neurônio artificial.

Figura 6.1: Representação para o neurônio artificial.

para a qual: $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ são as entradas da rede; $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ são os pesos associados às entradas e (y) é a saída da rede. Esta modelagem representa um discriminador linear, o qual é definido pela seguinte expressão (Dillon e Niebur, 1996; Kovács, 1996):

$$y = g \left(\sum_{k=1}^n w_k x_k - \theta \right) = g(\mu) \quad (6.3)$$

para a qual k é o número da entrada, w_k é o peso sináptico associado a k , θ é o limiar de ativação, x_k é a entrada e $g(\cdot)$ é a função de ativação do neurônio. Essa função pode ser considerada como a função de transferência do neurônio (Dillon e Niebur, 1996), na qual o conjunto de entradas é transformado em um estado de ativação.

O funcionamento do neurônio artificial pode ser resumido da seguinte forma:

1. As variáveis do processo são apresentados às entradas da rede;
2. Em seguida essas são multiplicados pelo peso correspondente, esse produto indica a sua influência na saída da unidade;
3. Faz-se a soma ponderada de todos os sinais de entrada para produzir um nível de ativação;
4. Se este nível exceder o limiar definido, a unidade produz uma saída.

A Figura 6.2 ilustra as funções de ativação mais utilizadas (Haykin, 2001), lembrando que para cada tipo de problema há uma função de ativação mais indicada (da Silva *et al.*, 2010).

Figura 6.2: Funções de ativação.

Segundo da Silva *et al.* (2010) as principais características das RNAs são:

- Adaptação por experiência - os parâmetros internos da rede são ajustados a partir da apresentação sucessiva de exemplos vindos do ambiente na qual ela será aplicada, o que possibilita extrair o conhecimento de tal processo;
- Capacidade de aprendizado - através de um método de treinamento o conhecimento necessário ao entendimento de uma aplicação é obtido pela RNA;
- Habilidade de generalização - concluída a etapa de treinamento, a rede é capaz de fornecer novas soluções a partir da generalização do conhecimento adquirido na fase de treinamento;
- Organização de dados - a partir de um conjunto de dados que representa um processo qualquer, a rede é capaz de se organizar de forma a agrupar padrões que representem alguma particularidade dos dados de entrada;
- Tolerância a falhas - por ser formada por um grande conjunto de unidades discretas de processamento (neurônios) e estes possuírem várias conexões com outras unidades, se houver uma falha em qualquer porção da rede esta continua operando;

- Armazenamento distribuído - o conhecimento sobre um processo qualquer é distribuído por toda a arquitetura da rede devido ao grande número de interconexões entre unidades de processamento existentes;
- Facilidade de prototipagem - findo o processo de treinamento, e para a maioria das arquiteturas de RNAs, os resultados da rede são normalmente obtidos através de operações matemáticas elementares, o que facilita sua implementação tanto em *hardware* quanto em *software*.

Por serem capazes de mapear os sistemas não-lineares, as RNAs são utilizadas em várias áreas do conhecimento para a resolução de diversos problemas, como por exemplo, na área médica para prever e classificar cânceres a partir do perfil genético do paciente, na química para obtenção de novos compostos poliméricos, na biologia para identificação e classificação de espécies animais, na área de finanças, para a predição de valores de ações (da Silva *et al.*, 2010).

Em relação às engenharias e ciências, conforme apontado por da Silva *et al.* (2010), as RNAs podem ser utilizadas como um aproximador universal de funções, no controle de processos, reconhecimento e classificação de padrões, no agrupamento de dados, em sistemas de previsão, na otimização de sistemas e em memórias associativas.

Para o SEP as RNAs podem ser utilizadas, por exemplo, para a estimação de grandezas elétricas, como a frequência, no despacho de potência, na identificação e localização de faltas, na classificação de transitórios referentes à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e previsão de cargas em diversos horizontes de planejamento, dentre outros (da Silva *et al.*, 2010; Coury *et al.*, 2007).

6.4.1 Arquitetura e Topologia da RNA

A disposição dos neurônios, uns em relação aos outros, suas conexões sinápticas e a forma pela qual a rede é treinada definem sua arquitetura (da Silva *et al.*, 2010; Haykin, 2001). Já a topologia da rede representa, para uma determinada arquitetura, as diferentes formas de composição dessa, ou seja, seu número de camadas, de neurônios, tipo de função de ativação, etc. (da Silva *et al.*, 2010).

Basicamente, a arquitetura de uma RNA é composta pela camada de entrada, responsável pelo recebimento das informações advindas do processo, camadas escondidas, compostas pelos neurônios e responsáveis por extrair o conhecimento do processo em estudo e, por fim, a camada

de saída, também composta por neurônios e responsável por apresentar o resultado final da rede, conforme a Figura 6.3 (da Silva *et al.*, 2010; Rao, 1995).

Figura 6.3: Rede neural artificial.

Fonte: Rao (1995)

Conforme apontado por da Silva *et al.* (2010); Haykin (2001), são:

- Redes *feedforward* de camada simples - existe apenas uma camada de entrada e uma camada neural de saída. O fluxo da informação é unidirecional à saída, sendo as redes *Perceptron* e *Adaline* exemplos desta arquitetura;
- Redes *feedforward* de múltiplas camadas - a principal diferença desta arquitetura para a anterior reside no fato de que esta possui uma ou mais camadas escondidas de neurônios. As arquiteturas PMC e Radial Basis Function (RBF) são exemplos desse tipo de rede;
- Redes recorrentes - Neste tipo de arquitetura a saída dos neurônios de uma camada são utilizadas como entrada pelos neurônios de outra camada. A PMC e a rede de Hopfield são exemplos dessa arquitetura;
- Redes reticuladas - São arquiteturas nas quais a disposição espacial dos neurônios está relacionada ao processo de ajuste de seus pesos e limiares. A rede de Kohonen é um exemplo deste tipo de arquitetura.

6.4.2 Processo de Treinamento

Segundo Haykin (2001), “*Treinamento ou aprendizagem é o processo pelo qual os parâmetros livres da rede neural são adaptados através de um processo contínuo de estímulo pelo ambiente*”

no qual a rede está envolvida. O tipo de aprendizagem é determinado pela maneira em que a alteração dos parâmetros é realizada”.

O processo de aprendizagem é realizado por um conjunto de passos ordenados comumente chamado de algoritmo de treinamento. Ao término desse processo a RNA será capaz de extrair conhecimento a partir do conjunto de informações fornecidas que representam o processo ao qual essa será aplicada. Em geral, esse conjunto de informações é subdividido em conjunto de treinamento e teste, sendo o primeiro aplicado no processo de aprendizado da rede, enquanto o segundo serve para verificar a generalização da rede e dessa forma validar a topologia estudada (da Silva *et al.*, 2010).

Em geral, são utilizadas duas abordagens para definir como será efetuado o ajuste das variáveis livres da rede (Dillon e Niebur, 1996):

- a. Treinamento baseado nas semelhanças dos padrões de entrada; e
- b. Treinamento que minimiza o erro entre os valores desejados e os obtidos atualmente pela rede.

A apresentação completa do conjunto de treinamento, utilizada no processo de ajuste dos pesos sinápticos e limiares da RNA é conhecida como época de treinamento (da Silva *et al.*, 2010).

Basicamente existem dois tipos de processos de aprendizagem (da Silva *et al.*, 2010):

- Treinamento supervisionado - Consiste na utilização de um conjunto de treinamento formado por vários pares de amostras, para cada variável utilizada, do tipo entrada/saída desejada para, continuamente, ajustar as variáveis livres da rede. A rede será considerada ajustada, quando a defasagem entre a saída produzida e a saída desejada estiver dentro de um valor especificado, o qual é monitorado pelo algoritmo de treinamento. A regra proposta por Hebb (1949) representa a primeira estratégia para este tipo de treinamento;
- Treinamento não-supervisionado - Em oposição ao tipo supervisionado, nesta forma de treinamento não existem nos padrões utilizados os pares entrada/saída desejada. Dessa maneira, a rede deve se auto-organizar criando agrupamentos de dados que contenham similaridades, sendo o processo de treinamento encerrado quando o algoritmo correspondente consegue ajustar as variáveis livres da rede de forma a refletir tais agrupamentos.

6.4.3 Rede PMC com entradas atrasadas no Tempo

Problemas dinâmicos e variantes no tempo, como a predição de um valor futuro de demanda, por exemplo, podem ser resolvidos pelo uso de uma rede PMC com entradas atrasadas no tempo (TDNN) (da Silva *et al.*, 2010).

Uma rede com arquitetura TDNN introduz um atraso de tempo apenas na sua camada de entrada. Tal atraso funciona como uma memória do comportamento no tempo do processo mapeado. A Figura 6.4 ilustra essa arquitetura da Silva *et al.* (2010); Haykin (2001).

Figura 6.4: Topologia para a TDNN.

Fonte: da Silva *et al.* (2010)

para a qual: np representa a ordem do preditor, $x(t) = f(x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_p))$ são as entradas passadas apresentadas a rede que representam o processo em estudo e $x(t)$ é o próximo valor a ser predito, fornecido pela saída $y(t)$. De modo que durante a fase de treinamento o ajuste das variáveis livres da rede tem por objetivo minimizar o erro entre $x(t)$ e $y(t)$. O treinamento da TDNN é similar ao da PMC.

6.5 Sistema Preditivo Desenvolvido

O sistema de monitoramento preditivo de ocupação de banda foi desenvolvido com o uso das bibliotecas NET-SNMP, versão 5.7, e *Fast Artificial Neural Network* (FANN), versão 2.2.0, através da linguagem de programação C (Nissen, 2012; Hardaker, 2012).

Esse sistema fornece uma abordagem proativa para a gestão de desempenho e falha na rede de

comunicação utilizada, com o objetivo de indicar qualquer irregularidade iminente relativa a ocupação de banda dos IED. Dessa forma é possível tomar ações corretivas, com certa antecedência, visando a manter o bom desempenho dos IEDs em rede.

Sua execução foi realizada através de uma plataforma de *hardware* do tipo PC compatível em conjunto com o sistema operacional Ubuntu 11.10 com *Kernel* linux 3.0.4 de 32 bits. O PC utilizado possui um processador Intel[®] Core[™] 2 Quad Q9450 com velocidade de *clock* de 2,66GHz, placa de rede Intel[®] 82566DC-2 Gigabit, 4GB de memória RAM DDR3 de 1333MHz e 500GB para armazenamento. A Figura 6.5 apresenta o fluxograma básico para o sistema proposto.

De forma resumida, cada elemento que o constitui realiza as seguintes tarefas:

- **Parâmetro de Dimensionamento:** A partir do parâmetro de dimensionamento obtido neste trabalho é possível aplicá-lo como elemento indicador para monitorar o desempenho das mensagens GOOSE;
- **Tráfego Medido:** Pelo uso do SNMP é possível obter o tráfego instantâneo de cada IEDs e armazená-lo sob a forma de uma série temporal para posterior utilização;
- **Cálculo Ocupação Banda:** A partir da medição de tráfego realizada é possível calcular a ocupação da largura de banda do IED e armazená-la em forma de uma série temporal;
- **Previsão Ocupação Banda:** Será projetada uma RNA que recebe como entrada a série temporal referente a ocupação de banda do IED para prever o próximo valor da ocupação
- **Determinação Região Operação:** Através da comparação entre o valor futuro da banda do IED e o parâmetro de dimensionamento é determinada em qual região de operação o mesmo se encontra;
- **Diagnóstico:** Se o valor da banda for menor que o limiar então a operação ocorre na região I, caso contrário na região II, e uma possível anormalidade deve ser reportada e investigada pela operação da SE. Os valores de ocupação referente a última ocorrência serão armazenados para análise posterior.

6.5.1 Medição de Tráfego e Cálculo da Banda Utilizada

Através do protocolo SNMPv1 foram medidas, em intervalos de 1s, as MIBs IfInOctets e IfOutOctes, para determinar todos os octetos que entram e saem de uma interface, respecti-

Figura 6.5: Concepção para o sistema preditivo de Banda.

vamente. Também foi utilizada a MIB IfSpeed para determinar o valor da banda nominal da interface a ser monitorada (McCloghrie e Rose, 1991).

Essas medições foram obtidas através do *Switch Ethernet* utilizado na montagem laboratorial, pois os IEDs, em sua maioria, não possuem o protocolo SNMP implementado.

A partir desses valores foi calculada a ocupação percentual de banda para cada interface monitorada. O cálculo, para uma interface operando em modo *full-duplex* pode ser realizado com os dados que entram ou saem de cada interface, de acordo com as Equações 6.4 e 6.5 (Mauro e Schmidt, 2005).

$$B_{E\%} = \frac{\Delta_{ifInOctets} \times 8 \times 100}{\Delta_t \times ifSpeed} \quad (6.4)$$

$$B_{S\%} = \frac{\Delta_{ifOutOctets} \times 8 \times 100}{\Delta_t \times ifSpeed} \quad (6.5)$$

Para as quais: $B_{E\%}$ = Ocupação percentual da banda calculada com os dados que entram na interface; $B_{S\%}$ = Ocupação percentual da banda calculada com os dados que saem da interface; Δ_t = Intervalo de tempo no qual a MIB utilizada é medida; $\Delta_{ifInOctets}$ = Diferença entre dois valores consecutivos para a MIB utilizada contidos no intervalo de tempo Δ_t ; $\Delta_{ifOutOctets}$ = Diferença entre dois valores consecutivos para a MIB utilizada contidos no intervalo de tempo Δ_t ; $ifSpeed$ = Valor nominal de banda para a interface monitorada.

Esses valores compõe uma série temporal, a qual foi janelada, e então apresentada como grandeza de entrada para a RNA que fez a predição da ocupação percentual de banda.

O tamanho da janela escolhida é igual a cinco amostras com passo fixo de deslocamento de uma amostra. A Figura 6.6 ilustra o janelamento realizado.

6.5.2 Predição da Ocupação de Banda

Nesta seção será descrito o projeto da RNA a ser utilizada para prever o próximo valor de ocupação percentual de banda a partir dos dados obtidos segundo a Item 6.5.1.

A predição da ocupação percentual de banda foi realizada através de uma RNA com a arquitetura TDNN do tipo concentrada, com ordem de predição igual a 5 (Haykin, 2001). Essa arquitetura foi escolhida devido a sua simplicidade computacional.

Figura 6.6: Janelamento da série temporal para apresentação à RNA.

A predição obtida é de um passo à frente, ou seja, o valor da ocupação percentual de banda para o próximo instante de tempo medido será obtida. No caso desta pesquisa será fornecido o valor de banda referente ao próximo segundo.

Os padrões de treinamento e teste para a RNA foram obtidos a partir da montagem em laboratório do aparato apresentado na Figura 6.7. Esta montagem foi utilizada também para testar o funcionamento do sistema proposto. A Tabela 5.2 resume as principais características da montagem laboratorial desenvolvida. Neste esquema, foram medidos 19 patamares ($N=19$) de carregamento da rede com as características definidas na seção 5.2, então formatados segundo a Figura 6.8 e o Algoritmo 6.1.

Para a finalidade de análise de tráfego, a topologia em estrela é a melhor representação pois, os IEDs estão interconectados através de um único enlace de rede.

Foram utilizados 1754 (40%) padrões para treinamento e 2610 (60%) padrões para teste da RNA, os quais contém valores de ocupação de banda entre 5 e 95% do valor nominal da interface monitorada. Os dados de entrada foram normalizados segundo o teorema de Tales, o qual pode ser observado na Equação 6.6 (da Silva *et al.*, 2010).

$$z = \frac{x - x^{min}}{x^{max} - x^{min}} \quad (6.6)$$

Para a qual: z = valor convertido para o domínio proporcional 0 e 1; x = Valor a ser convertido;

Figura 6.7: Esquema laboratorial utilizado.

x^{min} =Menor valor x ; x^{max} =Maior valor da x .

A formação dos conjuntos de treinamento e teste representa uma etapa importante no projeto de uma RNA pois, a partir da reunião de informações representativas das situações prováveis pelas quais as variáveis necessárias a modelagem do problema podem ser submetidas, a rede será capaz de extrair o conhecimento necessário desse conjunto a generalizar as soluções, fornecendo respostas adequadas para cada novo padrão apresentado (da Silva *et al.*, 2010).

A Figura 6.8 e o Algoritmo 6.1 apresentam a forma pela qual foram formatados os arquivos de treinamento e teste. Para cada patamar de tráfego medido, inicialmente, é verificado se os dados obtidos estão dentro de uma faixa de valores representativos. Essa ação é necessária para retirada de valores espúrios dos futuros conjuntos de treinamento e teste. Em seguida as amostras são normalizadas, através do teorema de Tales, e os valores máximos e mínimos de cada patamar de banda medido são determinados. A partir disso, é utilizado o algoritmo 6.1 para separar o conjunto de treinamento, contendo uma janela de dados com os valores máximos e mínimos de cada patamar medido do conjunto de teste correspondente. Esse algoritmo ainda trata algumas relativas a formação dos conjuntos de treinamento, conforme a Figura 6.9.

Para a Figura 6.8: N = Número de patamares de ocupação de banda utilizados no processo de treinamento e teste; K_{min} = Posição da menor amostra relativa ao vetor de Amostras $_K$; K_{max} = Posição da maior amostra relativa ao vetor de Amostras $_K$; K =Posição da amostra relativa ao vetor de Amostras $_K$; L = Tamanho do vetor de Amostras $_K$; P = Valor nominal do patamar de ocupação N ; Amostras $_K$ = Valor da amostra na posição K relativa ao vetor de amostras do

Figura 6.8: Formação dos conjuntos de treinamento e teste para a RNA.

patamar N.

Algoritmo 6.1: Montagem Conjuntos Treinamento/Teste.

Início

Dados: Vetor de Amostras_K com Tamanho L para o patamar N;

se $K_{max} < K_{min}$ **então** // 1

$K_{temp} = K_{max}$;

$K_{max} = K_{min}$;

$K_{min} = K_{temp}$;

fim

enquanto $K_{min} < 0,4 \times L/4$ **faça** // 2

$K_{min} = K_{min} + 1$;

fim

enquanto $K_{max} + 0,4 \times L/4 > L$ **faça** // 3

$K_{max} = K_{max} - 1$;

fim

enquanto $K_{max} - 0,4 \times L/4 < K_{min} + 0,4 \times L/4$ **faça** // 4

se $K_{min} - 0,4 \times L/4 < L - (K_{max} + 0,4 \times L/4)$ **então** // 5

$K_{max} = K_{max} + 1$;

senão

$K_{min} = K_{min} - 1$;

fim

fim

Resultado: Conjunto de Treinamento = $\{[K_{min} - 0,4 \times L/4$;
 $K_{min} + 0,4 \times L/4] + [K_{max} - 0,4 \times L/4 ; K_{max} + 0,4 \times L/4] \}$;

Resultado: Conjunto de Teste = $\{[1 ; K_{min} - 0,4 \times L/4] + [K_{min} + 0,4 \times L/4 ; K_{max} -$
 $0,4 \times L/4] + [K_{max} + 0,4 \times L/4 ; L]\}$;

Fim

Para o Algoritmo 6.1, tem-se:

1. Se $K_{max} < K_{min}$, troca-se seus valores. Para as etapas abaixo, não importa qual deles realmente é o índice da maior ou da menor amostra, apenas se deseja que ambas estejam presentes no conjunto de treinamento. Nesse caso, para não ter que executar duas vezes cada instrução (uma para $K_{min} < K_{max}$ e outra para $K_{min} \geq K_{max}$), é forçado que $K_{min} < K_{max}$, usando uma variável temporária K_{temp} para armazenar K_{max} enquanto efetuamos a troca;
2. Se a faixa dos valores em torno de K_{min} excede a primeira posição;
3. Se a faixa dos valores em torno de K_{max} excede a última posição;
4. Se as faixas de K_{min} e K_{max} se sobrepõem;
5. Se K_{min} está mais próximo de 1 do que K_{max} de L.

Na Figura 6.9, tem-se uma representação visual dos procedimentos realizados pelo Algoritmo 6.1. Os retângulos representam os vetores que armazenam o conjunto de todas as amostras. A barra vertical à esquerda representa a posição do vetor indexada por K_{min} , e a barra vertical à direita representa a posição indexada por K_{max} .

1. A faixa de amostras ao redor de K_{min} excede os limites inferiores do vetor, sendo necessário aumentar K_{min} até que toda sua faixa de amostras esteja compreendida numa área válida do vetor.
2. A faixa de amostras ao redor de K_{max} excede os limites superiores do vetor, sendo necessário diminuir K_{max} até que toda sua faixa de amostras esteja compreendida numa área válida do vetor.
3. As duas faixas de amostras se sobrepõem. Como a distância de K_{max} a L é maior que a distância de K_{min} a 1, aumentamos K_{max} até que não haja mais sobreposição.
4. As duas faixas de amostras se sobrepõem. Como a distância de K_{min} a 1 é maior que a distância de K_{max} a L , diminuimos K_{min} até que não haja mais sobreposição.
5. Representação do que seria uma configuração válida do vetor de amostras para gerar o vetor de treinamento e o de teste.

Os dados de treinamento foram aplicados ao algoritmo de treinamento *Resilient-Propagation* (Rprop), com *Momentum* (α) igual a 0,3, taxa de aprendizagem (η) igual a 0,02 e função de ativação sigmóide ($\beta = 0,5$) para todas as camadas neurais Riedmiller (1994).

A topologia obtida possui cinco entradas na primeira camada, 10 neurônios na primeira camada escondida, 15 neurônios na segunda camada escondida e 1 neurônio na camada de saída, conforme a Figura 6.10.

6.5.3 Registro de Ocorrência

O valor da ocupação percentual de banda previsto pela RNA é comparado com um limiar previamente ajustado pelo usuário. Quando o valor de banda for superior ao limiar definido, então, um registro de ocorrência é gerado para posterior análise, conforme a Figura 6.11.

Figura 6.9: Representação para a separação dos valores que compõe os conjuntos de treinamento/teste.

Figura 6.10: Topologia para a RNA utilizada.


```

*****
                          Relatório Ocorrência Rede IEDs
*****
Data: 01/01/2012
Horário: 13:20:05
Interface Monitorada: IED1 - IP:192.168.0.31 - Porta: A1
*****
Horário (HH:MM:SS)          MIB                                Valor Banda (%)
-----
13:19:57                    IfOutOctets              65,23
13:19:58                    IfOutOctets              65,47
13:19:59                    IfOutOctets              66,60
13:20:00                    IfOutOctets              66,53
13:20:01                    IfOutOctets              65,79
13:20:02                    IfOutOctets              66,43
13:20:03                    IfOutOctets              68,17
13:20:04                    IfOutOctets              67,08
13:20:05                    IfOutOctets              67,21
13:20:06                    IfOutOctets              66,23
13:20:07                    IfOutOctets              66,67
.                            .                            .
.                            .                            .
.                            .                            .
-----
                          Fim Ocorrência
*****

```

Figura 6.11: Exemplo de relatório de ocorrência.

6.6 Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a medição e predição de ocupação percentual de banda através do sistema desenvolvido.

6.6.1 Medição e Cálculo do Percentual de Ocupação de Banda

Foi utilizado o aplicativo de *software* *WAN Killer*[®], versão 9.2.0.47, para geração do tráfego utilizado para ocupar a interface do IED monitorado, conforme a Figura 6.7 (Solarwinds, 2009).

Para criar esse tráfego foi utilizado o protocolo da camada de transporte UDP. Cada pacote enviado foi configurado com tamanho igual a 1496 *bytes* e a quantidade de pacotes por segundo gerados foi ajustada para representar o carregamento percentual da velocidade nominal do enlace utilizado, neste caso 100Mbps, de acordo com a Tabela 5.4 (Forouzan, 2007).

O monitoramento da ocupação percentual de banda foi realizado através do *SNMP Real Time Graph*[®], versão 9.2.0.47, e do sistema desenvolvido nesta pesquisa, com o intuito de comparar os resultados obtidos com aqueles provenientes de uma ferramenta comercial (Solarwinds, 2009).

A análise dos resultados da determinação da ocupação percentual de banda, apresentados na 6.1, mostra que o sistema desenvolvido mediu corretamente os valores de banda caracterizados, além disso seu desempenho é tão bom quanto aquele obtido com a ferramenta comercial utilizada,

pois o erro relativo médio da medição é igual a 0,55%.

Tabela 6.1: Comparação da ocupação percentual de banda nominal (BN).

Métrica	5%		15%		25%		35%		45%		55%		65%		75%	
	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.	Des.	Com.
$\bar{x}$	5,12	5,15	15,32	15,36	25,42	25,60	35,42	35,67	45,84	46,07	55,97	56,29	66,73	66,99	76,02	76,60
s	0,029	0,032	0,11	0,13	0,34	0,22	0,45	0,32	0,35	0,53	0,51	0,67	1,18	1,006	0,43	0,70
Min	5,033	5,058	14,90	14,56	22,59	24,54	31,67	34,55	45,045	42,72	53,73	52,10	63,74	64,44	74,72	75,39
Max	5,230	5,24	15,80	15,79	26,19	26,32	36,60	36,74	46,73	47,61	58,22	57,71	69,59	69,96	76,88	78,44

Para a qual: $\bar{x}$ =Valor médio da ocupação percentual de banda; s =Desvio padrão para a ocupação percentual de banda; Min =Menor valor para ocupação de banda; Max =Maior valor para ocupação de banda; Des.=Sistema desenvolvido; Com.=Sistema comercial.

6.6.2 Predição do Percentual de Ocupação de Banda

Nesta seção são discutidos os resultados da predição obtida com a RNA projetada. Esses são divididos em gráficos que comparam o valor desejado da série temporal, para um patamar de carregamento, e aquele obtido com a RNA e o histograma de erro relativo percentual correspondente a cada patamar de predição da rede. As Figuras 6.12 a 6.21 apresentam os resultados da predição realizada pela RNA projetada, para os patamares de 15%, 35%, 55%, 75% e 95% de ocupação da interface do IED monitorado, respectivamente. A Tabela 6.2 resume os resultados referentes a predição de ocupação de banda. Observa-se que a RNA foi capaz, a partir do conjunto de treinamento, de modelar o comportamento da série temporal que representa a ocupação percentual de banda relativa a interface do IED monitorado, pois, a tendência da série que descreve tal ocupação foi adequadamente generalizada.

As Figuras 6.22 e 6.23 apresentam o resultado da predição de banda para todo o conjunto de teste utilizado. Quanto a qualidade da predição, a partir da análise da Figura 6.23, observa-se que 91,30% das amostras da série temporal apresentadas a RNA possuem um erro relativo inferior a 3% enquanto que 8,24% das amostras utilizadas possuem um erro entre 5 e 10% e 0,456% das amostras da série temporal possuem um erro superior a 10%.

Tabela 6.2: Percentual de acerto da predição.

Banda Nominal (BN)=100 Mbps					
Erro (%)	15%BN	35%BN	55%BN	75%BN	95%BN
≤ 3	97,15	96,40	86,70	98,41	97,57
> 3	2,85	3,60	13,30	1,59	2,43

Figura 6.12: Resultado da predição para 15% de ocupação de banda.

Figura 6.13: Histograma para o erro relativo percentual referente a predição de 15% de ocupação de banda.

Figura 6.14: Resultado da predição para 35% de ocupação de banda.

Figura 6.15: Histograma para o erro relativo percentual referente a predição de 35% de ocupação de banda.

Figura 6.16: Resultado da predição para 55% de ocupação de banda.

Figura 6.17: Histograma para o erro relativo percentual referente a predição de 55% de ocupação de banda.

Figura 6.18: Resultado da predição para 75% de ocupação de banda.

Figura 6.19: Histograma para o erro relativo percentual referente a predição de 75% de ocupação de banda.

Figura 6.20: Resultado da predição para 95% de ocupação de banda.

Figura 6.21: Histograma para o erro relativo percentual referente a predição de 95% de ocupação de banda.

Figura 6.22: Resultado da predição para todo o conjunto de teste.

Figura 6.23: Histograma para o erro relativo percentual da predição de banda para todo o conjunto de teste.

6.7 Interface Gráfica

Foi desenvolvida uma interface gráfica para agregar o sistema de predição de banda apresentado, com o objetivo de facilitar a visualização da ocupação de banda, sua predição, inserção do parâmetro de dimensionamento obtido e a análise de ocorrências. Essa interface tem como diretrizes principais assegurar ao usuário facilidade na utilização e boa organização do aplicativo desenvolvido. Para tanto foi utilizado o *framework Qt Creator IDE*, versão 2.4.1, e *Qt libraries*, versão 4.8.1., mediante a linguagem de programação C++ (Frameworks, 2012).

Segundo Barbosa (2010), as principais características do *framework* utilizado são:

- Ser multiplataforma, tornando possível o desenvolvimento de aplicativos para *desktops*, sob os sistemas operacionais Windows, Linux/X11 e Mac OS X, e dispositivos móveis como *smart phones* e *tablets*;
- Possuir um ambiente integrado para projeto, desenvolvimento, depuração, simulação e documentação de aplicações;
- Fornecer suporte a linguagem C++ e *JavaScript*, de forma a aproveitar intrinsecamente as características dessas linguagens;
- Possuir um conjunto completo de classes e métodos prontos para serem utilizados mesmo na programação não gráfica;
- Possuir grande documentação, exemplos e base de usuários.

A seguir será apresentada a interface gráfica desenvolvida, com foco em seus principais elementos de interação com o usuário.

A tela inicial do sistema, apresentada na Figura 6.24, possui os menus Arquivo, Editar, Ajuda, a barra de tarefas principal do sistema desenvolvido e sua área de trabalho. Nesta, é possível iniciar o monitoramento de uma interface, a predição de ocupação de banda, inserir o parâmetro de dimensionamento, verificar a região de operação do IED, iniciar a gravação de dados pelo usuário e encerrar o aplicativo.

A Figura 6.25 apresenta a seleção do agente SNMP a ser monitorado. Nesta tela é inserido o endereço IP do agente e escolhida a MIB utilizada para medição. Nesta versão do sistema de monitoramento apenas as MIBs IfInOctets e IfOutOctets estão disponíveis.

Figura 6.24: Tela inicial para o sistema desenvolvido.

Figura 6.25: Seleção do agente a ser monitorado.

Uma vez escolhido o agente a ser acompanhado e a MIB a ser utilizada, serão listadas todas as interfaces disponíveis para monitoramento, conforme a Figura 6.26. Neste aplicativo é possível observar mais de uma interface ao mesmo tempo.

Figura 6.26: Seleção interface a ser monitorada.

Realizados os passos anteriores é exibida a medição da interface selecionada para um determinado agente, conforme a Figura 6.27. Esta tela contém o título do gráfico, endereço IP do agente, nome da interface monitorada, legenda para a MIB medida, uma barra de estado que apresenta o valor instantâneo da ocupação de banda com sua estampa de tempo correspondente e o gráfico de medição propriamente dito (*Ocupação de banda vs Tempo*). Como mais de uma interface pode ser medida ao mesmo tempo, mais de um gráfico pode ser apresentado simultaneamente.

A predição da ocupação de banda é feita em um gráfico análogo ao da medição, apresentado na Figura 6.27, porém separado daquele, conforme a Figura 6.28.

Após o início do monitoramento de uma interface é possível inserir o parâmetro de dimensionamento obtido, conforme a Figura 6.29, para determinar em qual região de operação o IED se encontra. Tanto os valores medidos quanto aqueles preditos para a ocupação de banda podem ser comparados com o parâmetro de dimensionamento obtido. Além disso, o usuário nomeia um arquivo que fará o registro de ocorrência, conforme mencionado na Item 6.5.3.

As Figura 6.30 e Figura 6.31 apresentam a tela de monitoramento da região de operação do IED. Ela contém a estampa de tempo e o valor de ocupação percentual de banda da interface monitorada, além de sinalizar em qual região o IED está operando. A partir dos dados contidos nesta tela é gerado o relatório de ocorrência.

Figura 6.27: Medição da interface monitorada.

Figura 6.28: Predição para a interface monitorada.

Figura 6.29: Inserção do parâmetro de dimensionamento.

Figura 6.30: Monitoramento da região de operação 1.

Figura 6.31: Monitoramento da região de operação 2.

Por fim, a Figura 6.32 apresenta a funcionalidade de gravação implementada. Uma vez iniciada a medição, é permitido ao usuário gravar dados que sejam de seu interesse, como os valores atuais da ocupação de banda ou os valores futuros obtidos pela predição da RNA. Além disso, o usuário pode escolher um intervalo de amostragem, o qual pode ser diferente do intervalo usado na medição, e o número de amostras que irão compor esse registro.

Figura 6.32: Gravação de dados pelo usuário.

6.8 Comentários Finais

O parâmetro de dimensionamento estudado neste trabalho foi utilizado como elemento discriminante para o desempenho do tempo de transferência de mensagens GOOSE. A partir desse dado foi desenvolvido o sistema preditivo apresentado.

As bibliotecas NET-SNMP, FANN e o *framework Qt Creator IDE* e *Qt libraries* são adequadas para o sistema desenvolvido, devido a sua constante atualização, estabilidade, características e documentação disponíveis. Além disso, essas bibliotecas são gratuitas e executadas no sistema operacional GNU/Linux em uma plataforma de *hardware* do tipo PC, tornando o sistema em questão uma alternativa de baixo custo para o tipo de monitoramento desejado.

A interface com o usuário não requer treinamento extensivo e possui todos os elementos necessários a utilização do sistema preditivo proposto, o que facilita o monitoramento da rede.

Os resultados, tanto da medição quanto da predição foram corretos e apresentaram bom desempenho, pois tanto o erro de medição quanto o erro de predição são baixos, 0,55% e 3% (para 91,30% das amostras), respectivamente. Dessa forma, vê-se que o sistema desenvolvido é adequado a seu propósito.

Capítulo 7

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre os resultados dos ensaios e sobre o sistema preditivo de monitoramento de banda desenvolvido.

7.1 Comentários Finais sobre o Parâmetro de Dimensionamento

Desde que o padrão IEC 61850 começou a ser fornecido comercialmente, incluído em IEDs, o número de SEs que o utilizam, em âmbito mundial, tem aumentado a cada ano devido aos benefícios e possibilidades trazidas consigo. Dessa forma, esta pesquisa se insere em um tema contemporâneo de grande interesse pelos profissionais envolvidos com atividades relativas ao SEP e contribui para a construção do conhecimento sobre aquele padrão de comunicação.

Esta pesquisa apresentou um parâmetro de dimensionamento e avaliação de desempenho para as mensagens GOOSE, obtido através da análise das grandezas de interesse definidas, que são o desvio padrão, o valor máximo, o valor mínimo e a média para o tempo de transferência, além da contabilização do total de mensagens extraviadas. Esse parâmetro representa relevante contribuição para aplicações práticas do padrão IEC 61850.

Os resultados exprimem o comportamento do tempo de transferência sob as condições caracterizadas. Em linhas gerais, observa-se na Seção 5.3 a existência de duas regiões com comportamentos distintos para o tempo de transferência, desvio padrão, valores máximo e mínimo e perda de mensagens, conforme as discussões apresentadas.

A primeira região representa uma área de operação desejável, para a qual não há perda de pacotes, com baixo desvio padrão e sem infração da referência determinada pelo padrão IEC

61850 para o tempo de transferência. A outra representa uma área de operação não desejável, para a qual existe violação da referência estabelecida, perda acentuada de mensagens e alto desvio padrão e valor máximo, implicando em possível degradação do funcionamento do SP, tal como perda de coordenação e seletividade.

A constatação das regiões mencionadas é um dado relevante para a especificação dos IEDs, pois, o limiar entre as regiões I e II pode ser traduzido em um parâmetro de dimensionamento e avaliação para dispositivos distintos, sendo o de melhor desempenho o que possuir a maior região de operação desejável, ou seja, aquele capaz de manter o tempo de transferência abaixo da referência determinada, para um maior valor percentual de ocupação de sua banda nominal. Tal fato fica evidente a partir da comparação dos resultados, para cada métrica utilizada, entre os IEDs ensaiados, sob a ótica deste trabalho se vê que o IED 2 apresenta um desempenho melhor que o IED 3. Mesmo operando na região II, o IED 2 ainda consegue entregar em média 48,65% das mensagens GOOSE, enquanto que o IED 3 perde a comunicação com o IED 1. Essa é uma situação crítica porque um IED operando nessa condição precisa ser retirado de serviço e outro tipo de proteção - alternada ou de retaguarda, ser utilizada pois, se está sem nenhuma função de proteção ativa capaz de enviar um comando de *trip* ao disjuntor.

A comparação mencionada anteriormente é possível, pois, o comportamento observado para o tempo de transferência é encontrado de forma similar em todos os IEDs ensaiados, com variações no limiar entre as regiões I e II.

O estabelecimento do aparato experimental visto no Capítulo 5 representa uma contribuição de interesse para estudos relativos ao padrão IEC 61850 por ser constituído por dispositivos comerciais aplicados a construção de SPs e do SASs, de modo que, quaisquer aproximações e/ou imprecisões encontradas em estudos similares conduzidos em ambiente de simulação computacional aqui não existem, fazendo com que os resultados sejam fidedignos ao que se pode encontrar em uma instalação real.

A metodologia utilizada para a realização das análises apresentadas no Capítulo 5 é de fácil implantação e utilização e pode compor o PIT dos IEDs. Essa metodologia desenvolvida é generalista e representa uma relevante contribuição deste trabalho pois, a partir de seu uso importantes informações de dimensionamento e escolha de IEDs estão disponíveis para utilização em projetos de SP.

Pelos resultados, constata-se que a configuração de pesos para o tipo de técnica de formação de fila utilizada influencia nos valores do tempo de transferência e perda de mensagens GOOSE e

além disso, os valores máximos e mínimos são úteis para auxiliar os projetistas de SP a determinar os ajustes da proteção, em relação a sua coordenação e seletividade.

7.2 Comentários Finais sobre o Sistema Preditivo

Constatado o efeito prejudicial da ocupação da banda nominal dos IEDs sobre o desempenho do SP é possível desenvolver um sistema de monitoramento da operação dos mesmos a partir do parâmetro obtido. Este monitoramento se faz imperativo no alerta a operação da SE a respeito de qualquer irregularidade iminente para conseguinte tomada de ações pertinentes a permanência de desempenho adequado, bem como alto grau de confiabilidade do SP.

Um sistema como o apresentado é relevante pois, de forma automática, permite acompanhar a utilização da banda em uma determinada interface e caso essa ultrapasse um limiar pré-definido a operação da SE é alertada e pode verificar tal ocorrência.

A abordagem proativa, obtida pelo uso da RNA, é um diferencial para o sistema desenvolvido pois, é capaz de indicar qualquer irregularidade iminente relativa a ocupação de banda dos IEDs, dessa forma é possível tomar ações corretivas, com certa antecedência, visando a manter o bom desempenho do sistema.

As bibliotecas NET-SNMP, FANN e o *framework Qt Creator IDE* e *Qt libraries* são adequadas para o sistema desenvolvido, devido a sua constante atualização, estabilidade, características e documentação disponíveis. Além disso, essas bibliotecas são gratuitas e executadas no sistema operacional GNU/Linux em uma plataforma de *hardware* do tipo PC, tornando o sistema em questão uma alternativa de baixo custo para o tipo de monitoramento desejado.

A etapa de medição do sistema desenvolvido apresentou desempenho tão bom quanto o aplicativo comercial utilizado, conforme os resultados da Tabela 6.1, validando desta forma a implementação realizada.

A RNA desenvolvida foi capaz de prever adequadamente o comportamento da série temporal que caracteriza a ocupação percentual de banda do IED monitorado, fornecendo um erro de estimação inferior a 3% para 91,30% das amostras apresentadas. O que mostra que a RNA projetada é capaz de fornecer uma previsão de ocupação de banda com bom desempenho, agregando uma funcionalidade importante para o sistema desenvolvido. A partir dessa predição, um sistema de controle sobre as configurações da rede pode ser desenvolvido e ações automáticas podem ser tomadas visando a manter os IEDs operando na região I.

A interface gráfica, conforme discutido, mostrou-se adequada para agregar o sistema de predição desenvolvido tornando a interação com o usuário facilitada através dos recursos apresentados, de modo a tornar a análise de uma ocorrência mais eficiente.

7.3 Continuidade da Pesquisa

Como continuidade desta pesquisa é proposto:

- Estender as análises apresentadas no Capítulo 5 para outros IEDs;
- Desenvolver novos métodos e ferramentas para ensaios de IEDs no contexto do padrão IEC 61850;
- Estudar outras técnicas de predição de séries temporais;
- Desenvolver métricas para monitorar o desempenho das mensagens GOOSE;
- Estudar a viabilidade da implementação do SNMP nos IEDs;
- Propor novas técnicas de gerenciamento para redes de IEDs;
- Aprimorar a interface gráfica;
- Agregar novas funcionalidades ao sistema desenvolvido, como um filtro de pacotes;
- Desenvolver um sistema de controle aplicado as configurações do *switch Ethernet* a partir do monitoramento desenvolvido;
- Tornar o sistema desenvolvido multiplataforma, com suporte ao sistema operacional *Microsoft Windows*.

Referências Bibliográficas

- (2008). IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange Between Systems–Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications - Section Three. *IEEE Std 802.3-2008 (Revision of IEEE Std 802.3-2005)*, 1 –315.
- Abboud, R. L., R. M. de Moraes, E. Zanirato, J. Bahia, S. Kimura, e A. Rotta (2008). Aplicação da Norma IEC 61850 na Vida Real: O Projeto de Modernização de 30 Subestações na Elektro. In *Anais do IX Seminário Técnico de Proteção e Controle - STPC*, Belo Horizonte. Cigré - Brasil.
- ABNT (1981). *Relés Elétricos - Terminologia - NBR 5465*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- ABNT (1992a). *Transformador de Corrente - NBR6856*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- ABNT (1992b). *Transformador de Potencial - NBR6855*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- Anderson, P. M. (1999). *Power System Protection*. New York: IEEE Press - McGrawHill.
- Andersson, L., C. Brunner, e F. Engler (2003). Substation Automation Based on IEC 61850 with New Process-Close Technologies. In *Power Tech Conference Proceedings*, Volume 2, Bologna. IEEE.
- Apostolov, A. (2006). Object Models of Protection Devices in IEC 61850. In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*, pp. 915 –920.

- Apostolov, A. e D. Tholomier (2006). Impact of IEC 61850 on Power System Protection. In *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*, pp. 1053–1058.
- Araújo, C. A. S., F. C. de Souza, J. R. R. Cândido, e M. P. Dias (2005). *Proteção de Sistemas Elétricos* (2 ed.). Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- Barbosa, D. (2010). *Sistema Híbrido Inteligente para o Monitoramento e Proteção de Transformadores de Potência*. Tese (doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos - São Paulo.
- Bastos, M. R. e E. Castro (2005). A Evolução dos Sistemas de Proteção e Controle com a IEC 61850. In *Eletricidade Moderna*, Volume 374, São Paulo, pp. 168–177.
- Berndt, D. (2003). *Battery Technology Handbook* (2 ed.), Chapter 1 - Electrochemical Energy Storage. New York: Marcel Dekker Inc.
- Blackburn, J. L. e T. J. Domin (2007). *Protective Relaying Principles and Applications* (3 ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Boed, V. (2000). *Networking and Integration of Facilities Automation Systems*. Boca Raton: CRC Press.
- Brand, K.-P. (2007). The Introduction of IEC 61850 and its Impact on Protection and Automation within Substations. *ELECTRA -CIGRE* (233), 20–29.
- Brand, K.-P., F. Steinhauser, e C. Hoga (2005). IEC 61850 as the Basis for Seamless Communication Architecture in Power Delivery. *Electronic*, [Acesso em set. 2012]. <http://www.ucaiug.org/default.aspx>.
- Brittes, J. L. P. (1996). Aproveitamento Funcional de Sistemas de Controle e Proteção Digitais em Subestações de Distribuição. Dissertação (mestrado), Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Brunner, C. (2008). IEC 61850 for Power System Communication. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES*, pp. 1–6.
- Bulgarelli, R. e E. C. Senger (2006). O Processamento Digital de Sinais Aplicado na Proteção de Motores Trifásicos Industriais. In *Conferencia de Aplicações Industriais - INDUSCON*, Recife. Universidade Federal de Pernambuco - IEEE/UFPE.

-
- Case, J., J. Davin, M. Fedor, e M. Schoffstall (1989). Internet Network Management using the Simple Network Management Protocol. pp. 156 –159.
- Case, J., M. Fedor, M. Schoffstall, e J. Davin (1990). Simple Network Management Protocol (SNMP). RFC 1157 (Historic). <http://www.ietf.org/rfc/rfc1157.txt>.
- CEB5 (2010). Utilização de Solução de Automação Baseada na Norma IEC 61850. Pesquisa de opinião, Cigré-Brasil, Rio de Janeiro - RJ.
- Cerf, V. e R. Kahn (1974). A Protocol for Packet Network Intercommunication. *Communications, IEEE Transactions on* 22(5), 637 – 648.
- Chapman, S. J. (2006). *Programação em Matlab para Engenheiros*. São Paulo: Thomson Learning.
- Chavan, S., S. Jayaprakash, e V. Kumar (2008). An Open Standard Protocol for Networking of Energy Meters. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 23(4), 1749 –1753.
- Chelluri, S., D. Rodas, e A. Harikrishna (2010). Integration Considerations for Large-Scale IEC 61850 Systems. Technical Report 20100329/TP6418-01, National Thermal Power Corporation Ltd. - NTPC, India.
- Cidrás, J., J. F. Miñambres, e F. L. Alvarado (2009). *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*, Chapter 8 - Fault Analysis and Protection Systems, pp. 304 – 354. The ELECTRIC POWER ENGINEERING Series. Boca Raton: CRC Press.
- Colombo, R. (1986). *Disjuntores de Alta Tensão*. São Paulo: Livraria Nobel S. A.
- Costa, N. S. (2007). *Proteção de Sistemas Elétricos considerando Aspectos de Segurança da Rede de Comunicação*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Council, R. C. (1998). IRIG Serial Time Code Formats. Technical Report 200-98, Secretariat Range Commanders Council U.S. Army White Sands Missile Range, New Mexico.
- Coury, D., M. Oleskovicz, e R. Giovanini (2007). Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes. *EESC-USP, São Carlos, SP*.

- Cruden, A., J. McDonald, I. Andonovic, D. Uttamchandani, R. Porrelli, e K. Allan (1993). Current Measurement Device Based on the Faraday Effect. In *Developments in Power System Protection, 1993., Fifth International Conference on*, pp. 69 –72.
- da Silva, I. N., D. H. Spatti, e R. A. Flauzino (2010). *Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas - Curso Prático*. São Paulo: Artliber.
- da Silva Soares, A. (2008). Predição de Séries Temporais Econômicas por meio de Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet: Combinando Modelo Técnico e Fundamentalista. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- da Silveira, P. R. e W. E. dos Santos (2004). *Automação e Controle Discreto* (9 ed.). São Paulo: Editora Érica.
- Daigle, J. N., S. M. Musa, M. N. Sadiku, R. B. Robrock II, A. K. Salkintzis, N. Passas, S. McClellan, e R. Seker (2006). *Broadcasting and Optical Communication Technology*, Chapter 4—Computer Networks, pp. 4–1–4–67. Boca Raton: CRC Press.
- Dawidczak, H. e A. L. P. Oliveira (2007). A Experiência de Projetos Utilizando a Norma IEC 61850 na Europa e América. In *Anais do VII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos - SIMPASE*, Salvado, BA. Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - COELBA.
- de Almeida, M. A. D. (2000). Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos. UFRN, Natal.
- de Azevedo Moraes, S. (1985). *Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Subestações de Corrente Alternada*, Chapter X - Disjuntores, pp. 186–223. Rio de Janeiro: Furnas Centrais Elétricas.
- de Carvalho Paulino, M. E. (2006). Teste de IEDs Baseados na IEC 61850. In *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*, Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande.
- de Oliveira, P. R. P., J. A. Jardini, L. C. Magrini, F. Crispino, H. K. Kiyohara, e C. A. V. Cardoso (2003). Sistemas Abertos de Supervisão e Controle e Subestações de Energia. In *II CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, Salvador. ANEEL.
- Dillon, T. S. e D. Niebur (Eds.) (1996). *Neural Networks Applications in Power Systems*. London: CRL Publishing Ltd. ISBN: 0 9527874 0 7.
- Donoso, Y. (2009). *Network Design for IP Convergence*. Boca Raton, FL: Auerbach Publications.

-
- Elmore, W. A. (2004). *Protective Relaying Theory and Applications* (2 ed.). New York: Marcel Dekker.
- Energies, W. (2011). Power delivery. <http://www.we-energies.com/powerquality/powerdelivery.htm>.
- Engineering, I. O. e Technology (1995). *Power System Protection 1: Principles and components (Power System Protection) (v. 1)* (2nd ed.). Institution Of Engineering And Technology.
- Erickson, J. (2008). *Hacking : The Art of Exploitation*. San Francisco: No Starch Press.
- Evans, J. W. . (2007). *Electric Power Substations Engineering* (2 ed.), Chapter 6 - Interface between Automation and the Substation, pp. 6.1–6.28. Boca Raton: CRC Press.
- Farhangi, H. (2010). The Path of the Smart Grid. *Power and Energy Magazine, IEEE* 8(1), 18–28.
- Flores, V., D. Espinosa, J. Alzate, e D. Dolezilek (2007). Case Study: Design and Implementation of IEC 61850 from Multiple Vendors at CFE la Venta II. In *Protective Relay Engineers, 2007. 60th Annual Conference for*, pp. 307–320.
- Forouzan, B. A. (2007). *Data Communications and Networking* (4 ed.). New York: McGraw-Hill Higher Education.
- Frameworks, Q. D. (2012). Qt reference documentation - qt creator. Electronic. <http://doc.qt.nokia.com/qtcreator-2.4/index.html>.
- Franke, H. (2003). *Battery Technology Handbook* (2 ed.), Chapter 7 - Batteries for Stationary Power Supply. New York: Marcel Dekker Inc.
- Garzon, R. D. (2002). *High Voltage Circuit Breakers-Design and Applications* (2 ed.). New York: Marcel Dekker Inc.
- GE (2011a). D60 Line Distance Protection System Instruction Manual. Manual P/N:1601-0089-W1 (GEK-113377), General Electric - GE, Markham, Ontario, Canada.
- GE (2011b). Universal Relay Family - Overview. Electronic Presentation. <http://www.gedigitalenergy.com/app/ViewFiles.aspx?prod=d60&type=8>.
- GE (2012). Enervista Launchpad. Electronic. <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/EnerVista/launchpad>.
- GEC Alsthom (1995). *Protective Relays - Application Guide* (3 ed.). England: GEC Alsthom.

- Gilat, A. (2006). *Matlab com Aplicações em Engenharia* (2 ed.). Porto Alegre: Bookman.
- Goldman, J. E. (2005). *Microelectronics* (2 ed.), Chapter 22 - Network Communication, pp. 22.1–22.28. Boca Raton: CRC Press.
- Grandi, G. (2000). *Metodologia para Especificação de Telecontrole em Subestações de Energia Elétrica*. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.
- Gurevich, V. (2006). *Electric Relays - Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- Gurjão, E. C., B. A. de SOUZA, e U. A. do CARMO (2007). A Comunicação entre Equipamentos de Proteção na Norma IEC 61850. *Eletricidade Moderna* 397, 148–157.
- Hardaker, W. (2012). *Net-SNMP Documentation* (5.7 ed.). <http://www.net-snmp.org/docs/readmefiles.html>.
- Harder, E. L. e J. C. Cunningham (1997). *Electrical Transmission and Distribution Reference Book* (5 ed.), Chapter 11 - Relay and Circuit Breaker Application, pp. 342–400. Raleigh - North Carolina: ABB Power T&D Company Inc.
- Hassan, R. e G. Radman (2010). Survey on smart grid. In *IEEE SoutheastCon 2010 (Southeast-Con), Proceedings of the*, pp. 210 –213.
- Haykin, S. (2001). *Redes Neurais Princípios e Prática*. Porto Alegre: Bookman Editora.
- Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior : a Neuropsychological Theory*. John Wiley & Sons.
- Held, G. (2003). *Building A Wireless Office*. Boca Raton: Auerbach Publications.
- Held, G. e S. Jagannathan (2004). *Practical Network Design Techniques: A Complete Guide for WANs and LANs*. Best Practices Series. Auerbach Publications.
- Herrmann, H., C. Hoga, N. Schuster, e G. Wong (2006). Implementation Experience on IEC 61850-Based Substation Automation Systems. In *CIGRE Study Committee B5 - Protection and Automation*.
- Hojo, T. (2002). Transformadores para Instrumentos. Edição do autor, São Paulo.
- Holbach, J., J. Rodriguez, C. Wester, D. Baigent, L. Frisk, S. Kunsman, e L. Hossenlopp (2007). Status on the First IEC 61850 Based Protection and Control, Multi-Vendor Project in the

-
- United States. In *60th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2007*, pp. 283 –306. IEEE.
- Horowitz, S. H. (2007). *Power System Stability & Control* (2 ed.), Chapter 3 - Transmission Line Protection. Electric Power Engineering Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Horowitz, S. H. e A. G. Phadke (1995). *Power System Relaying* (2 ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Hou, Y. e Y. He (2010). Modeling of Electricity Prices. Shanghai, pp. 549 –554.
- IEC (1984). *IEC 50 - International Electrotechnical Vocabulary - Capítulo 441 - Switchgear, Controlgear and Fuses*. IEC.
- IEC (2003a). IEC-61850 - Part 1: Introduction and Overview. Technical Report IEC/TR 61850-1:2003(E), International Electrotechnical Commission.
- IEC (2003b). IEC-61850 - Part 7.1: Basic Communication Structure for Substations and Feeder Equipment-Principles and Models. Technical Report IEC 61850-7-1:2003(E), International Electrotechnical Commission.
- IEC (2003c). IEC-61850, Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models. Technical Report IEC 61850-5:2003(E), International Electrotechnical Commission.
- IEC (2003d). IEC-61850, Part 7.4: Basic Communication Structure for Substations and Feeder Equipment-Compatilbe Logical Node Classes and Data Classes. Technical Report IEC 61850-7-4:2003(E), International Electrotechnical Commission.
- IEC (2003e). IEC-61850, Part 9.1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Sampled Values over serial Unidirectional Multidrop point to point Link. Technical Report IEC 61850-9-1:2003(E), International Electrotechnical Commission.
- IEC (2004a). IEC-61850, Part 6: Substation Automation System Configuration Description Language. Technical Report IEC 61850-6:2004(E), International Electrotechnical Commission.
- IEC (2004b). IEC-61850, Part 8.1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 e ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. Technical Report IEC 61850-8-1:2004(E), International Electrotechnical Commission.

- IEC (2004c). IEC-61850, Part 9.2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Sampled Values over ISO/IEC 8802-3. Technical Report IEC 61850-9-2:2004(E), International Electrotechnical Commission.
- IEC (2009). Publications & Work in Progress - IEC 61850 Standard. <http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/028400>.
- IEC-61850 (2007). Communication Networks and Systems in Substations. <http://www.61850.com/>.
- IEEE (2004). IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Media Access Control (mac) Bridges. *IEEE Std 802.1D-2004 (Revision of IEEE Std 802.1D-1998)*, 1–277.
- IEEE (2006). IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Virtual Bridged Local Area Networks. *IEEE Std 802.1Q-2005 (Incorporates IEEE Std 802.1Q1998, IEEE Std 802.1u-2001, IEEE Std 802.1v-2001, and IEEE Std 802.1s-2002)*.
- IEEE (2007). IEEE Recommended Practice for Network Communication in Electric Power Substations. *IEEE Std 1615-2007*, 1–93.
- IEEE (2008). IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. *IEEE Std 1588-2008 (Revision of IEEE Std 1588-2002)*, c1–269.
- IEEE (2011). IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications. *IEEE Std C37.238-2011*, 1–66.
- IEEE PES (1992). *IEEE Std C37.100-1992 - Standard Definitions for Power Switchgear*. New York: IEEE PES.
- ISO/IEC (1998). Information Technology - Quality of Service: Framework. Standard ISO/IEC 13236:1998(E).
- Jiangyi, D. e N. Yan (2009). The Design and Implementation of Multifunction Probe Based on SNMP. pp. 434–437.
- Johns, A. T. e S. K. Salman (1995). *Digital Protection for Power Systems*. London - U.K.: Peter Peregrinus Ltd.
- Jones, S. e R. Kovacs (2003). *Introduction to Communications Technologies A Guide for Non-Engineers*. Boca Raton: Auerbach Publications.

-
- J.W.Hodgkiss (1981). *Power System Protection - Principles and Components* (2 ed.), Volume 1, Chapter 6 - Relays, pp. 339–447. Stevenage, U.K.: Peter Peregrinus Ltd.
- Kampichler, W. (2005). *The Industrial Information Technology Handbook*, Chapter 14-The Fundamentals of the Quality of Service. Boca Raton: CRC Press.
- Kanabar, M. (2011). *Investigating Performance and Reliability of Process Bus Networks for Digital Protective Relaying*. Phd thesis, School of Graduate and Postdoctoral Studies - The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- Kanabar, M. e T. Sidhu (2011). Performance of IEC 61850-9-2 Process Bus and Corrective Measure for Digital Relaying. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 26(2), 725 –735.
- Kaneda, K., S. Tamura, N. Fujiyama, Y. Arata, e H. Ito (2008). IEC 61850 Based Substation Automation System. In *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008.*, pp. 1 –8.
- Karasinski, C. A. e E. da Silva Dias (2003). *Guia para Aplicação e Manutenção de Banco de Baterias*. Curitiba: Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR.
- Kezunovic, M. (2002). Future Trends in Protective Relaying, Substation Automation, Testing and Related Standardization. In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, Volume 1, pp. 598 – 602 vol.1.
- Kim, G.-S. e H.-H. Lee (2005). A Study on IEC 61850 Based Communication for Intelligent Electronic Devices. In *Science and Technology, 2005. KORUS 2005. Proceedings. The 9th Russian-Korean International Symposium Science and Technology*, pp. 765–770.
- Kindermann, G. (1999). *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência* (1 ed.), Volume 1. Florianópolis: Edição do Autor.
- Kindermann, G. (2006). *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, Volume 2. Florianópolis: Edição do Autor.
- Kosow, I. L. (1964). *Electric Machinery and Control*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.
- Kovács, Z. L. (1996). *Redes Neurais Artificiais* (2 ed.). São Paulo: collegium cognitio.
- Kundur, P. (2007). *Power System Stability and Control* (2 ed.), Chapter 7 - Power System Stability. Boca Raton: CRC Press.

- Kurose, J. F. e K. W. Ross (2009). *Computer Networking: A Top-Down Approach* (5th ed.). USA: Addison-Wesley Publishing Company.
- Liehr, S. (2006). Optical Measurement of Currents in Power Converters. Master thesis, School of Electrical Engineering - Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Littman, M. K. (2002). *Building Broadband Networks*. Boca Raton: CRC Press.
- Lloret, P., J. Velasquez, L. Molas-Balada, R. Villafafila, A. Sumper, e S. Galceran-Arellano (2007). IEC 61850 as a Flexible Tool for Electrical Systems Monitoring. In *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007 - EPQU 2007.*, pp. 1–6.
- Mackiewicz, R. (2006). Overview of IEC 61850 and Benefits. In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*, pp. 376–383.
- Maezono, P. K. (2002). *Noções de Proteção Digital*. Edição do Autor, São Paulo.
- Maezono, P. K. (2003). *Proteção de Linhas de Transmissão*. Edição do autor, São Paulo.
- Malinowski, A. e B. M. . Wilamowski (2005). *The Industrial Information Technology Handbook*, Chapter 17-The User Datagram Protocol. Boca Raton: CRC Press.
- Mandic, D. e J. Chambers (2001). *Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability* (1 ed.). Wiley.
- Marçula, M. e P. Benini Filho (2005). *Informática: conceitos e aplicações* (3 ed.). São Paulo: Editora Érica.
- Mason, C. R. (1962). *The Art & Science of Protective Relaying*. General Electric - GE.
- Matsumoto, E. Y. (2006). *MATLAB 7: Fundamentos* (2 ed.). São Paulo: ERICA.
- Mauro, D. R. e K. J. Schmidt (2005). *Essential SNMP* (2 ed.). Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc.
- McBride, G. G. (2007). *Information Security Management Handbook* (6 ed.), Chapter 144-ISO-OSI and TCP-IP Network Model Characteristics, pp. 1917–1928. Boca Raton: CRC Press.
- McCloghrie, K. e M. Rose (1991). Management Information Base for Network Management of TCP/IP-Based Internets MIB-II. Technical Report RFC1213, Internet Engineering Task Force - IETF, Fremont, California, USA. <http://www.ietf.org/rfc/rfc1213.txt>.

-
- Mcculloch, W. e W. Pitts (1943). A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biology* 5(4), 115–133.
- McDonald, J. D. (2007). *Electric Power Substations Engineering* (2 ed.), Chapter 7-Substation Integration and Automation, pp. 7.1–7.20. Electric power engineering series. Boca Raton,FL: CRC Press.
- Metcalfe, R. M. e D. R. Boggs (1976). Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks. *Communications of the ACM* 19(7), 395–404. cited By (since 1996) 173.
- Mo, J., J. C. Tan, P. A. Crossley, Z. Q. Bo, e A. Klimek (2010). Evaluation of Process Bus Reliability. In *Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change, 10th IET International Conference on*, Manchester, UK, pp. 1 –5. The Institution of Engineering and Technology -IET.
- Morettin, P. A. e C. M. de Castro Tolo (2006). *Análise de Séries Temporais* (2 ed.). São Paulo: Edgard Blucher.
- Morton, J. S. (1985). *Power Circuit Breaker Theory and Design*, Chapter 5 - Air-break circuit breakers, pp. 189–234. England: Peter Peregrinus Ltd.
- Moslehi, K. e R. Kumar (2010). A Reliability Perspective of the Smart Grid. *Smart Grid, IEEE Transactions on* 1(1), 57 –64.
- Muller, N. (2003). *LANs to WANs : The Complete Management Guide*. Norwood, MA, USA.
- Mullikin, R. (2007). *Electric Power Transformer Engineering* (2 ed.), Chapter 7 - Instrument Transformers, pp. 7-2 – 7-34. Boca Raton: CRC Press.
- Nissen, S. (2012). *Fast Artificial Neural Network Library–Reference Manual for FANN 2.2.0*. <http://leenissen.dk/fann/html/files/fann-h.html>.
- NIST (2010). NIST-Identified Standards for Consideration by Regulators. Technical Report Release 1.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA. Acesso em 14 out 2010.
- Nordell, D., M. Simon, T. Lefebvre, C. Hoga, J. Burger, E. Gunther, W. Longcore, M. Goodrich, e B. Yinger (2012). UCA International Users Group. Electronic. <http://www.ucaiug.org/default.aspx>.

- NxtPhase T&D Corporation (2006). NXCT Optical Current Sensor. www.nxtphase.com.
- Olifer, N. e V. Olifer (2006). *Computer Networks: Principles, Technologies and Protocols for Network Design*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Paithankar, Y. G. e S. R. Bhide (2010). *Fundamentals of Power System Protection*. PHI Learning.
- Pereira, A. C., R. Abboud, e R. Pellizzoni (2009). Sistemas de Proteção e Automação de Subestações de Distribuição e Industriais usando a Norma IEC 61850. In *Anais do XIII ERIAC - Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ*, Iguazú - Argentina. Comité de Estudio B5 - Protecciones de Sistemas y Automatización de Subestaciones: CIGRE.
- Pereira, A. C., D. Cáceres, J. M. O. Filho, R. Pellizzoni, e J. R. G. Correia (2007). Automação de Subestações e Usinas - Estado da Arte e Tendências Utilizando a Norma IEC 61850. In *VII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, SIMPASE*, Salvador - BA.
- Petch, H. S. e J. Rushton (1981). *Power System Protection - Principles and Components* (2 ed.), Volume 1, Chapter 2 - Protection Principles and Components, pp. 21–52. Stevenage -UK: Peter Peregrinus Ltd.
- Peterson, L. L. e B. S. Davie (2003). *Computer Networks: A system Approach* (3 ed.). San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Phadke, A. G. e J. S. Thorp (1994). *Computer Relaying for Power Systems*. Somerset - England: Research Studies Press Ltd.
- Piliouras, T. C. . (2005). *Network Design, Management and Technical Perspectives* (2 ed.). Boca Raton: Auerbach Publications.
- Postel, J. (1980). User Datagram Protocol. Standard RFC0768/STD0006, Internet Engineering Task Force - IETF, Fremont, California, USA. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc768.txt>.
- Pozzuoli, M. e R. Moore (2006). Ethernet in the Substation. In *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, pp. 7 pp.
- Proudfoot, D. (2002). UCA and IEC61850 for Dummies. Presentation.
- Prévé, C. (2006). *Protection of Electrical Networks*. London, UK: Wiley-ISTE.
- Rao, V. B. (1995). *C++ Neural Networks and Fuzzy Logic*. M&T Books. ISBN: 978-1558282988.

-
- Reichenbach, G. (2001). DIGSI 4 - Breaker Control/Control Display. Presentation.
- Reynolds, J. (2002). Assigned Numbers: RFC 1700 is Replaced by an On-line Database. Technical Report RFC3232, Internet Engineering Task Force, Fremont, California, USA.
- Riedmiller, M. (1994). *Rprop-Description and Implementation Details: Technical Report*. Inst. f. Logik, Komplexität u. Deduktionssysteme.
- Rodrigues, J., L. Soldani, e G. Wong (2006). First Substation with IEC 61850 Commissioned in the Americas. In *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES*, pp. 1–5.
- Rodrigues, J. R. M. (2005). Primeira Subestação em Funcionamento com IEC 61850. In *VI SIMPASE - Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos*.
- Rush, P. (2002). *Network Protection & Automation Guide*. ALSTOM T&D Energy Automation & Information.
- Santos, L. F. e M. Pereira (2007). Uma Abordagem Prática do IEC 61850 para Automação, Proteção e Controle de Subestações. In *Anais do VII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos - SIMPASE*, Salvador. Companhia de Energia do Estado da Bahia - COELBA and Cigré - Brasil.
- Sato, F. (2005). *Proteção de Sistemas de Energia Elétrica*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Apostila.
- Schumacher, M., C. Hoga, e J. Schmid (2007). Get on the Digital Bus to Substation Automation. *Power and Energy Magazine, IEEE* 5(3), 51 –56.
- Seifert, R. e J. Edwards (2008). *The All-New Switch Book: The Complete Guide to LAN Switching Technology* (2 ed.). Wiley Publishing.
- Sidhu, T. e P. Gangadharan (2005). Control and Automation of Power System Substation Using IEC 61850 Communication. In *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on*, pp. 1331–1336.
- Sidhu, T., S. Injeti, M. Kanabar, e P. Parikh (2010). Packet Scheduling of GOOSE Messages in IEC 61850 Based Substation Intelligent Electronic Devices (IEDs). In *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1 –8.

- Sidhu, T., M. G. Kanabar, e P. P. Parikh (2008). Implementation Issues with IEC 61850 Based Substation Automation Systems. In *Proceedings of Fifteenth National Power Systems Conference*, IIT Bombay, pp. 473–478.
- Sidhu, T. e Y. Yin (2007). Modelling and Simulation for Performance Evaluation of IEC 61850 Based Substation Communication Systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 22(3), 1482–1489.
- Silva, P. O. M. P., R. R. Goldschmidt, J. A. Soares, e C. Ferlin (2007). Previsão de Séries Temporais utilizando Lógica Nebulosa. In *4º CONTECSI*, São Paulo. Universidade de São Paulo.
- Sleva, A. F. (2009). *Protective Relay Principles* (1 ed.). CRC Press.
- Sohlström, H. (1993). *Fibre Optic Magnetic Field Sensors Utilizing Iron Garnet Materials*. Ph.d. thesis, School of Electrical Engineering - Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Solarwinds (2009). Solarwinds: Engineer's toolset network traffic generator: WAN Killer. <http://www.solarwinds.com/products/toolsets/WANKiller.aspx>.
- Stallings, W. (2000). *Local and Metropolitan Area Networks* (6 ed.). Prentice Hall.
- Stallings, W. (2006). *Data and Computer Communications* (8 ed.). Prentice Hall.
- Stamper, D. A. (1994). *Local Area Networks*. Addison-Wesley.
- Tanenbaum, A. (2002). *Computer Networks*. Prentice Hall Professional Technical Reference.
- Ungrad, H., W. Winkler, e A. Wiszniewski (1995). *Protection Techniques in Electrical Energy Systems*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Usida, W. F. (2007). Controle Fuzzy para Melhoria do Perfil de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Vorpe, M. A., O. K. Filho, e W. J. França (1995). *Disjuntores e Chaves - Aplicação em Sistemas de Potência*, Chapter 1 - Aspectos Básicos e Construtivos, pp. 29–46. Niterói: EDUFF - Editora da Universidade Federal Fluminense.
- Wang, Z. (2001). *Internet QoS: Architectures and Mechanisms for Quality of Service* (1st ed.). San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

- Xin-Wei, D. e Y. Qiang (2010). Review of Smart Grid and its Development Prospect in Sichuan. pp. 1 –4.
- Zarapelão, B. B. (2010). *Detecção de Anomalias em Redes de Computadores*. Tese (doutorado), Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas.
- Zhang, L. e N.-K. Nair (2008). Testing Protective Relays in IEC 61850 Framework. In *Universities Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian*, pp. 1–6.