JULIANO COELHO MIRANDA

**IEC-61850: Interoperabilidade e Intercambialidade entre
Equipamentos de Supervisão, Controle e Proteção Através das
Redes de Comunicação de Dados**

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

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

São Carlos - SP
2009

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

M672i

Miranda, Juliano Coêlho

IEC-61850 : interoperabilidade e intercambialidade entre equipamentos de supervisão, controle e proteção através das redes de comunicação de dados / Juliano Coêlho Miranda ; orientador Denis Vinicius Coury. -- São Carlos, 2009.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Sistemas Elétricos de Potência e Área de Concentração em Engenharia Elétrica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

1. Comunicação de dados. 2. IEC-61850. 3. Relé digital de proteção - intercambialidade; interoperabilidade. 4. Sistemas elétricos de potência. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Licenciado JULIANO COÊLHO MIRANDA

Dissertação defendida e julgada em 27/04/2009 perante a Comissão Julgadora:

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

APROVADO

Prof. Dr. **JOSÉ CARLOS DE MELO VIEIRA JÚNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Associado **BENEMAR ALENCAR DE SOUZA**
(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG)

Aprovado

Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Dedico esta dissertação à Viviane, e ao nosso querido filho Luiz Felipe, pois é preciso
amor para poder pulsar.*

*Aos meus pais, Antônio e Roseli, e meu irmão Pedro Paulo, pois é preciso serenidade e
exemplos para poder seguir.*

*Aos meus avôs Antônio e Arildo, e as minhas avós Mescias e Margarida, pois é preciso
amparo e inspiração para viver.*

Agradecimentos

Deus, pela indelével inquietação em meu espírito, pelo anseio incontido de buscar novos horizontes, de superar limites.

Gostaria de agradecer as pessoas que estão comigo no palco da vida, essas pessoas não podem ser vistas neste momento, mas elas estão aqui! Nas páginas, letras, cores, sombras, luzes, do meu lado, estão em mim. À minha família, pelo carinho, os cuidados e cujos valores transcendem o tempo e o espaço.

Ao Professor Tit. Denis Vinicius Coury, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), pela percepção de que a obra educativa é, antes de tudo, um trabalho conjugado. Por compartilhar de forma consciente, dedicada e sincera meus ideais acadêmicos e suas experiências profissionais, oportunizar o conhecimento e as facilidades materiais imprescindíveis na estruturação e desenvolvimento das atividades contíguas ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE). Pela orientação amiga, pontual e competente.

Meu “velho” amigo, M.Sc. Ulisses Chemin Netto, engenheiro, na acepção plena e nobre dessa arte. Por partilhar, continuamente e sem restrições, sua competência profissional, conhecimento e devoção a proteção dos sistemas elétricos de potência. Obrigado pela tua presença, paciência e labuta diária. Pelas leituras, sugestões sempre oportunas e suporte com os aplicativos gráficos.

Ao amigo, e companheiro de mestrado, Lázaro Eduardo da Silva, que com chuva, sol, frio ou calor, nas constantes viagens ou nas intermináveis noites de trabalho, esteve sempre ali!

Ao Professor Dr. Mário Oleskovicz (EESC/USP), pela postura, dedicação e objetividade com que trata os assuntos, promovendo as facilidades de entendimento e trabalho. Pela oportunidade de ministrar algumas aulas na Escola de Engenharia de São Carlos.

Ao Professor Dr. Ivan Nunes da Silva (EESC/USP), por propor aulas vivas e condições desafiantes, leia-se facilitadoras, a construção do conhecimento. Pela honra em ser co-autor

na segunda parte de seu livro “Redes Neurais Artificiais para Engenheiros e Cientistas”, destinada às aplicações de redes neurais em problemas práticos.

À Professora Dra. Mônica de Lacerda Rocha (EESC/USP), pelo suporte laboratorial e conhecimento compartilhado em comunicações ópticas.

Ao Professor Dr. Francisco José Monaco, do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC/USP), pelas sugestões conferidas na dissertação de qualificação.

Ao Professor Dr. José Carlos de Melo Vieira Junior (EESC/USP), pela minuciosa leitura e sugestões oportunas na fase de qualificação, e também por aceitar ministrar sua avaliação no que tange a defesa desta dissertação.

Ao Professor Dr. Benemar Alencar de Souza, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pela disposição e por consentir ministrar sua avaliação e considerações na defesa desta dissertação.

Aos companheiros Dr. Murilo da Silva e M.Sc. Daniel Barbosa, pela recepção no LSEE, apoio e informações compartilhadas.

Ao analista de sistemas, Dagoberto Carvalio Junior (ICMC/USP), pelas informações compartilhadas no que tange aos testes de desempenho da rede de comunicação de dados.

Ao Dr. Danilo Henrique Spadotti (EESC/USP), nas medições realizadas com o analisador de espectro pertinente ao laboratório de comunicações ópticas.

Aos Engenheiros Ricardo Abboud e Juliano Bahia, da *Schweitzer Engineering Laboratories*, SEL; Licínio Ribeiro de Miranda, Enrico Augusto Viceconti e Adenilson Dias Santos, da *General Electric*, GE, pelo suporte e informações compartilhadas.

À Marisa Helena R. Vicente Fortulan e Jussara Ramos Zoia, pelo atendimento cordial, competente e respeitoso na secretaria de pós-graduação (EESC/USP).

Ao graduando Athila Quaresma Santos (ICMC/USP), pelo *software* em Java que facilitou a análise de alguns resultados no teste de desempenho da rede de comunicação.

Ao amigo, Dalisio Cezar Dias Lourenço, companheiro de bons tempos na TELEMIG, Telecomunicações de Minas Gerais, por ter me alocado no mundo fantástico das comunicações de dados e ter sido um exemplo singular de conduta profissional e capacidade técnica.

Ao Professor Luiz Fernando de Castro Pereira, pela oportunidade em desbravar o mundo da eletrônica, e pelo estágio durante o curso técnico (com apenas trinta dias de aula).

Ao Professor Dr. Ronei Ximenes Martins, Pró-Reitor de Pós-graduação, Pesquisa e Extensão (2002) e Gestor da Unidade em Educação a Distância, GEaD (2004), no Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS/MG), por dilatar no meu horizonte o espantoso mundo das redes de computadores. Pela confiança que sempre depositou nas minhas realizações,

favorecendo minha iniciação como docente do curso de ciência da computação e o desenvolver de diferentes atividades na aludida instituição.

Ao Professor M.Sc. Hélio Lemes Costa Jr., coordenador do curso de Sistemas de Informação, da Faculdade Cenecista de Varginha/MG (FACECA), pela condução até São Carlos/SP quando da entrevista para admissão ao programa de mestrado; pelo apoio, incentivo e facilidades no conciliar de minhas atividades profissionais na referida instituição.

Ao Professor Fabrício Pelloso Piurcosky, coordenador do curso de Ciência da Computação, UNIS/MG, pelo apoio e facilidades no harmonizar de minhas atividades profissionais na referida instituição.

Ao amigo Arthur Coelho Porchat pelo estímulo e suporte dispensados. Lembre-se, amigo é para se guardar do lado esquerdo do peito.

No livro “A Última Grande Lição”, Mitch Albon questiona se na juventude você já teve um professor especial que, com paciência, afeto e sabedoria, ajudou-lhe a descobrir dimensões mais profundas da vida. Neste ínterim, meus agradecimentos aos queridos amigos, Clovis José de Oliveira Souza, José Donizete da Silva e Maristela Esper. Obrigado!

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo apoio financeiro concedido para estruturação do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE).

“Ser mineiro é um estado de espírito.”

“Disciplina é liberdade.”

Juliano

Resumo

MIRANDA, Juliano Coêlho. **IEC-61850: Interoperabilidade e Intercambialidade entre Equipamentos de Supervisão, Controle e Proteção Através das Redes de Comunicação de Dados**. 2009. 314f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Os sistemas de comunicação de dados sempre foram considerados um fator crítico na operação em tempo real do sistema elétrico de potência, devido à necessidade de decisões rápidas e precisas em pontos geograficamente distribuídos, desde usinas geradoras de energia até interfaces de usuários. Com a tecnologia digital, as medições, sinalizações e comandos são encapsulados em pacotes de dados que trafegam na rede da subestação, utilizando protocolos que estabelecem os formatos, as regras, os métodos, negociando e concordando no uso de parâmetros, que assegurem o transporte de informações entre dois ou mais dispositivos do sistema de automação da subestação. Uma vez que o número de protocolos de comunicação tem se tornado um desafio para usuários e fabricantes, criando ilhas de informação, o padrão IEC-61850 busca harmonizar a diversidade de equipamentos e fabricantes, e possibilitar a integração de dados para que o máximo dos benefícios possa ser extraído. Como proposta que principia esta dissertação, ambiciona-se expor a implementação no Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, da Universidade de São Paulo, de uma infra-estrutura de comunicação de dados e redes de computadores, *Intranet*, que possibilita experimentação, medição, análise e avaliação da interoperabilidade de informações, e intercambialidade de equipamentos com supervisão, controle e proteção, essencialmente, relés digitais comerciais, aqui denominados equipamentos eletrônicos inteligentes. Com o intuito de desenvolver aplicações focadas ao estudo da automação de subestações entre os níveis de processo e *bay*, utilizando a infra-estrutura supracitada, apresenta-se neste trabalho uma lógica para controle de um *bay* típico

de saída de linha, dispondo de meios de comunicação de dados, e uma lógica para comutação entre fontes de alta tensão em uma subestação industrial. Estes casos oportunizaram a realização de testes quanto à troca de informações adotando o padrão IEC-61850 como protocolo de comunicação, e a rede *Ethernet* em substituição à fiação paralela, freqüentemente utilizada como canal de comunicação, além da intercambialidade entre dispositivos eletrônicos inteligentes de fabricantes distintos. Houve em 100% dos casos evidenciados, correta recepção dos comandos via fiação paralela ou mensagens GOOSE. Através dos resultados obtidos, percebeu-se a estabilidade e eficiência das lógicas implementadas e uma redução nos tempos necessários para troca de informações após migração para o padrão IEC-61850. Neste ínterim, busca-se avaliar o comportamento no tempo de mensagens do tipo GOOSE, *Generic Object Oriented Substation Event*, em condições distintas de tráfego e de configuração da topologia lógica da rede de comunicação, monitorando um possível extravio entre as mensagens geradas por um emissor e aquelas recebidas por um ou mais destinatários. Em todas as aplicações foi utilizada uma metodologia para especificar a automação das lógicas discretas mediante emprego do padrão IEC-61850, caracterizando conceitos, como, por exemplo, a especificação funcional das aplicações, o mapeamento das informações enviadas e recebidas, a definição do tipo de nó lógico utilizado, a configuração do serviço de mensagens GOOSE e, a atribuição da estrutura de dados de cada nó lógico aos pontos pertinentes dentro das lógicas preestabelecidas. Os resultados obtidos refletiram no ambiente laboratorial demandas reais solicitadas pelo sistema elétrico de potência.

Palavras-Chave: Comunicação de Dados, IEC-61850, Intercambialidade, Interoperabilidade, Relé Digital de Proteção, Sistemas Elétricos de Potência

Abstract

MIRANDA, Juliano Coêlho. **IEC-61850: Interoperability and Interchangeability between Supervision, Control and Protection Equipment Using Data Communication Networks**. 2009. 314f. Master's Degree - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2009.

Data communication has always been considered as a critical factor in real time operation of electric power systems. This is due to the need for fast and accurate decisions at different locations, from power generation to the user interfaces. With the digital technology, measurement, signals and commands are encrypted into data packets that travels on the substation network, using protocols that provide the format, rules, methods, dealing with parameters which ensure the traffic of information between two or more devices in the substation automation system. Since the number of communication protocols has become a challenge for users and manufacturers, creating islands of information, the IEC-61850 standard seeks for harmonization of the different equipment and manufacturers, enabling the integration of data for maximum performance. The proposal of this work is the actual implementation, at the Energy Systems Laboratory from the University of São Paulo, of an infrastructure of data communication network, which allows experimentation, measurement, analysis and assessment of information, interoperability and interchangeability of supervision, control and protection equipment, especially Intelligent Electronic Devices (IEDs). In order to develop applications focused on the study of automation of substations between the process and bay levels, using the infrastructure mentioned above, a logic to bay control using data communication, as well as a logic for high voltage source switching are presented. These situations test information exchange using the IEC-61850 standard as a communication protocol, and the Ethernet network replacing parallel wiring. It also tests the

interchangeability amongst IEDs from different manufacturers. There were in 100% of the cases tested, correct reception of commands using parallel wiring or GOOSE messages. From the results, the stability and efficiency of the implemented logic can be observed as well as a reduction in time required to exchange information in the system. Moreover, a behavior evaluation in time of GOOSE messages was implemented for different traffic and topology conditions, monitoring possible loss of messages. In all applications a methodology to specify the automation of discrete logic using the standard IEC-61850 was implemented, featuring concepts, such as the functional specification of the applications, data mapping, the definition of the type of logic node used, the configuration of GOOSE, as well as the allocation of data structure for each logical node. The results reflects in the laboratory environment the demands requested by an actual electric power system.

Keywords: Data Communication, IEC-61850, Interchangeability, Interoperability, Digital Protection Relay, Electric Power Systems

Sumário

RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
I. INTRODUÇÃO.....	43
1.1 SISTEMA DE PROTEÇÃO DO SEP	44
1.1.1 Partes Elementares do Sistema de Proteção – Subsistemas	45
1.1.2 Filosofias e Zonas de Proteção.....	46
1.1.3 Proteção Principal e Proteção de Retaguarda.....	48
1.1.3.1 Proteção principal.....	48
1.1.3.2 Proteção de retaguarda.....	48
1.1.4 Funções de Proteção.....	50
1.1.5 Relés de Proteção	51
1.2 ARQUITETURA SIMPLIFICADA DE UM SAS.....	56
1.3 O PADRÃO IEC-61850.....	57
1.4 OBJETIVO GERAL.....	59
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	59
1.6 CONTRIBUIÇÕES IMPORTANTES DO TRABALHO	60
1.7 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	61
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	63
2.1 TEORIAS DE COMUNICAÇÃO DE DADOS E REDES <i>ETHERNET</i>	63
2.2 VISÃO GERAL, IMPACTOS E PERSPECTIVAS DO PADRÃO IEC-61850	65
2.3 ABORDAGENS PRÁTICAS DO PADRÃO IEC-61850	66
2.4 PRINCÍPIOS DE TESTE BASEADOS NO PADRÃO IEC-61850	67
2.5 EXPERIÊNCIAS DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES COM O PADRÃO IEC-61850	68
III. REDES DE COMUNICAÇÃO DE DADOS NA AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES.....	73
3.1 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DE DADOS.....	75
3.2 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO GENÉRICO DE COMUNICAÇÃO APLICADO AO SEP	77

3.3	CONCEITOS DE COMUNICAÇÃO DE DADOS APLICADOS AO SEP	78
3.3.1	Códigos de Representação Binária	78
3.3.2	Modos de Operação	79
3.3.3	<i>Simplex</i>	80
3.3.4	<i>Half-Duplex</i>	80
3.3.5	<i>Full-Duplex</i>	80
3.3.6	Tipos de Transmissão	80
3.3.6.1	Transmissão paralela	80
3.3.6.2	Transmissão serial	81
3.3.7	Ritmo de Transmissão	81
3.3.7.1	Transmissão assíncrona	81
3.3.7.2	Transmissão síncrona	82
3.3.8	Modulação Analógica de Sinais Digitais	83
3.3.9	Codificação de Sinais Digitais	83
3.3.10	Canais de Comunicação	84
3.3.10.1	Fio piloto	85
3.3.10.2	Onda portadora	86
3.3.10.3	Fibra óptica	87
3.3.10.4	Cabos OPGW	90
3.3.10.5	Rádio microondas	92
3.3.11	Interfaces Digitais	93
3.3.11.1	Padrão RS-232	94
3.3.11.2	RS-449, V.35, V36, G.703 e USB	98
IV.	LAN, WAN, TCP/IP E INTRANET EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	101
4.1	REDES LAN	103
4.1.1	Topologias Físicas	103
4.1.1.1	Topologia em barramento	104
4.1.1.2	Topologia em estrela	104
4.1.1.3	Topologia em anel	105
4.1.2	Dispositivos de <i>Hardware</i> das LANs	106
4.1.2.1	Placa de rede	106
4.1.2.2	Repetidores	107
4.1.2.3	<i>Bridges</i>	108
4.1.2.4	<i>Hubs</i>	109
4.1.2.5	<i>Switches</i>	110
4.1.3	Topologias Lógicas das LANs	111
4.1.3.1	<i>Ethernet</i>	111
4.1.3.2	Família <i>Ethernet</i>	112
4.2	REDES WAN	116

4.2.1	Dispositivos de <i>Hardware</i> das WANs	117
4.2.1.1	Roteadores	117
4.2.1.2	<i>Gateways</i>	118
4.3	PROTOCOLOS	119
4.3.1	Modelo ISO/OSI	119
4.4	ARQUITETURA <i>INTERNET</i> , TCP/IP	122
4.4.1	Camadas da Arquitetura TCP/IP	122
4.4.2	Endereçamento IP	124
4.4.2.1	Endereços privados	126
4.4.2.2	Máscara de sub-rede	127
4.5	<i>INTRANET</i>	129
4.6	LANs VIRTUAIS E PRIORIDADE	132
4.7	DESEMPENHO E CONFIABILIDADE DA REDE	136
4.7.1	Características dos Atrasos de Pacote	137
4.7.2	Característica da Perda de Pacotes	138
V.	IEC-61850, UMA NOVA PERSPECTIVA	139
5.1	HISTÓRICO IEC-61850	140
5.2	COMPOSIÇÃO E OBJETIVO	141
5.3	REQUISITOS GERAIS	142
5.4	GERENCIAMENTO DO PROJETO E SISTEMA	143
5.5	REQUISITOS DE COMUNICAÇÃO	146
5.5.1	Nó Lógico, LN	147
5.6	LINGUAGEM DE CONFIGURAÇÃO	151
5.7	ESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO	154
5.7.1	Serviço de Interface de Comunicação Abstrata, ACSI	154
5.7.2	Classe Comum de Dados, CDC	156
5.7.3	Compatibilidade entre Nós Lógicos e Classes de Dados	159
5.8	MAPEAMENTO DE SERVIÇOS DE COMUNICAÇÃO ESPECÍFICOS	160
5.8.1	Pilha de Protocolos e Tipos de Mensagem	160
5.8.2	Mensagens GOOSE	163
5.8.2.1	Seleção de endereço <i>multicast</i>	164
5.9	<i>MERGING UNIT</i>	164
5.10	SISTEMA DE TESTE BASEADO NO IEC-61850	165
VI.	INFRA-ESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO LSEE	167
6.1	PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO DA REDE DE COMUNICAÇÃO	168
6.1.1	Planejamento da Rede de Comunicação de Dados	168
6.1.2	Projeto da Rede de Comunicação	170
6.1.2.1	Levantamento de demanda	170
6.1.2.2	A configuração proposta, <i>lay-out</i> da rede	172

6.1.2.3	Escolha da solução de cabeamento estruturado	175
6.1.2.4	Ocupação dos armários de telecomunicações e planta da SEQ	177
6.1.2.5	Quantidade de materiais.....	178
6.1.3	Implementação do Projeto.....	179
6.1.3.1	Identificação física e lógica	181
6.1.3.2	Fase de testes do cabeamento.....	185
6.1.3.3	Ativação da rede.....	188
VII.	APLICAÇÕES DESENVOLVIDAS	189
7.1	LÓGICA PARA CONTROLE DE <i>BAY</i> DISPONDO DE ENLACES PARA COMUNICAÇÃO DE DADOS	190
7.1.1	Topologia física e operação do <i>bay</i>	191
7.1.2	Programação de Controle e Supervisão Desenvolvida	193
7.1.3	Arranjo do Ensaio.....	197
7.1.4	Enlaces para Comunicação de Dados	198
7.1.5	Testes Realizados na IHM Local e Via Enlaces de Comunicação	201
7.1.6	Controle de <i>Bay</i> no Contexto do Padrão IEC-61850	203
7.1.6.1	Especificação funcional do <i>bay</i> segundo o padrão IEC-61850.....	203
7.1.6.2	Topologia física e lógica para a rede de comunicação de dados	204
7.1.6.3	Requisitos para adaptação física dos equipamentos	205
7.1.6.4	Necessidade de adaptação das lógicas propostas	206
7.1.6.5	Mapeamento das informações enviadas e recebidas.....	206
7.1.6.6	Tipo de nó lógico (LN) utilizado	207
7.1.6.7	Descrição do serviço de interface de comunicação abstrata (ASCI).....	207
7.1.6.8	Descrição da classe de dados comum (CDC).....	208
7.1.6.9	Identificação da anatomia do nó lógico GGIO	208
7.1.6.10	Tipo de mensagem.....	209
7.1.6.11	<i>DataSet</i> e anatomia geral do objeto.....	209
7.1.6.12	Configuração do serviço de mensagens GOOSE.....	210
7.1.6.13	Atribuição da estrutura de dados as lógicas desenvolvidas	211
7.1.6.1	Testes realizados no contexto do padrão IEC-61850	215
7.1.6.2	Análise do atraso de propagação de mensagens	217
7.2	COMUTÇÃO AUTOMÁTICA ENTRE FONTES DE ALTA TENSÃO	220
7.2.1	Topologia Física e Operação da Subestação.....	222
7.2.2	Programação de Controle e Supervisão Desenvolvida	225
7.2.2.1	Ajuste e lógica da função de proteção 27	225
7.2.2.2	1º ciclo de comutação.....	229
7.2.2.3	2º ciclo de comutação.....	230
7.2.2.4	Sinalizações para os vãos	231
7.2.3	Arranjo do Ensaio.....	231
7.2.4	Resultados Encontrados	234

7.2.5	Comutação de LTs no Contexto do Padrão IEC-61850	237
7.2.5.1	Especificação funcional dos vãos segundo o padrão IEC-61850.....	237
7.2.5.2	Topologia física e lógica para a rede de comunicação de dados	239
7.2.5.3	Requisitos para adaptação física dos equipamentos	239
7.2.5.4	Necessidade de adaptação das lógicas propostas	240
7.2.5.5	Mapeamento das informações enviadas e recebidas.....	240
7.2.5.6	Tipo de nó lógico (LN) utilizado	241
7.2.5.7	Descrição do serviço de interface de comunicação abstrata (ASCI).....	242
7.2.5.8	Descrição da classe de dados comum (CDC).....	242
7.2.5.9	Identificação da anatomia do nó lógico GGIO	242
7.2.5.10	Tipo de mensagem.....	242
7.2.5.11	<i>DataSet</i> e anatomia geral do objeto.....	242
7.2.5.12	Configuração do serviço de mensagens GOOSE.....	243
7.2.5.13	Atribuição da estrutura de dados às lógicas desenvolvidas	244
7.2.5.14	Testes realizados no contexto do padrão IEC-61850	248
7.2.5.15	Análise do atraso de propagação de mensagens	252
7.3	MONITORAMENTO TEMPORAL E EXTRAVIO DE MENSAGENS GOOSE.....	256
7.3.1	Requisitos da Rede de Comunicação	256
7.3.2	Estrutura Laboratorial	256
7.3.3	Cenários Operativos	259
7.3.3.1	Cenário 1	259
7.3.3.2	Cenário 2	262
7.3.4	Lógica Digital para Criação das Mensagens GOOSE.....	265
7.3.5	Geração de Mensagens GOOSE no Contexto do Padrão IEC-61850	269
7.3.5.1	Mapeamento das informações enviadas e recebidas.....	269
7.3.5.2	Tipo de nó lógico (LN) utilizado	270
7.3.5.3	Descrição do serviço de interface de comunicação abstrata (ASCI).....	270
7.3.5.4	Descrição da classe de dados comum (CDC).....	270
7.3.5.5	Tipo de mensagem.....	270
7.3.5.6	Anatomia geral do objeto	271
7.3.5.7	Configuração do serviço de mensagens GOOSE.....	271
7.3.5.8	Atribuição da estrutura de dados a lógica desenvolvida	272
7.3.6	Desempenho e Confiabilidade dos Cenários Propostos.....	277
7.3.6.1	Coleta de dados para o cenário 1	277
7.3.6.2	Coleta de dados para o cenário 2	279
7.3.6.3	Tratamento dos dados para o cenário 1	280
7.3.6.4	Tratamento dos dados para o cenário 2	284
7.3.6.5	Inferência para o cenário 1	285
7.3.6.6	Inferência para o cenário 2	289

7.3.6.7	Impacto no atraso médio (D) entre <i>port</i> VLAN e <i>frame tagging</i>	290
7.3.7	Interoperabilidade e Intercambialidade	292
VIII.	CONCLUSÕES	295
8.1	PONTOS DE CONTINUIDADE DA PESQUISA	299
	Referências Bibliográficas	301
	Apêndice A – Publicações Realizadas.....	313

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Pontos notáveis do SEP	43
Figura 2 – Princípios de eficácia de um Sistema de Proteção (SP).....	45
Figura 3 – Subsistemas de um SP	45
Figura 4 – Sistema de proteção típico com suas devidas zonas de proteção	47
Figura 5 – Limites de zonas de proteção	47
Figura 6 – Limites de zona e zona morta	48
Figura 7 – Conceito de proteção principal e proteção de retaguarda.....	49
Figura 8 – Proteção de transformador com relé multifuncional	51
Figura 9 – Relé de sobrecorrente eletromecânico do tipo disco de indução.....	52
Figura 10 – Relé estático de distância.....	53
Figura 11 – Principais subsistemas de um Relé Digital.....	54
Figura 12 – Exemplo de aplicações do relé digital: diversas filosofias e funções da proteção.....	55
Figura 13 – Níveis hierárquicos na subestação	56
Figura 14 – Conexões na rede <i>Ethernet</i> da subestação La Venta II.....	70
Figura 15 – Ilustração de um sistema de supervisão, controle e proteção.....	74
Figura 16 – Modelo genérico de comunicação	76
Figura 17 – Modelo genérico de comunicação aplicado ao SEP	78
Figura 18 – Sistema <i>simplex</i>	80
Figura 19 – Sistema <i>half-duplex</i>	80
Figura 20 – Sistema <i>duplex</i>	80
Figura 21 – Transmissão paralela com um fio para cada <i>bit</i>	81
Figura 22 – Transmissão serial, um fio para todo o <i>byte</i>	81
Figura 23 – Representação de dois caracteres numa transmissão assíncrona.....	82
Figura 24 – Representação ilustrativa de uma transmissão serial síncrona.....	82
Figura 25 – Técnicas básicas de modulação do sinal digital.....	83
Figura 26 – Técnicas básicas de codificação do sinal digital	84
Figura 27 – Esquema básico da proteção com Fio Piloto.....	85

Figura 28 – Diagrama representativo de transmissão via Onda Portadora.....	86
Figura 29 – Cabo de Fibra Óptica	88
Figura 30 – Diagrama representativo de transmissão via cabo dielétrico de Fibra Óptica.....	88
Figura 31 – Fibra multimodo índice degrau e índice gradual, respectivamente.....	89
Figura 32 – Fibra monomodal.....	89
Figura 33 – Cabo OPGW	91
Figura 34 – Diagrama representativo de transmissão via cabo OPGW	91
Figura 35 – Diagrama representativo de transmissão via Microondas	92
Figura 36 – Localização da interface digital.....	93
Figura 37 – Componentes físicos de uma interface digital	93
Figura 38 – Cabos com conectores de 25 pinos (DB-25) e 9 pinos (DB-9)	95
Figura 39 – Seqüência básica de sinalizações na interface.....	97
Figura 40 – Cabo crossover com interface RS-232 e conector mecânico DB-9.....	98
Figura 41 – Sistema de controle e proteção baseado em sistema de comunicação e redes	103
Figura 42 – Topologia em barramento	104
Figura 43 – Topologia em estrela	105
Figura 44 – Topologia em anel.....	105
Figura 45 – Placa de rede efetuando a conversão de dados.....	107
Figura 46 – Exemplo de uso de repetidores.....	108
Figura 47 – Esquema de aplicação de uma <i>bridge</i>	109
Figura 48 – <i>Hub</i> , topologia física e lógica	109
Figura 49 – <i>Switch</i> , topologia física e lógica.....	110
Figura 50 – Metcalf e o conceito da rede <i>Ethernet</i>	111
Figura 51 – Cabeamento de rede coaxial e conectores BNC	112
Figura 52 – Conexões de uma rede <i>Thicknet</i> ou AUI.....	113
Figura 53 – Montagem de cabo par trançado, UTP (<i>Unshielded Twisted Pair</i>).....	113
Figura 54 – Topologia em malha, conexão do MP com todos os demais na rede	117
Figura 55 – Tráfego de dados entre Roteadores.....	118
Figura 56 – <i>Gateway</i> como conversor de protocolos no SEP	118
Figura 57 – Camadas de rede – RM-OSI, alocação de dispositivos ativos.....	121
Figura 58 – Comparação das camadas do modelo RM-OSI e TCP/IP	124
Figura 59 – Exemplo de aplicação do endereçamento IP	125
Figura 60 – Exemplo de representação IP do endereço de rede e endereço de dispositivo, Classe C... 126	
Figura 61 – Diagnostico com endereço 127.0.0.1	127
Figura 62 – Exemplo de uso da máscara de sub-rede.....	129
Figura 63 – Arquitetura de rede, um e dois níveis, interno e externo.....	130
Figura 64 – Parâmetros de comparação para escolha da rede.....	132
Figura 65 – Exemplo de uso das VLANs.....	132
Figura 66 – Adição da identificação (<i>tag</i>) ao quadro MAC.....	133

Figura 67 – Trecho do quadro MAC (rede <i>Ethernet</i> padrão) com identificação (<i>tag</i>) no cabeçalho ...	134
Figura 68 – Protocolos no ambiente de automação.....	139
Figura 69 – Estrutura do SAS e seu ambiente	144
Figura 70 – Níveis e interfaces lógicas no SAS.....	146
Figura 71 – Noção de conexão e Nó Lógico (LN).....	147
Figura 72 – Modelo de dados.....	148
Figura 73 – Nó lógico XCBR.....	150
Figura 74 – Estrutura da linguagem de configuração da subestação	152
Figura 75 – Fragmento de um arquivo SCL.....	152
Figura 76 – Arquitetura do sistema de configuração que utiliza linguagem SCL.....	153
Figura 77 – Método de comunicação ACSI	155
Figura 78 – Estrutura do LN, tipo de informação e atributos	157
Figura 79 – Representação simplificada da pilha de protocolos IEC-61850	162
Figura 80 – A mensagem GOOSE para identificação do IED.....	163
Figura 81 – Exemplo de uma MU no barramento de processo.....	165
Figura 82 – Laboratório de sistemas de energia elétrica, LSEE, 2008.....	167
Figura 83 – Sistema básico e o tipo de tráfego planejado	169
Figura 84 – Distribuição dos ambientes: Nó A, Nó B e <i>backbone</i> , LSEE.....	171
Figura 85 – <i>Lay-out</i> sumarizado da rede de comunicação de dados, LSEE	173
Figura 86 – Estrutura do cabeamento estruturado da rede, LSEE.....	176
Figura 87 – Diagrama unifilar tipo 1, LSEE	177
Figura 88 – Ocupação dos armários de telecomunicações, LSEE.....	177
Figura 89 – Esboço da planta da sala de equipamentos, LSEE	178
Figura 90 – Ambiente LSEE, 1º semestre/2006.....	179
Figura 91 – Fases de implantação da infra-estrutura de comunicação, LSEE, 2007/2008.....	180
Figura 92 – Instalação do cabeamento (cordões de fibra óptica e cabos UTP), LSEE	181
Figura 93 – Exemplos de pontos possíveis de identificação no cabeamento do LSEE	182
Figura 94 – Exemplo da identificação lógica da rede, LSEE.....	184
Figura 95 – <i>Cable Tester</i> NS-468, LSEE	185
Figura 96 – Medição de perda de potência óptica (analisador de espectro: Anritsu MS9710A)	186
Figura 97 – Infra-estrutura de comunicação de dados e redes de computadores, LSEE, 2009.....	188
Figura 98 – Exemplo de <i>bay</i> – Pátio de 138 kV em subestação industrial.....	190
Figura 99 – Migrar do controle convencional para controle por relés digitais.....	191
Figura 100 – <i>Bay</i> em estudo.....	191
Figura 101 – Montagem inicial do ensaio	193
Figura 102 – Lógica de comando, intertravamento e supervisão para o disjuntor DJ-1	194
Figura 103 – Lógica de comando, intertravamento e supervisão para a chave CS-1	195
Figura 104 – Lógica de comando, intertravamento e supervisão para a chave CS-2	196
Figura 105 – Lógica de comando, intertravamento e supervisão para a chave CST-1.....	196

Figura 106 – Arranjo do ensaio – Controle de <i>bay</i>	197
Figura 107 – Programação para o simulador de equipamentos biestáveis (DJ-1).....	197
Figura 108 – Conexões elétricas realizadas, sendo [] Saída Digital e ()Entrada Digital	198
Figura 109 – Enlace para acesso remoto em linha discada.....	199
Figura 110 – Enlace para acesso remoto em linha dedicada	200
Figura 111 – Enlace para acesso remoto via rede local	201
Figura 112 – Implementação do controle de <i>bay</i> no LSSE (EESC/USP), 2006	202
Figura 113 – Descrição funcional do controle de <i>bay</i> conforme o padrão IEC-61850	204
Figura 114 – Topologia física e lógica estabelecida	205
Figura 115 – Comunicação entre IEDs através de fiação rígida, LSEE (Controle de <i>bay</i>), 2006	205
Figura 116 – Nó lógico GGIO: dado de indicação geral e atributos booleanos	207
Figura 117 – Modelo de um IED	209
Figura 118 – Atribuição dos pontos virtuais a lógica do disjuntor DJ-1.....	211
Figura 119 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica do disjuntor DJ-1.....	212
Figura 120 – Atribuição da estrutura do LN GGIO ₁ a entrada virtual 01 (simulação do DJ-1)	212
Figura 121 – Atribuição da estrutura do LN GGIO ₁ as entradas virtuais, lógica da CS-1	214
Figura 122 – Atribuição da estrutura do LN GGIO ₁ as entradas virtuais, lógica da CS-2	215
Figura 123 – Atribuição da estrutura do nó lógico GGIO ₁ as entradas virtuais, lógica da CST-1	215
Figura 124 – Comunicação entre IEDs com o padrão IEC-61850, LSEE (Controle de <i>bay</i>), 2007	216
Figura 125 – Atraso de propagação entre fiação paralela e mensagens GOOSE, controle de <i>bay</i>	219
Figura 126 – Características da interrupção sustentada, subtensão e sobretensão	221
Figura 127 – Estrutura funcional proposta para a subestação industrial.....	223
Figura 128 – Ligação dos TPs em estrela.....	224
Figura 129 – Curva de atuação para a função 27, subtensão e interrupção.....	225
Figura 130 – Descrição genérica para a função de subtensão, estágio U<	226
Figura 131 – Descrição genérica para a função de subtensão, estágio U<<	227
Figura 132 – Lógica de ajuste para detecção de subtensão e interrupção na LT-1	228
Figura 133 – Lógica de ajuste para detecção de subtensão e interrupção na LT-2.....	228
Figura 134 – Lógica referente ao 1º ciclo de comutação	229
Figura 135 – Lógica referente ao 2º ciclo de comutação	230
Figura 136 – Sinalizações do vão 1	231
Figura 137 – Arranjo do ensaio realizado – comutação de linhas de transmissão.....	232
Figura 138 – Programação para o simulador de equipamentos biestáveis (DJ-1.1)	232
Figura 139 – Conexões elétricas realizadas, sendo [] Saída Digital e ()Entrada Digital	233
Figura 140 – Implementação da comutação de LTs no LSSE (EESC/USP), 2007.....	237
Figura 141 – Descrição funcional dos vãos segundo o padrão IEC-61850	238
Figura 142 – Topologia física e lógica estabelecida	239
Figura 143 – Comunicação entre IEDs através de fiação rígida, LSEE (Comutação de LTs), 2007....	240
Figura 144 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica: função de proteção 27 ...	246

Figura 145 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica: 1º ciclo de comutação ...	246
Figura 146 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica: 2º ciclo de comutação ...	247
Figura 147 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica: sinalização	248
Figura 148 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO: simulador (DJ-1.1 e DJ-1.2)	248
Figura 149 – Comunicação entre IEDs com o padrão IEC-61850, LSEE (Comutação LTs), 2008	252
Figura 150 – Atraso de propagação entre fiação paralela e mensagens GOOSE, controle de <i>bay</i>	255
Figura 151 – Configuração da estrutura laboratorial, LSEE	257
Figura 152 – Configuração do cenário operativo 1	260
Figura 153 – Aplicativo de <i>software WAN Killer</i> ®, versão 9.2.0.47	261
Figura 154 – Tráfego extra, coletado pelo <i>software SNMP Real-Time Graph</i> ®, versão 9.2.0.47	261
Figura 155 – Configuração do cenário de rede 2	263
Figura 156 – Lógica digital para geração de mensagens GOOSE, IED 1	266
Figura 157 – Comportamento das saídas da lógica para geração de mensagens GOOSE	268
Figura 158 – Sinalizações dos IEDs 2 e 3	269
Figura 159 – Alteração na lógica de sinalização dos IEDs 2 e 3	274
Figura 160 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO, lógica de geração das mensagens	275
Figura 161 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para as sinalizações, IEDs 2 e 3	276
Figura 162 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para o envio de mensagens paralelas ...	276
Figura 163 – Trecho do <i>log</i> de eventos, IED 1 (cenário 1)	278
Figura 164 – Aplicativo de <i>software Input Analyser/Arena</i> ®, versão 11	281
Figura 165 – Tempos médios entre IEDs para 1ª rodada; baixa prioridade; cenário 1	285
Figura 166 – Perda de pacotes para 1ª rodada; baixa prioridade; cenário 1	286
Figura 167 – Tempos médios entre IEDs para 2ª rodada; baixa prioridade; cenário 1	287
Figura 168 – Perda de pacotes para 2ª rodada; baixa prioridade; cenário 1	288
Figura 169 – Diferença média entre os atrasos no que tange a configuração de prioridade	288
Figura 170 – Tempos médios entre IEDs para o cenário 2	289
Figura 171 – Tempos médios entre IEDs, cenário 2 alterado: <i>frame tagging</i> , prioridade 7 (alta)	291
Figura 172 – Interoperabilidade entre fabricantes distintos, seção 7.3, monitoramento temporal	293
Figura 173 – Intercambialidade dos IEDs de fabricantes distintos nas seções 7.1 e 7.2	293

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Alguns agentes causadores de distúrbios externos e internos.....	44
Tabela 2 – Trecho da padronização C37.2-1996 IEEE/ANSI, Funções de Proteção	50
Tabela 3 – Exemplo do volume de informações que chegam aos centros de operação.....	75
Tabela 4 – Código ASCII com 7 <i>bits</i>	79
Tabela 5 – Níveis de tensão dos sinais da interface RS-232	95
Tabela 6 – Características funcionais definidas pelo padrão EIA/TIA-232-E e V.24, ITU-T.....	96
Tabela 7 – Suplemento com as cláusulas de alteração na família <i>Ethernet</i>	115
Tabela 8 – Canais de comunicação para Redes WAN.....	116
Tabela 9 – Camadas definidas com descrição de funções básicas, RM-OSI	121
Tabela 10 – Alguns protocolos da camada de aplicação, TCP/IP	123
Tabela 11 – Alguns protocolos da camada de transporte, TCP/IP	123
Tabela 12 – Alguns protocolos da camada de inter-Rede ou <i>internet</i> , TCP/IP	123
Tabela 13 – Alguns protocolos da camada de interface de Rede, TCP/IP	124
Tabela 14 – Máscaras de sub-rede padrão.....	128
Tabela 15 – Classe de tráfego, IEEE 802.1D-1998	135
Tabela 16 – Classes de tráfego e número de filas	135
Tabela 17 – Documentos que definem o padrão IEC-61850	141
Tabela 18 – Grupo de LN.....	149
Tabela 19 – Arquivos de configuração da SCL.....	151
Tabela 20 – CDCs citadas no padrão IEC-61850 parte 7.3.....	156
Tabela 21 – Exemplo de definição dos tipos de atributos	157
Tabela 22 – Anatomia de uma classe de proteção ativa (ACT), funcionalidade de estado	158
Tabela 23 – Anatomia do nó lógico (XCBR), Disjuntor	159
Tabela 24 – Combinações de serviços dos protocolos, padrão IEC-61850 parte 8.1.....	161
Tabela 25 – Tipos de mensagem e classes de desempenho	162
Tabela 26 – Exemplo de endereço <i>multicast</i> recomendado.....	164
Tabela 27 – Demanda de pontos	170

Tabela 28 – Algumas perguntas tradicionais durante o levantamento de demanda da rede	172
Tabela 29 – Principais elementos constituintes da estrutura laboratorial, LSEE	174
Tabela 30 – Quantificação resumida de materiais, projeto de rede LSEE	179
Tabela 31 – Tabela de orientação dos cabos e cordões.....	183
Tabela 32 – Resultados das medições com o analisador de espectro.....	186
Tabela 33 – Manobras realizadas na IHM local e via enlaces de comunicação	202
Tabela 34 – Informações a serem enviadas ou recebidas	206
Tabela 35 – Definição da classe de dados comum SPS	208
Tabela 36 – Trecho da anatomia do LN GGIO.....	208
Tabela 37 – Configuração do serviço de mensagens GOOSE.....	211
Tabela 38 – Mapeamento das atribuições de dados do nó lógico GGIO aos pontos virtuais no IED ₁	213
Tabela 39 – Mapeamento das atribuições de dados do nó lógico GGIO aos pontos virtuais no IED ₂	213
Tabela 40 – Manobras realizadas via IHM local e enlaces de comunicação	216
Tabela 41 – Tempos entre a sensibilização das saídas e entradas digitais, via fiação paralela	217
Tabela 42 – Tempos entre a sensibilização das saídas e entradas virtuais, via mensagens GOOSE.....	218
Tabela 43 – Conjunto de fenômenos relacionados (VTLD).....	220
Tabela 44 – Série de testes relativos ao 1º ciclo de comutação.....	235
Tabela 45 – Série de testes relativos ao 2º ciclo de comutação.....	236
Tabela 46 – Informações a serem enviadas ou recebidas	241
Tabela 47 – Configuração do serviço de mensagens GOOSE.....	243
Tabela 48 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais do IED 1.1	244
Tabela 49 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais do IED 1.2	245
Tabela 50 – Série de testes relativos ao 1º ciclo de comutação, via mensagens GOOSE.....	250
Tabela 51 – Série de testes relativos ao 2º ciclo de comutação, via mensagens GOOSE.....	251
Tabela 52 – Tempos entre a sensibilização das saídas e entradas digitais, via fiação paralela	253
Tabela 53 – Tempos entre a sensibilização das saídas e entradas virtuais, via mensagens GOOSE.....	254
Tabela 54 – Principais características dos elementos constituintes da estrutura laboratorial.....	258
Tabela 55 – Configurações gerais para o cenário 1.....	262
Tabela 56 – Configurações gerais para o cenário 2.....	264
Tabela 57 – Informações a serem enviadas ou recebidas	270
Tabela 58 – Configuração do serviço de mensagens GOOSE.....	271
Tabela 59 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais no IED 1	272
Tabela 60 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais no IED 2	272
Tabela 61 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais no IED 3	273
Tabela 62 – Exemplo de mapeamento para transmissão paralela de 8 mensagens GOOSE _{1.1.1}	273
Tabela 63 – Taxa de tráfego extra para cada conjunto de Teste _z	277
Tabela 64 – Trecho do <i>log</i> de eventos, IED 1 (cenário 1), <i>asserte (on)</i> e <i>deasserted (off)</i>	278
Tabela 65 – Número de mensagens GOOSE simultâneas por conjunto de Teste _z	279
Tabela 66 – Trecho do <i>log</i> de eventos, IED 1 (cenário 2): envio de 10 mensagens simultâneas	280

Tabela 67 – Trecho do relatório gerado e a detecção da perda de uma mensagem	281
Tabela 68 – Atraso médio (D) da 1 ^a rodada, cenário 1, prioridade baixa	282
Tabela 69 – Atraso médio (D) da 2 ^a rodada, cenário 1, prioridade alta	284
Tabela 70 – Atraso médio (D), cenário 2; prioridade alta; taxa de tráfego extra em 95%	284
Tabela 71 – Atraso médio (D) do cenário 2 alterado: <i>frame tagging</i> , prioridade 7 (alta)	291
Tabela 72 – Inferência dos cenários operativos	298

Lista de Siglas e Abreviaturas

A - <i>Profile</i> – <i>Application Profile</i>	160
AC – Corrente Alternada	85
ACSI – Serviços de Interface de Comunicação Abstrata	141
ACT – <i>Protection Activation Information</i>	158
AMI – <i>Alternate Mark Inversion</i>	84
ANSI – <i>American National Standards Institute</i>	50
ARP – <i>Address Resolution Protocol</i>	123
ARPA – <i>Advanced Research Project Agency</i>	120
ASCII – <i>American Standard Code for Information Interchange</i>	79
ASK – <i>Amplitude Shift Keying</i>	83
AT – Armário de Telecomunicações	176
ATM – <i>Asynchronous Transfer Mode</i>	76
AUI – <i>Attachment User Interface</i>	112
AVAG – <i>Atel Versorgungs AG</i>	68
AWG – <i>American Wire Gauge</i>	172
BA – Bobina de Abertura.....	194
BCS – <i>Building Cabling System</i>	175
BE – <i>Best Effort</i>	135
BELL – <i>Bell Telephone Laboratories Inc</i>	94
BF – Bobina de Fechamento	194
BK – <i>Background</i>	135
BP – Barramento de Processo	57
BS – Barramento de Subestação.....	57
BSC – <i>Binary Synchronous Communications</i>	76
CA <i>rms</i> – <i>Alternating Current, root mean square</i>	220

CAN – <i>Cancel</i> , Cancelamento.....	79
CASM – <i>Common Application Service Models</i>	66
Cat. – Categoria.....	114
CCITT – <i>International Telegraph and Telephone Consultative Committee</i>	94
CDC – Classe de Dados Comun.....	141
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.....	71
CF – Configuração.....	158
CFE – <i>Comisión Federal de Electricidad</i>	69
CFI – <i>Canonical Format Identifier</i>	134
CID – <i>Configured IED Description</i>	151
CL – <i>Controlled Load</i>	135
CLP – Controlador Lógico Programável	190
CNOS – Centro Nacional de Operação do Sistema Elétrico.....	75
CO – Controle.....	158
COS – Centro de Operação do Sistema Elétrico	75
COSR – Centro Regional de Operação do Sistema Elétrico	75
COSR-N – Centro Regional de Operação do Sistema Elétrico, Norte	75
COSR-NE – Centro Regional de Operação do Sistema Elétrico, Nordeste.....	75
COSR-S – Centro Regional de Operação do Sistema Elétrico, Sul	75
COSR-SE – Centro Regional de Operação do Sistema Elétrico, Sudeste	75
CRC – <i>Control Redundancy Check</i>	82
CS – Chave Seccionadora de Linha	191
CSMA/CD – <i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection</i>	111
CST – Chave Seccionadora de Aterramento	191
CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista	66
CTS – <i>Clear to Send</i>	97
DC – Corrente Contínua	85
DCD – <i>Data Carrier Detected</i>	97
DG – Distribuidor Geral.....	200
DJ –Disjuntor	45
DL – Dispositivo Lógico.....	148
DNP – <i>Distributed Network Protocol</i>	65
DSR – <i>Data Set Ready</i>	96
DTR – <i>Data Terminal Ready</i>	96
ECD – Equipamento de Comunicação de Dados	76
EE – <i>Excellent Effort</i>	135
EESC – Escola de Engenharia de São Carlos.....	59

EIA – <i>Eletronic Industries Association</i>	64
EMC – <i>Compatibilidade Eletromagnética</i>	258
EMI – <i>Interferência Eletromagnética</i>	53
EOT – <i>End of Tape</i> , Fim de Transmissão	79
EPRI – <i>Electric Power Research Institute</i>	140
ETD – <i>Equipamento Terminal de Dados</i>	76
ETX – <i>End of Text</i>	79
FB – <i>Fiber Backbone</i>	114
FC – <i>Functional constraints</i>	158
FL – <i>Fiber Link</i>	114
FOIRL – <i>Fiber Optic Inter-Repeater Link</i>	114
FP – <i>Fiber Passive</i>	114
FSK – <i>Frequency Shift Keying</i>	83
FTP – <i>File Transfer Protocol</i>	123
GGIO – <i>Generic Function References, Generic Process I/O</i>	207
GOMSFE – <i>Generic Object Models for Substation and Feeder Equipment</i>	64
GOOSE – <i>Generic Object Oriented Substation Event</i>	60
GOOSE_{x,y,z} – <i>Mensagem GOOSE Indicando um Pulso do Conjunto de Teste_z</i>	267
GPS – <i>Global Positioning System</i>	169
GSE – <i>Generic Substation Event</i>	161
GSSE – <i>Generic Substation Status Event</i>	161
HDB3 – <i>High Density Bipolar 3 Zeros</i>	84
HDLC – <i>High Level Data Link Control</i>	76
HTTP – <i>Hyper Text Transfer Protocol</i>	123
IAB – <i>Internet Activities Board</i>	122
IBCS – <i>Integrated Building Cabling System</i>	175
ICD – <i>IED Capability Description</i>	151
ICMP – <i>Internet Control Message Protocol</i>	123
IEC – <i>International Electrotechnical Commission</i>	58
IED – <i>Dispositivos Eletrônicos Inteligentes</i>	54
IEEE – <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	50
IF – <i>Interface</i>	146
IHM – <i>Interface Homem Máquina</i>	57
Ind – <i>Indicação Geral</i>	207
IP – <i>Internet Protocol</i>	122
IRIG-B – <i>Inter-Range Instrumentation Group Time Codes, B – 100 pulses por second</i>	174
ISDN – <i>Integrated Services Digital Network</i>	116

ISO – <i>International Organization for Standardization</i>	94
ITU-T – <i>Telecommunication Standardization Sector, International Telecommunications Union</i>	94
LAN – <i>Local Area Network</i>	61
LASER – <i>Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation</i>	88
LC – <i>Logical Connections</i>	147
LED – <i>Light Emitting Diode</i>	88
LN – <i>Logical Nodes</i>	147
LPCD – <i>Linha Privativa de Comunicação de Dados</i>	64
LSEE – <i>Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica</i>	59
LT – <i>Linha de Transmissão</i>	222
M/O/C – <i>Mandatário, Opcional ou Condicional</i>	159
MAC – <i>Medium Access Control</i>	107
MAN – <i>Metropolitan Area Network</i>	103
MIB – <i>Management Information Base</i>	300
MMS – <i>Manufacturing Message Specification</i>	160
MP – <i>Módulo Processador</i>	101
MTBF – <i>Medium Time Between Failures</i>	131
MTTR – <i>Medium Time to Repair</i>	131
MU – <i>Merging Unit</i>	164
MX – <i>Medição de valores analógicos</i>	158
NBR – <i>Norma Brasileira</i>	174
NC – <i>Network Control</i>	134
NIC – <i>Network Interface Card</i>	106
NRZ – <i>Non Return to Zero</i>	84
ONS – <i>Operador Nacional do Sistema</i>	48
OPGW – <i>Optical Ground Wires</i>	64
OPLAT – <i>Onda Portadora sobre Linha de Alta Tensão</i>	86
OSI – <i>Open Systems Intercon</i>	61
OSPF – <i>Open Shortest Path First</i>	123
PABX – <i>Private Automatic Branch Exchange</i>	175
PB – <i>Botão</i>	194
PC – <i>Physical Connections</i>	147
PD – <i>Physical Devices</i>	147
PDS – <i>Processador Digital de Sinais</i>	56
PIT – <i>Plano de Inspeção e Testes</i>	71
PP – <i>Patch Panel</i>	182
pps – <i>Pacotes por Segundo</i>	258

PR – Pára-Raios	222
PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.....	220
PROM – <i>Programmable Read-Only Memory</i>	107
PSK – <i>Phase Shift Keying</i>	83
PT – Ponto de Telecomunicações	176
QE – Qualidade de Energia	44
QoS – Qualidade de Serviço	61
RFC – <i>Request for Comments</i>	122
RIP – <i>Routing Information Protocol</i>	123
RM-OSI – <i>Reference Model – Open Systems Interconnection</i>	120
RS-232 – <i>Recommended Standard 232</i>	94
RTP – Transformação de Potencial	234
RTS – <i>Request to Send</i>	97
RTT – <i>Round Trip Time</i>	136
RZ – <i>Return to Zero</i>	84
SAS – Sistema de Automação de Subestações.....	56
SCADA – <i>Supervisory Control and Data Aquisition</i>	57
SCD – <i>Substation Configuration Description</i>	151
SCL – <i>Substation Configuration Language</i>	66
SDLC – <i>Synchronous Data Link Control</i>	76
SEP – Sistema Elétrico de Potência	43
SEQ – Sala de Equipamentos	176
SET – Sala de Entrada de Telecomunicações.....	176
SG – Disjuntores e Chaves Seccionadoras	57
SLAN – Rede Local de Subestação	58
SMTP – <i>Simple Mail Transfer Protocol</i>	123
SNMP – <i>Simple Network Management Protocol</i>	123
SNTP – <i>Simple Network Time Protocol</i>	162
SP – Sistema de Proteção	45
SPS – <i>Single Point Status</i>	208
SSD – <i>System Specification Description</i>	151
ST – <i>Status</i>	207
ST, Connector – <i>Twist-Lock, Connector</i>	174
STP – <i>Shielded Twisted Pair</i>	114
stVal – Valor de Estado do dado <i>Ind</i>	207
STX – <i>Start of Text</i>	79
SV – Valor amostrado.....	158

SYN – <i>Synchronous</i>	79
T - Profile – <i>Transport Profile</i>	160
T/R – Transmissor e Receptor <i>Carrier</i>	86
TC – Transformador de Corrente.....	45
TCI – <i>Tag Control Information</i>	134
TCP – <i>Transmission Control Protocol</i>	122
TCP/IP – <i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>	61
Telnet – <i>Terminal Emulation</i>	123
Teste_z – Conjunto de Teste.....	265
TIA – <i>Telecommunications Industry Association</i>	94
TP – Transformador de Potencial	45
TPID – <i>Tag Protocol Identifier</i>	134
TrgOp – <i>Trigger Option</i>	158
TVA – <i>Tennessee Valley Authority</i>	70
U COM – Unidade de comunicação	57
UC – Unidade de controle	57
UCA – <i>Utility Communications Architecture</i>	64
UCS – Unidade de Controle da Subestação	57
UDP – <i>User Datagram Protocol</i>	123
UHF – <i>Ultra High Frequency</i>	92
UP – Unidade de proteção.....	57
USB – <i>Universal Serial Bus</i>	99
USP – Universidade de São Paulo.....	59
UTP – <i>Unshielded Twisted Pair</i>	113
UTR – Unidade Terminal Remota.....	75
VI – Vídeo.....	134
VLAN – Virtual LAN	61
VO – Voz	134
VTLD – Variação de Tensão de Longa Duração	220
WAN – <i>Wide Area Network</i>	61
XML – <i>eXtender Markaup Language</i>	66

Lista de Símbolos

() – Entrada Digital.....	198
[] – Saída Digital.....	198
$ \mathbf{V}_A , \mathbf{V}_B , \mathbf{V}_C $ – Fases da Linha.....	226
$+\mathbf{V}_{\text{sat}}$ – Saturação Positiva.....	227
$\textcircled{\mathbf{R}}$ – Marca Registrada.....	259
$1\emptyset\mathbf{A}$ – Fase A.....	235
$1\emptyset\mathbf{B}$ – Fase B.....	235
$1\emptyset\mathbf{C}$ – Fase C.....	235
$3\emptyset$ – Trifásico(a).....	235
$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ – Fases da Linha.....	224
C_v – Coeficiente de Variação.....	138
$\mathbf{D}$ – Atraso Médio.....	137
d_i – Atraso da Amostra i	137
$\mathbf{F}$ – <i>Functions</i>	147
$\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$ – Terminais Primários do TP.....	224
$\mathbf{J}$ – <i>Jitter</i>	138
$\mathbf{L}$ – <i>Led</i>	195
$\mathbf{N}$ – Número Total de Amostras ou Pacotes.....	137
$\mathbb{N}$ – Números Naturais.....	210
N_L – Número de Pacotes Perdidos.....	138
$\emptyset$ – Fase.....	55
q – <i>Quality</i>	207
$\mathbf{Q}$ – Saída do <i>Flip-Flop</i>	198
$\mathbf{R}$ – <i>Reset, Flip-Flop</i>	214
$\mathbf{S}$ – <i>Set, Flip-Flop</i>	214

T < – Tempo de Atuação para U<.....	225
T << – Tempo de Atuação para U<<.....	225
TM – <i>Trade Mark</i>	127
U < – Valor de Referência para Subtensão	225
U << – Valor de Referência para Interrupção.....	225
V _N – Tensão Nominal	226
-V _{sat} – Saturação Negativa.....	227
x – Número que Identifica a Saída do Pulso	267
X ₁ , X ₂ – Terminais Secundários do TP	224
y – Número que Identifica o Pulso	267
z – Número do Conjunto (ou, Último Conjunto) de Teste em Execução	267

Unidades de Medida

μm – Micrometro	89
μs – Microsegundo	199
bps – <i>Bits</i> por segundo.....	82
cm – Centímetro	90
dB – Decibel.....	89
dBm – Medição do nível de potência em relação a referência: 1 milliwatt.	187
Gbps – Gigabit por segundo.....	70
GHz – Gigahertz.....	89
GWh – Gigawatt hora.....	69
h:m:s – Hora: Minuto: Segundo.....	217
Hz – Hertz.....	85
KB – Quilobytes	258
kg – Quilograma.....	90
kHz – Quilohertz	86
km - Quilômetro	68
kV – Quilovolt	68
Mbps – Megabit por segundo.....	67
MHz – Megahertz.....	89
mm² – Milímetro Quadrado	172
ms – Milissegundo	66
MW – Megawatt	70
nm – Nanometro	89
pu – por unidade.....	220
s – segundo	229
U – Unidade de Altura.....	178

V – Volt	98
Vac – Tensão de Corrente Alternada	175
Vdc – Tensão de Corrente Contínua	198
W – Watt.....	217
Ω – Ohm	99

I. Introdução

À energia elétrica é atribuída a importância de integração do ser humano ao desenvolvimento. Sua utilização em residências, estabelecimentos comerciais, parques industriais, tem implicação direta no aumento da qualidade de vida, acesso a serviços essenciais e no ato ou efeito de progresso econômico de qualquer região, exigindo, neste contexto, complexas infra-estruturas, através das quais esta energia é gerada, transmitida e distribuída (Figura 1). Convencionou-se denominar o conjunto de infra-estruturas como Sistema Elétrico de Potência (SEP) [1].

Figura 1 – Pontos notáveis do SEP
Fonte: [2]

As fontes de energia para o subsistema de geração facultam a função de conversão de alguma forma de energia, como combustíveis fósseis, nucleares ou hidráulicas, em energia elétrica. A energia gerada é transmitida dos centros de produção aos de consumo, onde finalmente são distribuídas para cargas de grandes, médios e pequenos consumidores.

Ao analisar o sistema elétrico é possível verificar que os processos de geração, transmissão e distribuição estão sujeitos a diversos distúrbios que podem afetar sua operação, resultando em interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Estas condições anormais, sua quantidade e intensidade, são substancialmente advindas da ação da natureza, localização geográfica, eventos de causas aleatórias, erro do pessoal de operação e requerimento de carga (Tabela 1). A própria operação normal do sistema gera interferências de natureza elétrica como um subproduto capaz de degradar a energia elétrica [3].

Tabela 1 – Alguns agentes causadores de distúrbios externos e internos

Ação da Natureza	Causas Aleatórias	Operações Normais
Relâmpagos, ventos fortes	Atividades de construção	Surtos de chaveamento
Contato de galhos de árvores	Acidentes envolvendo veículos	Bancos de capacitores
Contato de animais	Falhas de equipamentos	Atividades de manutenção

Fonte: [4]

O efeito dos distúrbios de energia nos equipamentos eletrônicos pode causar, por exemplo, a perda de instruções de programação, alteração na informação de endereços, alteração nas memórias, travamento de processos, falha na composição de imagens, interferência em medições, reinicializações e desligamentos indesejados, acionamento incorreto de dispositivos, além das perdas econômicas, materiais e temporais.

Em cada porção do SEP estão presentes esquemas de controle e proteção planejados para assegurar a continuidade e a qualidade no fornecimento, limitar a duração e frequência de interrupções causadas por condições anormais, além de resguardar os materiais e as instalações da rede.

1.1 Sistema de Proteção do SEP

O sistema de proteção pode ser definido como o conjunto ao qual estão associados todos os mecanismos essenciais para detectar, localizar e comandar a eliminação de um curto-circuito ou uma condição anormal de operação de um sistema elétrico, minimizando os efeitos da deterioração aos equipamentos defeituosos, conseqüente redução de tempo de indisponibilidade e menor custo de reparo [5].

Além dos efeitos da degradação, podem suceder também instabilidades no sistema de potência no caso de falhas ou anomalias sustentadas por tempos acima de determinados limites, especificados para Qualidade de Energia (QE).

A eficiência da proteção situa no mesmo plano as suas capacidades de atuação num tempo pré-estabelecido (velocidade), de restrição da área de interrupção ao mínimo necessário para isolamento do defeito (seletividade), a segurança de pronta atuação, a sensibilidade de atuação em condições anormais do sistema e a confiabilidade de operação correta e exata, exclusivamente nas circunstâncias para as quais foi projetada (Figura 2).

Figura 2 – Princípios de eficácia de um Sistema de Proteção (SP)

1.1.1 Partes Elementares do Sistema de Proteção – Subsistemas

A composição precípua do sistema de proteção identifica como partes elementares, ou subsistemas, os transdutores¹, que são os transformadores de corrente (TCs) e de potencial (TPs), os relés de proteção e equipamentos chaveadores, como os disjuntores (DJs). Tais subsistemas são ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Subsistemas de um SP

¹ Transdutor é um dispositivo que transforma um determinado sinal de uma grandeza em outro sinal na mesma grandeza ou em grandezas diferentes, mantendo uma determinada correspondência entre os dois sinais [10].

Os transdutores têm como objetivo fornecer informações do SEP ao sistema de proteção provendo uma redução das medidas para valores proporcionais, fornecendo isolamento entre o circuito de alta tensão e os instrumentos, segurança pessoal e padronização na fabricação de instrumentos [5].

A norma IEC-50 [6], define o disjuntor de alta tensão como um dispositivo mecânico de manobra, capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes nas condições normais do circuito, assim como estabelecer e conduzir durante um tempo especificado a interrupção de correntes sob condições anormais especificadas pelo circuito, tais como as de curto-circuito.

Já os relés de proteção são os dispositivos que observam atentamente o sistema elétrico, e comparam os parâmetros de corrente e tensão, fornecidos pelos transdutores, com o seu pré-ajuste. Caso ocorra uma anomalia ou falta no sistema, de maneira que a variável sensível do relé ultrapasse o seu ajuste, o mesmo atua instantaneamente ou de forma temporizada, conforme necessidade. Promove, por exemplo, um sinal para abertura do disjuntor (*Trip*) para isolar uma determinada falta, conservando a parte remanescente do sistema em operação normal, sem que os efeitos dessa falta prejudiquem sua normalidade.

Com a finalidade de proteger componentes ou partes do SEP quando de condições anormais, indesejáveis ou intoleráveis, outros subsistemas afins formam o conjunto de dispositivos do sistema de proteção, como os canais de comunicação de dados, circuitos de corrente alternada e corrente contínua, circuitos de comando e sinalização.

Segundo Maezono [7], os subsistemas devem providenciar, simultânea ou parcialmente, os seguintes eventos:

- Pronta remoção de serviço, desligamento, dos componentes sob falta, ou dos componentes sujeitos a danos, ou ainda dos componentes que de alguma forma possam interferir na efetiva operação do restante do sistema;
- Adequadas sinalizações, alarmes e registros para orientação dos procedimentos humanos posteriores;
- Acionamentos e comandos complementares para se garantir confiabilidade, rapidez e seletividade na sua função de proteção.

1.1.2 Filosofias e Zonas de Proteção

A filosofia de proteção pode ser descrita como o estudo que se caracteriza pela intenção de reunir uma ordem de conhecimentos em torno dos princípios, causas e efeitos de perturbações e anomalias de funcionamento que afetam as redes elétricas e seus maquinismos de controle. Neste sentido, existe a intenção de apreendê-la e através de esquemas de

proteção, planejados para receberem informações das grandezas elétricas do SEP, atuar de forma a prevenir ou limitar efeitos danosos, sempre que condições fora dos padrões ocorram.

Em geral, as filosofias de proteção dividem o sistema elétrico em zonas supervisionadas ou zonas de proteção, utilizando a premissa de isolar a menor quantidade possível do SEP, quando da ocorrência de uma anormalidade. As filosofias habituais têm zonas de proteção conforme descrito na Figura 4.

Figura 4 – Sistema de proteção típico com suas devidas zonas de proteção
Fonte: [8]

O ato de separar as zonas de proteção, ocorre através da localização de disjuntores e TCs que refletem proporcionalmente no circuito secundário a corrente de seu circuito primário. A Figura 5 elucida a utilização de TCs de ambos os lados de um disjuntor.

Figura 5 – Limites de zonas de proteção
Fonte: [7]

Alternativa ao esquema anterior, a Figura 6 apresenta a instalação dos TCs de um lado apenas do disjuntor. Verifica-se a existência de uma *zona morta* entre o disjuntor e o TC sem aparente cobertura, isto é, o disjuntor está coberto somente pela proteção da Zona 1.

Figura 6 – Limites de zona e zona morta
Fonte: [8]

Devido ao custo de dois TCs separados para cada disjuntor, utiliza-se, em muitos casos, o TC com um enrolamento primário e vários enrolamentos secundários independentes [9].

1.1.3 Proteção Principal e Proteção de Retaguarda

Na aspiração de atendimento ao princípio de confiabilidade para o sistema de proteção, ou seja, a proteção principal deve ter operação correta e precisa quando solicitada e somente nas condições para as quais foi projetada, não devendo atuar para quaisquer outras condições, há a necessidade para a maioria dos casos, da existência de uma segunda proteção, chamada de proteção de retaguarda, que pode ser local ou remota (Figura 7).

1.1.3.1 Proteção principal

A proteção principal ou primária, por especificação e escolha de projeto, tem condição de uma rápida retirada de serviço de um elemento do sistema, quando esse sofre um curto-circuito, ou quando opera de modo anormal, de forma a causar danos ou, interferir com a correta operação do resto do sistema, contemplando os requisitos básicos do SP: seletividade, confiabilidade e velocidade [7] [10].

De acordo com a importância do sistema a ser protegido, podem ser dispostas duas proteções principais, que caso sejam idênticas, serão denominadas como primária e alternada.

1.1.3.2 Proteção de retaguarda

Segundo o Operador Nacional do Sistema (ONS) [11], proteção irrestrita ou de retaguarda, é o conjunto de proteções destinadas a detectar e eliminar falhas que ocorram no

equipamento protegido e fornecer proteção adicional para os equipamentos adjacentes. Sua atuação é normalmente coordenada² com a atuação das proteções dos equipamentos adjacentes por meio de retardo de tempo intencional, para que se aguarde a atuação da proteção principal.

Caso a proteção de retaguarda esteja instalada no mesmo local da proteção principal, será denominada retaguarda local, alterando para retaguarda remota ao estar instalada em outro componente adjacente àquele original.

O tipo de componente protegido pode incorrer na utilização de um canal de comunicação de dados para troca de informações e comandos (Figura 7).

Figura 7 – Conceito de proteção principal e proteção de retaguarda

Fonte: [7]

² Coordenação é uma estratégia de proteção, onde para qualquer corrente de curto-circuito, há uma escada de tempo no sentido da proteção principal para a de retaguarda, de modo a garantir e permitir seletividade no desligamento do sistema elétrico [12].

1.1.4 Funções de Proteção

Depreende-se que a função de proteção é a reunião de atributos exercidos por um SP, para fins previamente estabelecidos e definidos, dentro de uma determinada categoria ou modalidade de atuação [7].

A designação da função exercida pelos elementos, equipamentos e dispositivos do SP, segue a padronização numérica de representação C37.2-1996 IEEE/ANSI (*Institute of Electrical and Electronics Engineers/American National Standards Institute*), *Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations*, conforme trecho descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Trecho da padronização C37.2-1996 IEEE/ANSI, Funções de Proteção

Função de Proteção	Modalidade de atuação (Relé/Dispositivo Eletrônico)	Descrição
16	Controle de carga para bateria	Tem a finalidade de controlar e manter a carga da bateria ou banco de baterias.
21	Distância	Atua para defeitos em linhas de transmissão de alta tensão, quando a impedância, admitância ou a reatância, observada, diminui ou aumenta além dos limites.
25	Sincronismo	Entra em atividade quando dois circuitos em corrente alternada estiverem dentro de limites desejados de frequência, ângulos de fase ou tensão, para permitir ou provocar a conexão desses dois circuitos.
27	Subtensão	Age quando a tensão elétrica diminui além de um valor ajustado.
45	Sinalizador de condições atmosféricas anormais	Funciona quando da ocorrência de condições atmosféricas anormais, tal como a presença de emanações daninhas, misturas explosivas, fumaça ou fogo.
50	Sobrecorrente instantânea	Atua em poucos ciclos quando o valor da corrente excede certo limite.
51	Sobrecorrente temporizada	Opera quando o valor de corrente exceder o ajuste após em tempo pré-determinado.
59	Sobretensão	Produce efeito quando a tensão excede o limite ajustado.
63	Pressão	Entra em função de defeitos internos do transformador e para baixos níveis de pressão em equipamentos encapsulados (gás SF6).
67	Direcional	Intervenção quando o fluxo de corrente está em um sentido determinado e seu valor excede certo limite.
79	Religamento	Sucedee para comandar o religamento de um disjuntor.
81	Frequência	Opera quando a frequência infringe certos limites.
89	Chave seccionadora	Interruptor que só é operável sem carga, utilizada para possibilitar manobras com o objetivo de mudança na configuração do sistema elétrico.
87	Diferencial	Opera por comparação de corrente (diferencial de transformador, gerador, linha de transmissão e barra).
98	Oscilografia	Possibilita o diagnóstico, pós-perturbação, de ocorrência de defeitos no sistema elétrico.

Fontes: [5] [12]

Conforme ilustra a Figura 8, um relé ou dispositivo de proteção pode conter uma ou mais funções de proteção incorporadas, a denominada proteção multifuncional.

Figura 8 – Proteção de transformador com relé multifuncional
Fonte: [13]

1.1.5 Relés de Proteção

A proteção de um SEP é basicamente conduzida por relés. Conforme supracitado, estes dispositivos são destinados diuturnamente à detecção e localização de variações nas condições de um equipamento ou sistema, promove, sem delongas, o disparo de alarmes, sinalizações, e também, retira de operação componentes e trechos do sistema envolvidos com uma anormalidade, de acordo com as funções de proteção pré-estabelecidas.

Noutra vertente, também pode ser o elemento que, satisfeitas certas condições de normalidade, fornecerá a permissão para a energização de um equipamento ou sistema [10].

De uma maneira geral, a classificação dos relés quanto ao aspecto construtivo, embargado no contexto histórico, constitui-se no início de 1900 pelos relés eletromecânicos, que conservados na tradição e com possibilidade de utilização em circuitos de corrente alternada ou contínua, são os percussores da proteção. Projetados somente com a função de proteção do SEP contra falhas do próprio sistema e estruturados com predominância dos movimentos mecânicos para acionamento, ou seja, fechamento ou abertura de um ou mais

dos seus contatos [5] [12]. Embora sejam lentos e requeiram freqüente manutenção, são mais robustos e transparentes quanto ao seu funcionamento (Figura 9).

Figura 9 – Relé de sobrecorrente eletromecânico do tipo disco de indução

Fonte: [14]

Onde:

1. Conjunto de <i>taps</i> ;	9. Seletor de tempo;
2. Parafuso de ajuste dos <i>taps</i> ;	10. Parafuso de ajuste para núcleo magnético;
3. Bandeirola de sinalização da unidade temporizada;	11. Ajuste de <i>tap</i> para a bobina da bandeirola;
4. Rearme manual das bandeirolas;	12. Mola espiral;
5. Contato fixo;	13. Suporte para mola espiral;
6. Freio magnético;	14. Disco de indução;
7. Moldura;	15. Bobina de corrente montada sobre núcleo magnético em forma de U;
8. Bandeirola da unidade instantânea;	16. Contato móvel solidário ao disco de indução.

O conjunto de mudanças ocorridas no curso do tempo, relativas ao crescimento das tensões e potências de provisão exigidas do SEP, a complexidade das interligações e aumento dos níveis de curto-circuito, determinou a exigência de esquemas de proteção mais velozes, seletivos e estáveis [5]. O transcorrer cronológico contou com a utilização de válvulas nas décadas de 30 e 40, transistores nos anos 50, e circuitos integrados que tornaram intensa a utilização dos sucessores dos relés eletromecânicos nas décadas de 60 e 70, os relés eletrônicos ou estáticos. Estes foram elaborados com sustentáculo no funcionamento de circuitos semicondutores de estado sólido, peculiares e específicos aos objetivos da proteção, não havendo dispositivos mecânicos em movimento [14] [15], conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Relé estático de distância

Fonte: [14]

Onde:

1. Unidade de entrada;	7. Unidade extra de medição;
2. Unidade de sobrecorrente;	8. Unidade de memória;
3. Unidade seletora de fase;	9. Unidade de medida e indicação;
4. Unidade de ajuste de corrente;	10. Unidade de saída;
5. Unidade de ajuste de tensão;	11. Chave de teste;
6. Unidade de tempo entre eventos;	12. Conversor DC/DC.

Segundo Kinderman [12], a maioria dos relés estáticos sempre acabam por operar mecanicamente um relé auxiliar para fechamento ou abertura de um contato. Muitos são denominados relés semi-estáticos, pela existência de alguns componentes mecânicos associados.

Com maior operacionalidade e velocidade na atuação dos esquemas de proteção, a desvantagem dos relés estáticos refere-se à sensibilidade mais apurada aos transitórios ou pequenos distúrbios (Interferências Eletromagnéticas – EMI) comuns ao SEP, ocasionando operações indevidas. Com a adequada colocação de filtros, estes problemas foram em parte contornados [12] [16].

No término da década de 60, manifestaram-se técnicas de proteção digital quando vários pesquisadores desenvolveram algoritmos de proteção, inicialmente para linhas de transmissão, como, por exemplo, a extensão das linhas de transmissão, localização de faltas e verificação das zonas de proteção atingidas. Estes trabalhos necessitaram aguardar o desenvolvimento adequado dos computadores digitais no que se refere à capacidade de computação e os custos para sua implantação.

Tal desenvolvimento só foi possível com o advento dos microprocessadores em 1970, o que tornou possível a competição a nível comercial com os relés analógicos convencionais.

Relés digitais são relés eletrônicos administrados por microprocessadores. São microcomputadores específicos para este fim, onde sinais de entrada das grandezas, tensão e corrente, e parâmetros digitalizados são controlados por um *software* que processa a lógica da proteção através de um algoritmo [12].

A Figura 11, apresenta de forma simplificada a arquitetura dos relés digitais, onde são apresentados seus principais subsistemas.

Figura 11 – Principais subsistemas de um Relé Digital
Fonte: [5] [8] [12]

Coury [8] explicita que atualmente, os novos projetos de subestações de energia elétrica fazem uso exclusivo dos relés de proteção digital, e que estes, vêm também, gradativamente, substituindo os relés de proteção eletromecânicos e estáticos.

Sensivelmente estes relés estão evoluindo para Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED) que, comparados aos equipamentos antecedentes, apresentam um caráter multifuncional relacionado à sua aplicação nas diversas filosofias de proteção, efetuando várias funções, tais como as descritas na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de aplicações do relé digital: diversas filosofias e funções da proteção

Além das funções de proteção incorporadas ao relé, outras vantagens da sua utilização, são [8] [12]:

- Ajustes diferenciados para os tipos de defeitos 3Ø, 2Ø e 1Ø – terra;
- Compactação, reduzindo o espaço de painéis e das salas de controle;
- Exigência de TCs com menores classes de exatidão;
- Flexibilidade funcional;
- Na tela do próprio relé, podem-se inserir dados de ajuste, equações e habilitação de funções, ou estes dados podem ser efetuados remotamente, pelas vias de comunicação de dados;
- Permissões ou bloqueios advindos de outros relés;
- Possibilidade de emular qualquer relé eletromecânico;
- Possibilidade de implantação de técnicas inteligentes;
- Redução dos custos no decorrer do tempo;
- Vários níveis de ajuste que automaticamente se adaptam com a mudança da configuração do circuito da subestação;
- Verificação de redundância para evitar operação indevida.

Algumas desvantagens do relé digital são [12] [15]:

- As manutenções corretivas, em sua maioria, são efetuadas apenas pelo fabricante;
- Carece de climatização para manter estabilidade e a integridade física dos componentes;

- Dificuldade na compatibilidade de protocolos de comunicação com relés de fabricantes diferentes ou sistemas de supervisão;
- Exigem impedância de aterramento muito baixa;
- Necessita de uma fonte de energia externa;
- Obsolescência devido ao rápido avanço tecnológico;
- Possibilidade de ações de pessoas que utilizam seu conhecimento em tecnologia para fins ilícitos, se a rede de comunicação de dados estiver conectada a *Internet*;
- Sujeitos a interferência eletromagnética.

Relés digitais que utilizam um especializado Processador Digital de Sinais (PDS) são denominados Relés Numéricos, “isto é, o sinal analógico é convertido em digital e processado de maneira otimizada em um microprocessador apropriado de acordo com o algoritmo utilizado na filosofia de proteção do relé” [12].

1.2 Arquitetura Simplificada de um SAS

O desenvolvimento da tecnologia ao longo das últimas décadas tem impacto direto nos níveis hierárquicos típicos do Sistema de Automação de Subestações (SAS), conforme elucidada a Figura 13, alterando o cenário das novas instalações de supervisão, controle e proteção, no que tange a integração entre filosofias, funções, dispositivos numéricos de proteção, sistemas de telecomunicações e computação. Essencialmente determinada, pelo bom êxito do processamento digital de sinais e das tecnologias de comunicação de dados e redes de computadores, especialmente *Intranet*.

Figura 13 – Níveis hierárquicos na subestação
Fonte: [17]

Onde:

- BP – Barramento de processo;
- BS – Barramento de subestação;
- SG – Disjuntores e chaves seccionadoras;
- TC – Transformador de corrente;
- TP – Transformador de potencial;
- U COM – Unidade de comunicação;
- UC – Unidade de controle;
- UCP – Unidade de controle e proteção;
- UCS – Unidade de controle da subestação;
- UP – Unidade de proteção.

Um SAS característico apresenta três níveis, qualificados como nível de processo, de *bay* ou vão, e de estação. Ao nível de processo existem as interfaces conectadas, por fios individuais, aos equipamentos primários na subestação, como, por exemplo, TCs e TPs, disjuntores e chaves seccionadoras, no trato de sinais analógicos, sinais de estado ou controle binário. Enquanto que no nível de *bay* estão localizados os equipamentos de proteção e controle, os quais, por sua vez, estão conectados ao nível da estação, através do barramento entre *bay* e estação. No nível da estação, a principal finalidade é a supervisão e controle da subestação através de uma Interface Homem Máquina (IHM), além de uma unidade de comunicação, que possua entre suas funcionalidades a possibilidade de ser um *gateway* (conversor de protocolo), permitindo a conexão com outro nível hierárquico ainda superior [17] [18] [19].

Nesta representação podem ser identificados os IEDs em nível de *bay*, como unidades UC, UP e UCP, que realizam comunicações verticais com o nível de processo, transmitindo e recebendo sinais, como, por exemplo, abertura, fechamento ou estado de um SG. Estas informações podem gerar uma atuação no IED correspondente, ou uma comunicação horizontal com outros IEDs, ao nível de *bay*, atendendo a filosofia e funções de proteção pré-estabelecidas, além de comunicação vertical com o nível de estação, seguindo em direção à estação de controle, um sistema de controle supervisão e aquisição de dados (SCADA³).

1.3 O Padrão IEC-61850

Na pluralidade das subestações contemporâneas, a difusão de valores de tensão e corrente, por exemplo, são efetuadas de maneira analógica através de conexões físicas entre os níveis de processo e *bay*, entre os transformadores de corrente e potencial, TC e TP, os medidores e os dispositivos de proteção. De forma análoga, sucede com os sinais de estado

³ Segundo Rosário [66], “os sistemas de supervisão podem ser definidos como uma interface homem máquina (IHM) amigável os quais utilizam tecnologias de computação e comunicação que permitem a supervisão e controle de sistemas automatizados, efetuando o recolhimento de dados em ambientes complexos, algumas vezes dispersos geograficamente”.

(binários) e os comandos, ao transitarem entre os dispositivos de campo. Este esquema necessita de volumosa quantidade de fios para as conexões, espalhadas pela subestação [20].

Com a tecnologia digital, as medições, sinalizações e comandos são encapsulados em pacotes de dados que trafegam distribuídos sobre uma Rede Local de Subestação (SLAN), utilizando-se de protocolos de comunicação, que definem conjuntos de regras que coordenam e asseguram o transporte das informações úteis, para execução dos esquemas de proteção, e lógicas de operação do SEP, tornando obsoleta a tradicional lógica de relés convencionais.

A etapa subsequente, que estabeleceu avanços dessa tecnologia, foi o surgimento dos protocolos de domínio público em lugar dos protocolos proprietários, uma vez que a maioria dos equipamentos e *softwares* não é compatível, constituindo ilhas de informação isoladas entre si. O ato essencial para que uma regra de comunicação se torne um modelo oficial é que a especificação torne-se pública e ratificada por um fórum independente e autônomo que reúna as classes de interesse, como, fornecedores, usuários, consultores e certificadores [21].

Conforme Sidhu (*apud* [20]), a integração entre essas ilhas nem sempre é possível e, quando é, geralmente requer dispendiosas e complexas transferências de dados e mapeamentos de *hardware* e *software*, devido principalmente aos vários protocolos de comunicação utilizados.

Diante da necessidade, portanto, de uma solução de integração não-proprietária, padronizada e que apresentasse um protocolo de alta velocidade, de forma a possibilitar uma rede de comunicação agregada, robusta e com ciclo de vida independente dos fornecedores, em 1994, os grupos de trabalho WG10, WG11 e WG12 do Comitê Técnico do IEC (*International Electrotechnical Commission*), TC57, iniciaram o estabelecimento do padrão internacional IEC-61850, Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações.

Esta característica de autonomia baseia-se em dois pilares para executar as funções de medição, monitoração, controle e proteção, dentre outras pertinentes aos IEDs:

- Interoperabilidade, que vai além de uma simples transferência de dados, abrangendo troca de informações entre dois ou mais dispositivos de inteligência similar, em que o receptor deve não somente entender a estrutura de dados (sintaxe), mas também o seu significado (semântica), com base nos atributos de dados recebidos na comunicação, compartilhando informações por um ou vários fabricantes, sem o uso de *gateways*;
- Intercambialidade, como efeito de permutação, substituição de equipamento de um fabricante por outro, sem necessidade de alterações nos demais equipamentos constituintes do sistema.

Diversos artigos expostos até o momento fazem menção aos principais fundamentos e potencialidades disponibilizadas pelo padrão IEC-61850, explicitam como seu surgimento pode influenciar os processos de engenharia de automação das subestações. De modo recente, ilustrações citam os procedimentos que comprovam toda a capacidade explorada, e eventuais dificuldades na implementação de lógicas e esquemas de controle e proteção, manifestam também, as experiências e resultados adquiridos na configuração de alguns projetos.

Conforme Santos e Pereira [22], a introdução do padrão IEC-61850 ainda passa por um processo de experimentação, “e como parte estratégica na tentativa evolutiva de uma ruptura cultural é de fundamental importância a capacitação de pessoal e a realização de experimentos práticos que comprovem a eficiência das novas soluções trazidas por este padrão”, destacando-se os obstáculos encontrados e como estes foram sobrepujados.

1.4 Objetivo Geral

Neste contexto, manifesta-se o objetivo fundamental deste trabalho: implementar no Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) da Universidade de São Paulo (USP), situado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), uma infra-estrutura de comunicação de dados e redes de computadores, *Intranet*, que possibilite experimentação, medição, análise e avaliação da interoperabilidade de informações, e intercambialidade de equipamentos com supervisão, controle e proteção, essencialmente, relés digitais comerciais. Ações estas com alusão a aplicação do padrão IEC-61850, como protocolo em redes de comunicação e sistemas em subestações, e ênfase na demonstração de casos possíveis de aplicação de controle e supervisão entre os níveis de processo e *bay*, vislumbrando soluções para problemas do SEP.

1.5 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral serão postos em obra os seguintes itens:

- Distinguir os sistemas de comunicação de dados utilizados na automação do SEP;
- Caracterizar os conceitos essenciais de comunicação de dados e redes de computadores, *Intranet*;
- Conhecer o estado da arte do padrão IEC-61850;
- Especificar a infra-estrutura de comunicação de dados e topologia para redes de computadores, *Intranet*, visando à interligação de equipamentos com supervisão, controle e proteção, essencialmente, relés digitais comerciais de diferentes fabricantes,

simuladores do sistema de potência (caixa de teste) e microcomputadores padrão IBM PC;

- Implementar lógicas discretas de supervisão e controle com ênfase entre os níveis de processo e *bay*, na busca por solucionar problemas do SEP. Utiliza-se para este fim, o padrão IEC-61850 e a estrutura de comunicação proposta;
- Avaliar o comportamento no tempo de mensagens do tipo *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) em condições distintas de tráfego e de configuração da topologia lógica da rede de comunicação de dados;
- Monitorar um possível extravio entre as mensagens geradas por um emissor e aquelas recebidas por um ou mais destinatários, neste estudo relés digitais comerciais;
- Realizar análise e avaliação da interoperabilidade de mensagens e intercambialidade entre relés digitais, com utilização do padrão IEC-61850, aplicável aos casos desenvolvidos e sob a infra-estrutura de comunicação de dados do LSEE.

1.6 Contribuições Importantes do Trabalho

No momento em que se considera pronto este trabalho, espera-se ter lançado rebentos que possam contribuir nos seguintes horizontes:

- Disseminar os conceitos inerentes as tendências modernas do sistema elétrico, no quesito dos sistemas de comunicação de dados, redes de computadores e do padrão IEC-61850, como protocolo em redes de comunicação e sistemas em subestações;
- Implementação no LSEE de um ambiente que auxilie engenheiros, técnicos e estudantes do SEP, que careçam em seus projetos de uma infra-estrutura de comunicação de dados e redes de computadores;
- Desenvolvimento de aplicações de controle e supervisão replicáveis na automação de subestações pertinentes ao SEP;
- A experimentação, medição, análise e avaliação do padrão IEC-61850, no ponto ou questão que se refere à metodologia aplicada, interoperabilidade de informações, intercambialidade de equipamentos, essencialmente, relés digitais comerciais de diferentes fabricantes (dentre as condições finitas de equipamentos do LSEE) e avaliação temporal na entrega de mensagens GOOSE, justaposto às aplicações desenvolvidas;
- A divulgação científica relativa às aplicações desenvolvidas e a observação dos resultados das experimentações do padrão IEC-61850, com publicações em foros

pertinentes e relevantes, que gerem observações, análises e debates em torno dos resultados.

1.7 Organização do Texto

Conforme transcorrido até esta seção, o Capítulo 1 apresentou uma introdução ao SEP, detalhou os subsistemas, filosofias, zonas e funções de proteção, além do transitar histórico dos relés eletromecânicos até os numéricos. Através da arquitetura de um SAS, fez-se a contextualização deste trabalho, inserindo seu objetivo geral, os objetivos específicos e as contribuições desejadas.

No Capítulo 2 destacam-se alguns dos trabalhos publicados na literatura técnica, sendo mencionada concisa citação do tópico estudado e dos resultados obtidos pelos autores, na busca por balizar os próximos capítulos.

Um breve visualizar das funções de automação em subestações é descrita no início do Capítulo 3, como introdução aos sistemas de comunicação de dados. Apresenta-se então, um modelo genérico de comunicação aplicado ao SEP e, em seqüência, uma enumeração de conceitos de comunicação de dados necessários aos dispositivos fundamentais do SEP, onde se deve ressaltar os canais de comunicação e as interfaces digitais.

Posteriormente, no Capítulo 4, destacam-se as características das redes de computadores locais LAN (*Local Area Network*), aquelas que apresentam os seus dispositivos instalados em uma área restrita, como, por exemplo, uma subestação. E assim, as suas topologias (físicas e lógicas) e o *hardware* envolvido na sua implementação. Distingue-se neste ponto, a topologia *Ethernet*, as redes WAN (*Wide Area Network*), o caracterizar das redes *Intranet* no âmbito das subestações, as redes VLAN (Virtual LAN) e quesitos de Qualidade de Serviço (QoS).

Para a compreensão do funcionamento de redes de computadores, será apresentado o modelo OSI (*Open Systems Intercon*), que procura ser um padrão para a criação de novos protocolos, com destaque para o protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*).

Logo em seguida, o Capítulo 5 trará uma visão geral do padrão IEC-61850 e um delinear de tópicos como: a modelagem de dados, a linguagem de configuração de subestações, a pilha de protocolos e tipos de mensagens previstas, além das características de teste de sistemas de automação baseados no padrão.

O Capítulo 6 trata do projeto de implantação da infra-estrutura de comunicação de dados e computadores, *Intranet*, do LSEE, que possibilita experimentação, medição, análise e

avaliação da interoperabilidade de informações, e intercambialidade de equipamentos com supervisão, controle e proteção.

Com o intuito de desenvolver aplicações focadas ao estudo da automação de subestações, entre os níveis de processo e *bay* nos quesitos de supervisão, controle e proteção, no Capítulo 7 apresenta-se um controle de *bay* típico de saída de linha, dispondo de meios de comunicação de dados e uma lógica para comutação entre fontes de alta tensão em uma subestação industrial. Em decorrência destas aplicações é proposta uma metodologia para especificar a automação de lógicas discretas mediante emprego do padrão IEC-61850.

Busca-se também, avaliar o comportamento no tempo de mensagens do tipo GOOSE, em condições distintas de tráfego e de configuração da topologia lógica da rede de comunicação, além de monitorar um possível extravio entre as mensagens geradas por um emissor e aquelas recebidas por um ou mais destinatários.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões no que tange ao trabalho realizado, além dos pontos de continuidade da pesquisa. No Apêndice A é explicitado os resultados obtidos em relação à divulgação científica do trabalho.

II. Revisão Bibliográfica

O desenvolvimento de novos conceitos e estudos que se caracterizam pela intenção de ampliar incessantemente a compreensão da realidade de aplicação no ambiente de automação de subestações, dos recursos para comunicação de dados e as regras para troca de informações, propõe novas soluções na integração de sistemas de medição, monitoramento, controle e proteção do SEP.

Na última década inúmeros trabalhos publicados fazem menção às potencialidades das teorias e recursos de comunicação de dados, redes *Ethernet* e do padrão IEC-61850, dedicando-se a delimitar o conhecimento e propagar suas concepções, explicando as influências no processo de engenharia de automação ao redor do mundo. Não obstante evidenciam casos de aplicação, que tornam possível vislumbrar novas soluções para conhecidos problemas do SEP.

A seguir são destacados alguns dos trabalhos encontrados na literatura, sendo explicitada concisa citação do tópico estudado e dos resultados obtidos pelos autores.

2.1 Teorias de Comunicação de Dados e Redes *Ethernet*

Grandi [23] propõe uma metodologia para a especificação de telecontrole em subestações de energia elétrica a qual pode ser utilizada como instrumento de planejamento e execução de um projeto de telecontrole e automação de subestações. Um dos pontos relevantes do trabalho é a revisão bibliográfica, capítulo 3, que descreve o que é automação de uma subestação e como ela deve ser efetuada. São caracterizadas as maneiras, benefícios e vantagens da monitoração, a fonte de dados e as funções básicas da automação de uma subestação, as ferramentas que devem fazer parte de um projeto, e adicionalmente,

ferramentas inteligentes como redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, agentes inteligentes e sistemas especialistas. Além de abordar *softwares* e linguagens de programação para os processos de automação.

Kindermann [9], Maezono [7], Caminha [10], Giovanini [16] e Behrendt [24] apresentam os canais tradicionais utilizados para a comunicação de dados em sistemas de proteção, principalmente entre relés das barras adjacentes de uma linha de transmissão. Expressam a necessidade de que ocorra a transmissão de informações a partir de um equipamento terminal de dados local até o ambiente remoto, para tornar possível a detecção da falta e procedimento coerente do sistema de proteção para seu isolamento. Como principais meios físicos de comunicação explorados, foram destacados:

- Fio Piloto: conexão por cabos de cobre entre os terminais da linha de transmissão;
- Onda Portadora (*Carrier*): transmissão sobre as linhas de alta tensão;
- Rádio Microondas: com propagação pelo ar, dirigido por antenas parabólicas;
- Fibras Ópticas: através de cabo dielétrico e OPGW (*Optical Ground Wires*); e
- Serviços fornecidos por concessionárias de telecomunicações como a Linha Privativa de Comunicação de Dados (LPCD).

No artigo de Zimmerman e Schweitzer [25], comparam-se as comunicações que utilizam as interfaces EIA-232 (*Electronics Industries Association*), EIA-485 e fibra óptica em termos de velocidade, segurança patrimonial e ocupacional, configurações de rede, análise de falhas e economia. Inicialmente, o trabalho identificou as características da comunicação dos canais físicos. Em seguida, discutiu modos de melhor usar esses canais, incluindo as topologias estrela e barramento, além das velocidades de transmissão de dados envolvidas em cada um. O resultado foi uma tabela comparativa e uma discussão que esclarecem as compensações, vantagens e desvantagens, desempenho e custos de cada opção.

Uma introdução aos termos, conceitos, dispositivos, topologias e à utilização das redes *Ethernet* nas subestações de energia elétrica é apresentada no artigo de Woodward [26]. No trabalho destacam-se as alusões às pilhas de protocolo TCP/IP, OSI e UCA2 (*Utility Communications Architecture*), com apreciação do modelo objeto GOMSFE (*Generic Object Models for Substation and Feeder Equipment*) e do sistema de mensagem GOOSE. Dentre as conclusões são expressas a preocupação com técnicas de instalação e equipamentos mais robustos e adequados para uso em subestações, a criação de diagramas que mostrem todos os componentes vitais na topologia de modo a entender quais equipamentos são críticos para a operação da rede e a utilização de sincronismo de tempo adequado.

Já Pozzuoli e Moore [27], ilustram que ambos os padrões IEC-61850 (parte 3) e IEEE-1613, definem exigências ambientais como temperatura, e imunidade a interferências eletromagnéticas, para dispositivos de comunicação em rede, por exemplo, *switches Ethernet*. Para garantir o desempenho na troca de mensagens em tempo real, avalia a necessidade de se utilizar *switches* gerenciáveis, com protocolos, tais como: IEEE 802.3x (*flow control*), IEEE 802.1p (*priority protocol*), IEEE 802.1q (*VLAN tagging*), IEEE 802.1w (*Rapid Convergence Spanning Tree*) e IEEE 802.1d (*spanning tree protocol*). Estes possibilitam uma variedade de arquiteturas, com diferentes níveis de desempenho, custo e redundância.

2.2 Visão geral, impactos e perspectivas do padrão IEC-61850

Em linhas gerais o objetivo do padrão IEC-61850 é a interoperabilidade na troca de informações entre IEDs de fabricantes distintos, a possibilidade de configuração das funções, como, por exemplo, proteção, conforme necessidades dos usuários e a adaptação às novas tecnologias de comunicação [28]. Sua estrutura utiliza o conceito de “definição abstrata” para aceção de dados e serviços, isto é, objetos e serviços são criados 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 [29].

O padrão IEC-61850 foi organizado em 10 partes, todas aprovadas e com estado de padrão internacional, as quais incluem tópicos sobre requisitos de comunicação, linguagens de configuração, princípios e modelos, testes de conformidade, entre outros. Embora inicialmente o padrão IEC-61850 tenha sido concebido apenas para uso interno às subestações, estudos estão sendo realizados para utilizá-lo também na comunicação entre subestações e subestação – centro de controle.

O passo fundamental para que um protocolo se torne um padrão aberto é a sua especificação tornar-se pública e sustentada por um fórum independente e autônomo que reúna todas as classes de interesse. Siqueira e Fonseca [21], realizam uma revisão de três protocolos abertos e utilizados no sistema elétrico: DNP3.0 (*Distributed Network Protocol*), o IEC-60870-5-101, e o IEC-61850. Após a análise individual de cada protocolo, foi realizada uma comparação entre eles, com o corroborar de alguns benefícios e peculiaridades, de acordo com diversas características apresentadas, como: serviços disponíveis, arquitetura de comunicação, integração e configuração. Observou-se que mesmo com a adoção de protocolos especialmente desenvolvidos para o setor elétrico, como o IEC-60870-5-101 e o DNP3.0, faz-se necessário considerável esforço de engenharia no sentido de integração das informações. Os autores consideram que a assimilação e prática das adaptações exigidas pelo padrão IEC-

61850 deva acontecer lentamente nos próximos anos, devido ao conservadorismo no setor elétrico e o extenso ciclo de vida das subestações.

Entre os objetivos iniciais de um projeto que visa investigar a tecnologia UCA/IEC-61850 e sua aplicabilidade em subestações da CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista), Oliveira *et al* [30], buscam entendimento dos conceitos introduzidos pelo padrão IEC-61850 e UCA, abordam como ponto forte o modelo de objeto GOMSFE, o modelo de comunicação entre IEDs GOOSE, o conjunto de modelos genéricos de funções de comunicação CASM (*Common Application Service Models*) e finalizam com a compatibilidade entre o padrão IEC-61850 e o UCA2.

Uma visão geral do padrão IEC-61850 – Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações é expressa por Mackiewicz [29], Gurjão e Benemar [31], Bastos [20] e Pereira *et al* [32]. Os artigos apresentam um breve histórico até o desenvolvimento do padrão, o escopo dos principais documentos para formação de sua arquitetura, o modelo de dados embutido num IED (dados, classes de dados, nós lógicos e dispositivos lógicos), a linguagem de descrição formal da subestação (SCL, *Substation Configuration Language*) baseada em XML (*eXtender Markup Language*), que visa padronizar atributos de configuração, além da representação da pilha de protocolos e tipos de mensagens previstas pelo padrão. De forma recíproca os artigos expressam os benefícios de utilização do padrão, no favorecer de soluções de engenharia depurados, independente do fabricante.

Os impactos e as perspectivas do padrão IEC-61850 são explicitadas por Hossenlopp [33], Apostolov e Tholomier [18], Fay e Eckl [34]. Os artigos abordam os benefícios do padrão, a utilização de comunicação distribuída, a definição de arquiteturas físicas e lógicas, o sistema de configuração e a interoperabilidade entre IEDs. Adicionalmente, Apostolov e Tholomier, tratam das exigências de desempenho para proteção através das estampas de tempo envolvidas nos módulos de uma aplicação distribuída. Os autores contemplam também as vantagens de utilização do sistema de mensagens GOOSE sob a comunicação com cabeamento de cobre. Esta última, 14 ms mais lenta no teste realizado.

2.3 Abordagens práticas do padrão IEC-61850

A análise de aplicação do padrão IEC-61850 para a automação de um *bay* de linha de transmissão no contexto de uma configuração barra principal e de transferência é descrita por Cardoso *et al* [35], visa a implementação de um sistema piloto, parte integrante do projeto de pesquisa e desenvolvimento realizado de forma conjunta entre a Universidade de São Paulo e a Eletronorte. A metodologia utilizada para a especificação e projeto visualiza a descrição do

sistema de automação segundo três pontos de vista: especificação funcional (diagramas funcionais, modelo de objetos e lista de serviços), requisitos de desempenho (tempo de resposta, tipo de rede, taxa de transmissão e segurança) e a etapa de engenharia. Em suas conclusões os autores expressam que o padrão IEC-61850 disponibiliza mecanismos para padronizar o processo de especificação, no que diz respeito a funcionalidades e desempenho. Também facilita as tarefas de projeto, principalmente da engenharia ao prover uma linguagem de descrição independente, que permitirá a configuração dos IEDs quaisquer que sejam os fabricantes.

Inserido na mesma vertente, Santos e Pereira [22], destacam a implementação de funcionalidades, principalmente de proteção e controle, com uma visão mais voltada às aplicações via comunicação. O artigo apresenta resultados obtidos em teste de bancada, referente à funcionalidade de falha de disjuntor, com dois IEDs conectados via rede *Ethernet* trocando mensagens GOOSE através de um *switch*. O desempenho deste arranjo mostrou-se satisfatório, com tempo de mensagens GOOSE em torno de 4 ms, o que garantiu a operação adequada do esquema de proteção.

2.4 Princípios de teste baseados no padrão IEC-61850

O desenvolvimento de aplicações baseadas em comunicação ponto a ponto de alta velocidade, com medidas distribuídas, controle, proteção e soluções baseadas em amostras de valores analógicos são possibilidades estabelecidas pelo padrão IEC-61850. Paulino [36] [37] discute requerimentos e princípios de teste aplicados ao SEP baseados no padrão. Esboça a comparação entre o teste funcional através de cabeamento metálico interligando os IEDs, e testes baseados em comunicação *Ethernet* com troca de mensagens GOOSE. No primeiro artigo, o autor trata dos testes realizados pelo Comitê de Subestação do IEEE, que se reuniu em Abril de 2003 em Sun Valley, Idaho, USA. Os fabricantes ABB, ALSTOM e SIEMENS mostraram a interoperabilidade na transmissão de sinais de *trip* sobre a rede *Ethernet* através de mensagens GOOSE. O tema da demonstração foi uma função *intertripping*⁴, situação real consistindo de três disjuntores, cada um designado para um relé de proteção de um dos fornecedores, conectados a uma rede em anel *Ethernet* 100 Mbps, oferecendo redundância entre as rotinas de mensagens. Um equipamento de teste simulou um curto-circuito e a corrente foi injetada no relé SIEMENS. Este emitiu um *trip* local para seu circuito de

⁴ Um sinal de *trip* gerado em um determinado relé e enviado a outro via enlace de comunicação. Esta mensagem pode executar duas funções no relé remoto: comando de abertura de um disjuntor ou apenas sinalizar o recebimento do *intertripping*.

abertura e, ao mesmo tempo, enviou uma mensagem GOOSE via a rede *Ethernet* para os relés da ABB e ALSTOM, com a intenção de iniciar o *intertripping*. Os relés ABB e ALSTOM independentemente receberam a mensagem GOOSE e cada *trip* local foi gerado. Os resultados foram os três *trips* locais indicados pelos respectivos relés através de uma transferência rápida de mensagens.

Um diferencial para o segundo artigo [37] está na descrição da estrutura da linguagem de configuração da subestação, definida no documento IEC-61850-6, além de testes comparativos entre conexões convencionais, via par metálico, e testes funcionais dos IEDs baseados em comunicação via rede *Ethernet* com troca de mensagens GSSE/GOOSE.

Apostolov e Paulino [38] discutem as necessidades para o teste de sistemas de automação de subestações complexas, os métodos para testes do sistema, além de explicitar os requisitos de configuração, monitoramento e relatório de testes de sistemas complexos. Soluções para o teste de componentes individuais de sistemas baseados no padrão IEC-61850, bem como testes de aplicações distribuídas são descritas no artigo.

2.5 Experiências de automação de subestações com o padrão IEC-61850

Segundo Rodrigues [17], depois de seis meses que o padrão IEC-61850 estava finalizado, foi comissionada a primeira subestação, situada 50 km a oeste da cidade de Zurique (Suíça), a subestação de energia *Winznau* (16 kV) pertence à concessionária da Suíça de distribuição de energia *Atel Versorgungs AG* (AVAG), companhia do *Aare-Tessin AG Group*. Koschanin *et al.* (*apud* [39]) detalha que a mesma foi construída em 1962, com importante papel na distribuição regional da energia que alimenta a cidade de *Winznau* e parte da cidade de *Duliken*. Os equipamentos da subestação operaram satisfatoriamente por 40 anos, mas estavam próximos de atingir o fim da vida útil no início deste século. Foi iniciado então um projeto para modernização completa da subestação. Esta modernização foi realizada através da substituição dos antigos equipamentos de manobra (chaves e disjuntores) por novos, além da instalação de um sistema de automação para aumentar a confiabilidade operacional da planta. O projeto teve início em 2003 e término no final de 2004.

Neste ínterim, outros artigos descrevem experiências reais de automação de subestações com o padrão IEC-61850. Hoga e Skare [40] descrevem que a companhia da Alemanha de geração de energia *RWE Power* instalou equipamentos na Subestação *Garzweiler II*, que seguem o padrão. O projeto consistiu da automação de 03 subestações de 110 kV, 25 kV e 6

kV, as quais fornecem energia para uma mina que alimenta 04 usinas de geração. O projeto teve início no final de 2003 e foi completamente finalizado no início de 2005. A vida útil da subestação é esperada para ser entre 25 a 30 anos, e durante este período a expansão dos equipamentos primários é prevista.

Nos dois projetos o desempenho do sistema foi alto, conforme expressão dos autores, devido às seguintes razões:

- O fluxo dos dados não apresenta atrasos causados por conversores de protocolo;
- A rede de fibra óptica *Ethernet* oferecida, 100 Mbps, com redundância para cada subestação, possibilita o envio de mensagens simultaneamente para vários destinatários;
- Gargalos comumente encontrados e comunicações do tipo mestre/escravo não estavam presentes;
- Inteligência distribuída é utilizada, isto é, intertravamentos sem a coordenação de dispositivos centrais;
- Com a ausência de colisões de mensagens, a rede *Ethernet* disponibiliza uma maior quantidade de dados.

A concessionária de energia elétrica do México, *Comisión Federal de Electricidad* (CFE), escolheu desenvolver o projeto de La Venta II como um sistema funcional totalmente baseado nos protocolos incluídos pelo padrão IEC-61850, conforme descrito por Flores *et al* [41], integrando dispositivos de diversos fabricantes, com o objetivo de avaliar possíveis inclusões na especificação de seu sistema. La Venta II é uma usina eólica que vai gerar aproximadamente 3 GWh até 2014, tornando-se a maior usina eólica do México e da América Central. O primeiro estágio do projeto integra dispositivos da SEL, GE, ZIV, Siemens, RuggedCom e Team Arteche, conforme ilustra a rede local da subestação, onde: SW – *Switch* (Figura 14).

A CFE efetuou testes detalhados com o objetivo de ganhar confiança na nova tecnologia. O esquema completo da função de proteção de falha de disjuntor foi implementado com utilização de fiação tradicional e, também, com troca de mensagens GOOSE. A operação de *retrip* com mensagens GOOSE foi 12 ms mais rápida do que a operação via fiação tradicional. A função diferencial de barras via GOOSE foi 8 ms mais rápida, sem considerar que o esquema de fiação ainda tem de passar por um relé de bloqueio. Testes adicionais foram executados após aumentar o tráfego no sistema, obtendo-se os mesmos resultados. Neste projeto específico, as chaves *Ethernet* seguem as observações já descritas por Pozzuoli e

Moore [27]. Os testes de tempo e tráfego estão descritos em mais detalhes no artigo da referência [41].

Figura 14 – Conexões na rede *Ethernet* da subestação La Venta II
Fonte: [41]

Segundo Dawidczak e Oliveira [39], a empresa *Tennessee Valley Authority* (TVA) é uma das maiores concessionárias públicas dos EUA, com 33.000 MW de capacidade de geração. Através de 158 localidades de distribuição, a TVA fornece energia para aproximadamente 8,5 milhões de consumidores. O processo de automação da subestação Bradley 500 kV, utilizando o padrão IEC-61850, contou com a participação de várias empresas (SIEMENS, GE, ABB e Areva), sendo este um dos primeiros projetos reais de integração de vários fabricantes. A interoperabilidade de mensagens GOOSE foi instalada entre os fabricantes dos relés de proteção, assim como a integração do sistema SCADA. Nas conclusões os autores explicitam que o barramento de processos é o próximo passo em direção à total automação das subestações, oferecendo mais benefícios às concessionárias de energia e aos consumidores. Amostras de tensão e corrente são transmitidas continuamente e a perda de dados pode gerar mal funcionamento de dispositivos de proteção. A implementação do padrão IEC-61850 precisará de novas tecnologias como a velocidade de 1 Gbps e redes inteligentes estruturadas.

Flores, Higashi e Andrade [42] apresentam a experiência da ELETROSUL na implantação das primeiras subestações de transmissão da empresa a utilizar extensivamente os recursos de projeto e de comunicação do padrão IEC-61850. O sistema de proteção e controle das subestações *Atlântida 2*, *Osório 2* e *Gravataí 3* é baseado em uma arquitetura distribuída composta de IEDs redundantes de proteção e controle e da utilização de uma

unidade concentradora de subestação, baseada no aplicativo SAGE Box desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que é o equipamento responsável pela concentração e gerenciamento das informações de supervisão e controle destas subestações e pela comunicação com o supervisor SAGE local e com os centros de controle remotos. As ferramentas de geração de bases de dados disponibilizados pelos IEDs e pelo SAGE permitiram vencer alguns desafios que afligiam todas as partes (ABB, ELETROSUL e CEPEL): a falta de experiência no tratamento deste novo padrão, já que mesmo sem ter o domínio total do IEC-61850 foi possível gerar todas as bases de dados do SAGE com certa facilidade. O grande desafio enfrentado foi a identificação dos *tags* padronizados no IEC-61850 e relacioná-los com os endereçamentos dos objetos dos outros protocolos padronizados (DNP3.0 e IEC-60870-5-101). A utilização de alguns recursos que o padrão IEC-61850 disponibiliza foi de grande ajuda para atender alguns requisitos que eram exigidos, como foi o caso de utilização das mensagens GOOSE na redundância de controles, *trips* e intertravamentos. Estes recursos permitiram uma redução significativa no cabeamento entre os IEDs da sala de controle, e também a possibilidade de integração futura com outros IEDs, inclusive de outros fabricantes. Os testes de conformidade relacionados ao padrão IEC-61850-10 junto com os testes de aceitação praticados pela ELETROSUL seguindo o Plano de Inspeção e Testes (PIT) ajudaram a validar a interoperabilidade do sistema como também na identificação de alguns problemas existentes que foram resolvidos posteriormente.

III. Redes de Comunicação de Dados na Automação de Subestações

O desenvolvimento de sistemas de supervisão e controle, através da automação do gerenciamento de subestações de energia elétrica, em todos os seus níveis, torna-se cada vez mais dependente da intensidade de energia computacional e dos meios de comunicação de dados para distribuir essa energia.

Considera-se automação como a maximização da capacidade operacional dos sistemas de uma subestação, visando a qualidade do serviço prestado, eficiência e redução de custos. É um conjunto de técnicas por meio das quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com eficiência pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam [43].

Um sistema digital de automação de subestações, de modo geral, apresenta as seguintes funções, conforme Grandi [23]:

- Monitoração: interfaces gráficas, com valores provenientes das medições realizadas, além das indicações de estado dos equipamentos (Figura 15);
- Alarmes: ato de notificar sobre a ocorrência de alterações naturais na configuração da malha elétrica, procedimento operacional irregular de um equipamento, ou a ocorrência de violações dos limites operativos das medições;
- Comando Remoto: a ação de movimento ou manobra de dispositivos de controle pode ser guiada por operadores a partir de um centro de operação do sistema, através de interfaces gráficas que apresentem o diagrama unifilar da subestação em questão;
- Registro Seqüencial de Eventos: registro da atuação de relés de proteção, abertura e fechamento de disjuntores e chaves seccionadoras entre outras indicações de estado;

Figura 15 – Ilustração de um sistema de supervisão, controle e proteção
Fonte: [44]

- Proteção: esquemas de proteção e controle planejados para assegurar alimentação aos usuários, limitando a duração e frequência de interrupções, causadas por condições anormais do sistema. Função realizada por equipamentos autônomos e redundantes, como relés de proteção, seja por meio de contatos auxiliares ou transferência de informação por enlaces de comunicação de dados;
- Armazenamento de Dados Históricos: medições, indicações de estado, alarmes e ações executadas devem ser armazenadas, a fim de permitir análise ou auditoria posterior;
- Gráficos de Tendência: possibilitar um exame da evolução das grandezas analógicas no tempo em que durar uma determinada monitoração;
- Intertravamento: execução de bloqueio ou liberação de ações de comando em disjuntores ou chaves seccionadoras em função da topologia da subestação, visando à segurança operativa desses equipamentos;
- Religamento Automático: o restabelecimento de um sistema elétrico em caso de pane ou distúrbio;
- Controle de Tensão e Potência Reativa: lógica de controle que visa manter o nível de tensão e potência reativa nos barramentos, dentro de limites preestabelecidos, através da alteração automática de *taps* de transformadores e a inserção ou retirada parcial ou total de bancos de capacitores;
- Recomposição: o restabelecimento de um sistema elétrico em caso de pane ou perturbação;
- Sincronização: tornar exatamente simultânea a ação de duas fontes do sistema.

De acordo com o Submódulo 10.19 dos Procedimentos de Rede [45], que especifica todos os requisitos de supervisão e as informações que devem estar disponibilizadas nos Centros de Operação do Sistema Elétrico (COS) do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), cada usina ou subestação da rede básica possui um conjunto coerente de informações analógicas e digitais, que devem ser disponibilizadas por dispositivos locais (Tabela 3). Estas informações são os sinais elétricos dos contatos de um disjuntor ou seccionadora, como as informações advindas dos relés de proteção destinadas ao estabelecimento de uma sequência de eventos.

Tabela 3 – Exemplo do volume de informações que chegam aos centros de operação

Centro Regional de Operação do Sistema Elétrico (COSR)	Volume de Informações
COSR-SE (Sudeste)	Pontos Digitais: 34000 Pontos Analógicos: 7100
COSR-NE (Nordeste)	Pontos Digitais: 22964 Pontos Analógicos: 3977
COSR-N (Norte)	Pontos Digitais: 1263 Pontos Analógicos: 7512
COSR-S (Sul)	Pontos Digitais: 20300 Pontos Analógicos: 7100
Centro Nacional de Operação do Sistema Elétrico (CNOS)	Pontos Digitais: 26179 Pontos Analógicos: 13201

Fonte: [46]

Estes dispositivos locais, por sua vez, mediante sistemas de comunicação de dados enviam informações para o COS imediatamente superior na hierarquia operativa, na busca por maior observabilidade e controlabilidade dos sistemas.

A interligação de dados fornece conexão entre sistemas de supervisão e controle locais ou Unidades Terminais Remotas (UTR) em usinas ou subestações, entre concentradores de dados e redes geograficamente distribuídas ou, simplesmente, uma rede local, além de possibilitar a comunicação direta entre relés ajustados para uma dada função de proteção.

3.1 Sistemas de Comunicação de Dados

O termo comunicação de dados expressa a técnica de transferência confiável de informação do sinal de dados entre pontos distintos, como também os ambientes, conjuntos de dispositivos, enlaces e pacotes de *software* que permitam pessoas e equipamentos executar a troca de informações.

Em um sistema de comunicação de dados, estas informações são processadas, recebidas ou enviadas de, ou para, localidades remotas, podendo haver troca de informações entre sistemas locais, através de serviços de telecomunicações [47].

O processo de transmissão existe independente dos sistemas de processamento de dados, envolvendo basicamente os tópicos expressos pela Figura 16:

Figura 16 – Modelo genérico de comunicação

A fonte e o destinatário são caracterizados pela geração e recepção da informação que se deseja transmitir e receber, e no ambiente de comunicação são denominados como Equipamentos Terminais de Dados (ETD), seja um microcomputador, concentrador de dados, terminal de vídeo, impressora, e demais dispositivos que segundo texto da Prática Telebrás 225-540-711 [48], receba os sinais de dados após sua transmissão e que forneça estes sinais para serem transmitidos.

Mensagem pode ser um sinal binário ou de voz, codificado de forma a representar uma informação ou comando. Sua transmissão está diretamente relacionada com o protocolo, conjunto de regras que controla a comunicação, na busca por garantir que o intercâmbio de mensagens esteja sendo realizado de modo organizado e sem erros.

O protocolo tem relação com a disciplina de controle, que pode ser assíncrona (*Start/Stop*) ou síncrona (BSC, SDLC, HDLC, X.25, *Frame-Relay*, ATM, TCP/IP, dentre outros)⁵ para redes de comunicação de curta e longa distância.

Neste modelo genérico de comunicação, o transmissor é o elemento responsável por adaptar a mensagem, normalmente binária, ao meio de comunicação para que possa ser transmitida e, por fim, interpretada pelo receptor. Exemplos de transmissores e receptores clássicos são os *modems* e *codecs*, denominados Equipamentos de Comunicação de Dados (ECD).

⁵ BSC – *Binary Synchronous Communications*; SDLC – *Synchronous Data Link Control*; HDLC – *High Level Data Link Control*; A norma X.25, *Frame-Relay* e ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) são geralmente empregadas para conexões de redes de comunicação externas; TCP/IP – *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*

Os transmissores e receptores são responsáveis por cálculos e manipulações de dados sob a forma de *bits*, ou dígitos binários, como na realização de modulação e demodulação, ou codificação e decodificação da mensagem, para que a mesma seja transformada em sinal apropriado para trafegar na rede de comunicação [49].

Com o intento de especificar como é a relação de troca de sinais elétricos, necessária para estabelecer uma conexão entre a Fonte e o Transmissor, Receptor e o Destinatário, ou Fonte e Destinatário conectados em ambiente local, foram desenvolvidas interfaces digitais, que determinam através de normas internacionais, os conectores mecânicos, funções, direções e níveis elétricos dos sinais de dados, controle e sincronismo. Dentre as principais interfaces digitais para comunicação de dados, têm-se as recomendações EIA232, V24, V28, V35, V36 e G.703.

Por fim, o canal de comunicação é o meio físico utilizado entre dispositivos em conversação. A porção na qual o sinal irá trafegar para chegar ao receptor remoto e só então ao destino solicitado. Este meio é normalmente constituído por pares de fios metálicos, fibra óptica, enlace de rádio ou satélite [47] [49].

3.2 Identificação do Modelo Genérico de Comunicação Aplicado ao SEP

A necessidade de um sistema de comunicação de dados aplicado ao SEP é estabelecida pelo propósito de endereçar pontos de acesso fora do ambiente local de uma subestação, e ao mesmo tempo otimizar a quantidade de equipamentos e aplicações que compartilham os recursos alocados para supervisão, controle e proteção.

No ambiente de uma subestação pode-se caracterizar cada parte do modelo genérico de comunicação, independente da filosofia de proteção aplicada.

O microcomputador do sistema de supervisão e controle, o relé de proteção microprocessado e o concentrador de dados descrevem exemplos de ETDs, como fonte e destinatário do modelo. Já os *modems* e *codecs*, que no ambiente do SEP podem ser encontrados externos ou intrínsecos aos equipamentos da subestação, explicitam ECDs, transmissor e receptor (Figura 17).

Com base nas medições de tensão e corrente (TCs e TPs) e na filosofia de proteção, o sistema determina a ação corretiva mais apropriada através dos ajustes implementados. Ação que pode assinalar, como, por exemplo, uma mensagem para abertura ou fechamento de um disjuntor (DJ), chave seccionadora (CS) ou relé auxiliar.

Figura 17 – Modelo genérico de comunicação aplicado ao SEP

Estas mensagens são efetivadas através de regras sequenciais de requisição e resposta (protocolos de comunicação), que coordenam e controlam operações de transferência de dados [50]. Transferência que transpassa pela interface digital, como, por exemplo, a EIA-232, que tem como função tornar possível a compatibilidade entre ETD e ECD, através da especificação dos conectores mecânicos, funções, direções e níveis elétricos dos sinais.

Por fim, as mensagens trafegam para chegar ao destino, por meio de um canal de comunicação, normalmente constituído por fibra óptica, enlace de rádio, satélite ou pares de fios metálicos.

3.3 Conceitos de Comunicação de Dados aplicados ao SEP

Para viabilizar as diversas configurações e topologias para o processamento de dados em pontos geograficamente distribuídos, faz-se necessária uma noção geral de aspectos conceituais que envolvem as parametrizações das redes e dispositivos de comunicação de dados.

3.3.1 Códigos de Representação Binária

Para tratar uma mensagem nos dispositivos de entrada e saída de dados, por meio de sinais elétricos, é necessário transformá-las em um conjunto de *bits* codificados através de símbolos digitais zeros e uns (0 e 1), que possam ser interpretados por ambas as extremidades no modelo genérico de comunicação.

3.3.3 Simplex

No modo de operação *simplex* a comunicação acontece sempre na mesma direção, ou seja, um sinal flui sempre da estação de origem para a estação de destino (Figura 18).

Figura 18 – Sistema *simplex*

3.3.4 Half-Duplex

Os dispositivos que trabalham em modo *half-duplex* são capazes de comunicação em ambas as direções, porém não simultaneamente (Figura 19).

Figura 19 – Sistema *half-duplex*

3.3.5 Full-Duplex

Este modo de comunicação, também conhecido como *Duplex* é caracterizado pelo fluxo de informação nos dois sentidos simultaneamente (Figura 20).

Figura 20 – Sistema *duplex*

3.3.6 Tipos de Transmissão

A transmissão de dados entre equipamentos pode implicar num modo de procedimento paralelo ou serial.

3.3.6.1 Transmissão paralela

Na transmissão paralela, ocorre a transferência simultânea de vários *bits*. É comum entre equipamentos próximos, em que um é ligado ao outro por cabos de várias vias paralelas. Nos

casos de transmissões que abrangem distâncias maiores, a transmissão em paralelo mostra-se inadequada, em razão da quantidade de vias necessárias (Figura 21).

Figura 21 – Transmissão paralela com um fio para cada *bit*

3.3.6.2 Transmissão serial

Transmissão de um *bit* por vez, em seqüência, ou seja, um após o outro, através de uma única via física. Possibilita economia da interconexão e maior velocidade (Figura 22).

Figura 22 – Transmissão serial, um fio para todo o *byte*

O ritmo de transmissão serial pode acontecer em duas formas: assíncrona e síncrona.

3.3.7 Ritmo de Transmissão

A transmissão de dados entre dois equipamentos pode ser efetuada considerando-se o sincronismo, ou não, dos relógios dos equipamentos envolvidos na transmissão. Cada equipamento tem como parte de sua configuração um circuito eletrônico que controla o tempo, ou relógio, o ritmo das operações realizadas [49].

3.3.7.1 Transmissão assíncrona

Na transmissão assíncrona, o espaço de tempo entre um caractere e outro não é fixo, cada um é tratado de forma independente quanto à sincronização de relógio. O equipamento receptor é responsável pela sincronização a cada caractere recebido.

Para cada caractere que se deseja transmitir, utiliza-se um elemento de sinalização para indicar o início do caractere (*Start*) e outro para indicar o término do caractere (*Stop*), correspondente a 1,4 ou 2 vezes o tempo de um *Start* (Figura 23).

Figura 23 – Representação de dois caracteres numa transmissão assíncrona

Os equipamentos unicamente assíncronos têm, geralmente, um custo de fabricação eletrônica mais baixa. A principal desvantagem é a má utilização do canal de comunicação, já que os *bits* de *start* e *stop* não fazem parte da informação útil, considerados *overhead*, ou seja, *bits* de controle adicionais à informação, que ocasionam uma baixa eficiência na transmissão.

$$Overhead = \frac{Total\ de\ bits\ de\ controle * 100\%}{Total\ de\ bits\ transmitidos\ (controle + caractere)} \quad (1)$$

Comumente, a transmissão assíncrona é empregada em transmissões de dados com velocidades menores que 64000 bps (*bits* por segundo).

3.3.7.2 Transmissão síncrona

A transmissão síncrona é caracterizada pelo envio dos *bits* de um caractere imediatamente após o anterior, de forma contínua.

O sinal que mantém o sincronismo é chamado de *clock* e opera como um relógio entre o transmissor e o receptor, determinando o início e o fim de cada transição de *bit* 0 para 1 e vice-versa [52]. Antes da transmissão de uma mensagem, o transmissor envia uma cadeia de *bits* de sincronização, com a finalidade de situar o receptor em fase com o mesmo (Figura 24).

Figura 24 – Representação ilustrativa de uma transmissão serial síncrona

A transmissão síncrona permite o emprego de velocidades maiores ou iguais a 1200 bps, maior eficiência no uso do canal de comunicação, além de técnicas para detecção e correção de erros, como, por exemplo, paridade e CRC (*Control Redundancy Check*).

Uma desvantagem dos equipamentos síncronos é o encarecimento do custo eletrônico, devido à necessidade de armazenamento (*buffers*) para os caracteres, que serão enviados em blocos e à velocidade constante.

3.3.8 Modulação Analógica de Sinais Digitais

A modulação analógica de sinais digitais é um processo de transporte da mensagem codificada em *bits*, entre transmissor e receptor, através da alteração isolada ou conjunta de certas características como amplitude, frequência ou fase de uma onda denominada portadora.

Esta alteração na onda portadora constitui-se segundo um sinal modulante, ou seja, a informação que se deseja transportar pelo canal de comunicação.

O sinal digital gerado pelo ETD é inserido na onda portadora, que é gerada pelo ECD. No caso de uma modulação analógica, este papel cabe ao *modem*. As características originais da onda portadora são modificadas de acordo com a técnica de modulação utilizada, e esta transporta os dados até o receptor, outro *modem*, que demodula o sinal e entrega ao ECD remoto, em sua forma original [47].

As técnicas tradicionais de modulação são conhecidas como modulações por chaveamento: ASK (*Amplitude Shift Keying*), FSK (*Frequency Shift Keying*) e PSK (*Phase Shift Keying*), conforme Figura 25 [53].

Figura 25 – Técnicas básicas de modulação do sinal digital

3.3.9 Codificação de Sinais Digitais

A codificação é uma mudança na representação do sinal digital, que transforma o sinal digital oriundo do ETD em outro sinal mais adequado às condições do canal de comunicação [51].

Em campo, os operadores e técnicos costumam designar o ECD que trabalha com técnicas de codificação como *modem* digital, porém, estes realizam codificação e decodificação, sendo mais apropriado o uso do termo *codec*.

As diversas técnicas de codificação do sinal digital, como NRZ (*Non Return to Zero*), RZ (*Return to Zero*), AMI (*Alternate Mark Inversion*), HDB3 (*High Density Bipolar 3 Zeros*), e várias derivações, procuram gerar muitas transições, a fim de facilitar a recuperação do sincronismo pelo receptor [54] (Figura 26).

Figura 26 – Técnicas básicas de codificação do sinal digital

3.3.10 Canais de Comunicação

Nas redes de comunicação de dados, os canais ou meios de transmissão são os caminhos físicos responsáveis pelo transporte do fluxo dos sinais de dados entre dois pontos. Os termos canal, enlace, linha, circuito, *link* são freqüentemente utilizados no jargão técnico, e podem segundo Sousa [52] designar, basicamente, três meios utilizados na transmissão de dados:

- Transmissão por fios ou cabos de cobre: os dados são transmitidos por sinais elétricos que se propagam pelo metal;
- Transmissão por fibras ópticas: os dados são transmitidos por sinais luminosos que se propagam pelo vidro ou plástico que formam a fibra óptica;
- Transmissão por irradiação eletromagnética: os dados são transmitidos por sinais elétricos irradiados por antenas através do espaço.

De maneira geral, os meios físicos tais como fios ou cabos de cobre e fibras ópticas são classificados como meios guiados. Por outro lado, os meios não guiados utilizam a atmosfera terrestre ou o espaço para irradiar, por exemplo, sinais de microondas ou satélite.

A transmissão de dados pode ocorrer através de vias de comunicação proprietárias, como no SEP, onde as filosofias de proteção utilizam comunicações como o fio piloto, onda portadora (*Carrier*), cabo dielétrico de fibra óptica, cabo OPGW e microondas.

Neste caso, a comunicação entre os relés das barras adjacentes de uma linha de transmissão, e centros de operação, é um procedimento denominado teleproteção [9].

Empresas autorizadas pelo governo para transmitir informações de terceiros, cobrando do usuário ou empresa um valor mensal pela prestação do serviço, as concessionárias públicas de telecomunicações também oferecem serviços e canais de comunicação de dados de curta e longa distância.

Pelos canais de comunicação de dados, trafega uma onda portadora analógica que transporta o sinal digital modulado ou canais digitais em que a informação é transmitida diretamente no formato digital, através da codificação, sendo que, as velocidades podem variar de 1200 bps a dezenas de Mbps.

3.3.10.1 Fio piloto

Fio Piloto é um condutor físico utilizado entre duas extremidades de uma linha de transmissão a ser protegida, com objetivo de conduzir o sinal de comunicação.

A conexão física pode ser efetivada com fios telefônicos, cabos elétricos ou fios nus, de acordo com o sinal a ser transmitido entre os sistemas de proteção, como sinais de corrente contínua (DC), corrente alternada (AC) em 60 Hz, dos TCs de uma linha, ou sinais de áudio frequência.

Em essência, a proteção por fio piloto, utiliza-se da filosofia do relé diferencial, função 87, aplicados nos limites da linha (Figura 27).

Figura 27 – Esquema básico da proteção com Fio Piloto

Pode-se utilizar o fio piloto para proteção de linhas de transmissão curtas de 10 até 30 km, transformadores, geradores síncronos e cabos elétricos, principalmente subterrâneos. A limitação deste meio é determinada pela atenuação elevada do sinal de comunicação, além do alto índice de manutenção, média confiabilidade no que tange às interferências eletromagnéticas, e fatores externos, como vandalismo e meio ambiente [9].

3.3.10.2 Onda portadora

A comunicação do sinal de dados por onda portadora, denominada *Carrier*, funciona através da transmissão de uma corrente de baixa tensão e alta frequência na ordem de 20 a 400 kHz, que utiliza o próprio cabo condutor da linha de transmissão para a propagação do sinal, superposto à corrente de carga, interligando subestações e usinas.

O sinal a ser transmitido é modulado na onda portadora, através de dispositivo denominado T/R, transmissor e receptor *Carrier*, aplicado na extremidade da linha de transmissão e recebido na ponta remota, onde outro T/R executa a demodulação, extraindo o sinal de informação. Este sistema é conhecido por Onda Portadora sobre Linha de Alta Tensão (OPLAT) [9].

O sistema associado à transmissão por onda portadora, concisamente, é composto pelo T/R e dispositivos descritos na Figura 28.

Figura 28 – Diagrama representativo de transmissão via Onda Portadora

Onde:

- Filtro de Onda: é composto por um indutor e um capacitor em paralelo, em série com a linha de transmissão, oferecendo um circuito ressonante que apresenta alta impedância para frequência operativa do sinal *Carrier* e uma baixa impedância à

freqüência do sistema (60 Hz). O filtro de onda, também denominado bobina de bloqueio, evita que o sinal *Carrier* flua para as subestações, confinando-o na linha de transmissão [9];

- Capacitores de acoplamento: têm a função de isolar o equipamento T/R do circuito de alta tensão, além de servir como caminho de injeção do sinal *Carrier* à linha de transmissão. Os capacitores apresentam baixa impedância às correntes com freqüência operativa do sinal *Carrier* e uma alta impedância à freqüência do sistema (60 Hz) [5];
- Equipamento de Sintonia: tem como finalidade efetuar o casamento de impedâncias, reduzindo as perdas com o envio do sinal *Carrier* do T/R à linha de transmissão.

A vantagem da onda portadora está na economia gerada pela utilização da linha de transmissão como meio físico, o que proporciona baixo custo de manutenção, na facilidade de acesso e suporte físico confiável, não sendo necessário o uso de repetidores para transmissão a longa distância.

Como desvantagens, pode-se citar a baixa capacidade de canalização, faixa limitada do espectro de freqüências, susceptível à abertura dos condutores da linha de transmissão, curtos-circuitos, interferências eletromagnéticas e eletrostáticas, além de ruídos gerados no SEP pela manobra de disjuntores e chaves seccionadoras.

3.3.10.3 Fibra óptica

A fibra óptica é um guia de luz de formato cilíndrico composta, basicamente, por dois materiais cristalinos concêntricos, núcleo e casca, pelo qual trafegam pulsos de luz que representam os dados a serem transmitidos.

De acordo com a aplicação, as fibras necessitam de uma proteção para garantir suas características de transmissão, sendo acondicionadas em cabos ópticos e cordões ópticos multifibras. Estes revestimentos existem para protegê-la do meio ambiente e de esforços mecânicos, que por acaso venham a sofrer durante a instalação e operação.

Na Figura 29, estão representados os principais elementos de um cabo de fibra óptica, que tem a seguinte composição [49] [55]:

- Núcleo: filamento de vidro por onde o sinal de luz se propaga;
- Casca ou Revestimento: camada de vidro, que reveste o núcleo, com menor índice de refração, impedindo que a luz seja refratada, ou seja, escape para fora do núcleo. Núcleo e casca constituem o denominado guia óptico;

- Filme: camada constituída de material termoplástico para cabos mais grossos ou material gel para cabos flexíveis, protege núcleo e casca contra esforços mecânicos;
- Fibras de resistência mecânica: são fibras que protegem o núcleo contra impactos e tensões excessivas durante seu manuseio, encolhimento ou expansão devido às variações de temperatura. Normalmente, são confeccionadas de *Kevlar*, material resistente utilizado em coletes à prova de balas;
- Cobertura: cobertura final do conjunto, para proteção em função dos ambientes ao qual o cabo estará sujeito.

Figura 29 – Cabo de Fibra Óptica

Na proteção do SEP, como canal de comunicação de dados, a fibra óptica é similar ao fio piloto. O sinal elétrico é convertido em sinal óptico, equivalente à informação de dados a ser transmitida, por um transdutor fotoelétrico, interno ou acoplado ao relé em ambas as extremidades, conforme esquema de proteção (Figura 30).

Figura 30 – Diagrama representativo de transmissão via cabo dielétrico de Fibra Óptica

A fonte emissora de luz pode ser um diodo eletroluminescente (LED, *Light Emitting Diode*) ou diodo semiconductor (LASER, *Ligh Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*).

Os sinais são codificados dentro do espectro de frequência do infravermelho, entre 10^{14} e 10^{15} Hz, enviados por um cabo dielétrico⁶ de fibra óptica e, finalmente, reconvertida de sinais ópticos para sinais elétricos, pelo transdutor fotoelétrico da extremidade remota.

As fibras ópticas são classificadas em função da geometria e do índice de refração do núcleo. O que leva a destacar os tipos básicos como [9] [55] [56]:

- Fibra multimodal: as fibras multimodais apresentam um diâmetro de núcleo maior, devido ao número de modos diferentes de propagação da luz, que pode incidir em diferentes ângulos, por exemplo, valores comerciais de 62,5 μm e, casca com 125 μm . De acordo com o perfil do índice de refração, podem ser classificadas como: índice degrau, que apresenta somente um nível de reflexão e taxa de transmissão relativamente baixa, em virtude de uma atenuação relativamente elevada (≥ 4 dB/km) e uma largura de banda pequena (≤ 25 MHz/km); índice gradual, com vários níveis de reflexão, que desfruta de uma atenuação menor (3 dB/km a 850 nm) e uma largura de banda elevada (1 GHz/km), garantindo maior taxa de transmissão de dados (Figura 31).

Figura 31 – Fibra multimodo índice degrau e índice gradual, respectivamente

- Fibra monomodal: apresenta o diâmetro de núcleo com valor pouco maior que o comprimento de onda, permitindo a incidência da luz somente em um ângulo, de forma que apenas um modo seja guiado. Com diâmetro de 2 a 10 μm , e casca entre 80 a 125 μm , este tipo de fibra apresenta uma grande largura de banda que é da ordem de 10 a 100 GHz, pois não há dispersão modal, e baixa atenuação que varia entre 0,2 dB/km a 0,5 dB/km (Figura 32).

Figura 32 – Fibra monomodal

As vantagens no uso da fibra óptica são [9] [54] [55] [57]:

⁶ Cabos dielétricos, exclusivamente construídos com fibras e materiais não condutores, sem nenhum componente metálico [57].

- Atingem altas taxas de transmissão de dados, por exemplo, 50 Gbps a uma distância máxima de 100 km (fibra monomodo);
- Não está sujeita a interferências eletromagnéticas e estáticas;
- As perdas de transmissão são baixas, requerendo repetidores do sinal após longas distâncias;
- Um cabo de fibra óptica com dimensões expressas em milímetros e peso de 3,6 kg consegue transmitir tantos sinais quanto um cabo com 7,6 cm e 900 pares de cabos de cobre com peso de 94 kg;
- Disponibilização de vários canais de comunicação o que possibilita a realização de múltiplas tarefas, tais como: transmissão de áudio e vídeo e sinais de dados para medição, controle e supervisão do SEP;
- Canal de comunicação dedicado e com transmissão segura e precisa dos dados de informação;
- Boa resistência ao ataque de produtos químicos e a variações de temperatura;
- Como não ocorre o tráfego de corrente elétrica, pode ser utilizada em locais onde exista perigo de fogo ou explosão no caso de faíscas;
- Possibilita ações de auto-diagnóstico na integridade dos sistemas e da própria fibra óptica.

As desvantagens podem ser caracterizadas conforme tópicos abaixo:

- Fragilidade quando não protegida por revestimento (casca);
- O processo de conexão demanda conectores e equipamentos específicos, elevando seu custo;
- Dificuldade de realizar derivações, em virtude da perda de potência luminosa irradiada;
- Por ocasião de uso de repetidores, faz-se necessária alimentação elétrica local para estes dispositivos.

3.3.10.4 Cabos OPGW

A linha de transmissão de energia elétrica, com sua notável infra-estrutura, estende-se por longas distâncias entre a geração e os centros de distribuição. Representam uma base material que serve de sustentáculo para os cabos ópticos de longa distância, que por sua vez possuem a peculiaridade de imunidade a interferências eletromagnéticas e estáticas.

Neste ínterim, desenvolveram-se os cabos OPGW, cabos pára-raios destinados à proteção das linhas de transmissão, formados por um condutor metálico, por exemplo, um tubo de alumínio, com fibras ópticas instaladas em seu interior (Figura 33).

Figura 33 – Cabo OPGW

O cabo terra está conectado na torre de transmissão. Na ocasião de uma descarga atmosférica, o raio será atraído pelo condutor metálico do cabo OPGW e guiado até a torre mais próxima, onde será escoado para a terra pelo aterramento (contrapeso) do pé da torre [9]. Nas torres extremas do trecho atendido pelo esquema de proteção, as fibras são retiradas do interior do cabo-terra e conectadas ao cabo óptico dielétrico que é conduzido ao equipamento de comunicação de dados ou à estação repetidora, fora da área de alta tensão (Figura 34).

Figura 34 – Diagrama representativo de transmissão via cabo OPGW

A transmissão com OPGW pode envolver grandes distâncias, o que torna possível sua utilização em sistemas de supervisão, controle e proteção do SEP, transmissão de sinais de TV, *Internet* e serviços para companhias telefônicas.

3.3.10.5 Rádio microondas

Na transmissão por rádio microondas, os dados são transmitidos por sinais elétricos irradiados por antenas parabólicas através do espaço. É um meio de comunicação ponto a ponto, que exige visada direta, ou seja, a antena que transmite o sinal deve apontar diretamente para aquela que recebe o sinal, com espaço livre de obstáculos naturais e artificiais [55] (Figura 35).

Figura 35 – Diagrama representativo de transmissão via Microondas

Conforme Kindermann [9], a faixa de frequência deste sistema de comunicação é:

- UHF (*Ultra High Frequency*) de 300 MHz a 3 GHz;
- Microondas de 3 GHz a 30 GHz.

As principais características desse meio de comunicação são:

- É independente do SEP, dos efeitos das correntes de curto-circuito na linha de transmissão e das interferências eletromagnéticas geradas na subestação;
- Possui altas taxas de transmissão de dados, da ordem de 44 até 275 Mbps, a uma distância de 50 km. Consente a utilização de repetidores, quando houver a necessidade de atravessar distâncias que excedam esta marca;
- Não é necessário adquirir direito de passagem com o meio de comunicação;
- São sistemas que exigem infra-estrutura onerosa sendo afetadas pelas condições atmosféricas.

3.3.11 Interfaces Digitais

A interface digital de comunicação de dados é um dispositivo de entrada e saída que torna possível a compatibilidade entre os equipamentos que originam e recebem a informação digital, ETD, e os equipamentos que têm a função de tratar o sinal digital gerado pelo terminal, ECD, de forma a transmiti-lo ao longo do canal de comunicação e, na recepção, recuperar a forma original (digital) do sinal gerado pelo terminal remoto, entregando-o ao terminal receptor [50] [51].

Ambos os grupos de equipamentos, ETD e ECD, apresentam uma interface digital padronizada, para entrada e saída dos dados binários (Figura 36).

Figura 36 – Localização da interface digital

O adaptador de interface serial consiste de um módulo de entrada e saída conectado a um barramento do ETD. Este módulo contém circuitos que provêm a parte elétrica do protocolo de comunicação empregada na interface (Figura 37).

Figura 37 – Componentes físicos de uma interface digital

A interface digital define as características mecânicas, no que tange aos tipos de conectores, dimensões e disposição dos pinos, a função de cada pino, níveis de tensão e corrente nos circuitos que transportam os sinais e o seqüenciamento das ações efetuadas entre

ETD e ECD, para que exista a troca de dados. A porção do protocolo de comunicação que cabe ao ECD é provida na placa de circuito eletrônico deste equipamento.

A interface é, dessa maneira, um importante ponto de teste para análise dos dados durante a operação normal ou para medições e simulação de erros quando o circuito de comunicação de dados se encontra fora de serviço, seja por manutenção programada ou defeito.

Conforme Gommlich [58], uma transferência incorreta de dados pode ser o efeito de sinais anormais na interface, sendo que as falhas podem ocorrer por:

- Amplitudes muito baixas ou tempos de subida muito lentos;
- Sinais ausentes ou interrupções esporádicas;
- Sinais de relógio distorcidos;
- Sinais de indicação e controle incorretamente sincronizados.

Essas falhas podem ser detectadas e isoladas, freqüentemente, através do uso de equipamentos de teste que simulam todas as características da interface digital.

3.3.11.1 Padrão RS-232

Na década de 60, o laboratório norte-americano BELL (*Bell Telephone Laboratories Inc*) e a EIA especificaram a primeira versão do padrão de interface para comunicação de dados, RS-232 (*Recommended Standard 232*), que logo em seguida, com algumas alterações (revisão C), tornou-se RS-232-C (EIA-232-C), que é equivalente às recomendações V.24 e V.28 da ITU-T (*Telecommunication Standardization Sector of ITU, International Telecommunications Union*) que corresponde ao antigo CCITT (*International Telegraph and Telephone Consultative Committee*) [51] [59].

No final dos anos 80, a revisão D foi proposta, e no início dos anos 90, sua quinta revisão, denominada EIA/TIA-232-E, foi apresentada pelos comitês técnicos da EIA/TIA (*Electronics Industries Association/Telecommunications Industry Association*).

Dentre as características mecânicas, o padrão define através da norma ISO (*International Organization for Standardization*) 2110, a altura, comprimento e largura de um conector com 25 pinos, conhecido como DB-25. Atualmente, ocorre a utilização de uma versão reduzida da interface, que utiliza um conector de 9 pinos, tipo DB-9 (Figura 38).

Figura 38 – Cabos com conectores de 25 pinos (DB-25) e 9 pinos (DB-9)

Fonte: [60]

O padrão EIA/TIA-232-E, e a recomendação V.28, ITU-T, definem os níveis de tensão dos sinais nas linhas da interface, que são representadas como estados lógicos 1 (marca) e 0 (espaço) nas linhas de transmissão e recepção, e como estados ativo (ON) e inativo (OFF) nas linhas de controle, sincronismo e sinalização (Tabela 5).

Tabela 5 – Níveis de tensão dos sinais da interface RS-232

Classe de Sinal	Nível Lógico	Faixa de Tensão
Sinais de Dados	1 Marca	-3V a -15V
	0 Espaço	+3V a +15V
Sinais de controle, sincronismo e sinalização	1 Ativo	+3V a +15V
	0 Inativo	-3V a -15V
Faixa de Transição	- Indefinido	-3V a +3V

Fonte: [61]

Enunciam também que a interface é desbalanceada, ou seja, os circuitos compartilham um sinal de terra comum, e limitam a taxa de transmissão a 20 kbps em distâncias até 15 m. Este valor é particularmente importante quando se transmitem dados à maior velocidade, de acordo com a interface utilizada [58] [59].

As características funcionais definidas pelo padrão EIA/TIA-232-E e V.24, ITU-T, atribuem significado aos sinais transmitidos e recebidos através dos seus pinos, isto é, a função de cada pino e a direção do sinal, origem e destino (Tabela 6).

Os sinais de interface podem ser divididos nas seguintes categorias:

- Sinais de Dados: são linhas de transmissão e recepção, que transportam os dados binários entre ETD e ECD. A existência de duas vias permite a operação em modo *duplex*;
- Sinais de Sincronismo: fornecem a base de tempo (*clock*) a ser utilizada para a transmissão de dados;

- Sinais de Controle: grupo de sinais que fornecem comando e estado geral de funcionamento de ETD e ECD;
- Sinais de Teste: linhas que permitem o diagnóstico de falhas no equipamento e canal de comunicação.

Tabela 6 – Características funcionais definidas pelo padrão EIA/TIA-232-E e V.24, ITU-T

Pino DB-25	V.24	EIA-232	Descrição	Categoria	Origem
2	103	DTX	Dados a transmitir	Dados	ETD
3	104	DRX	Dados recebidos	Dados	ECD
15	114	TCK	Sincronismo de Transmissão	Sincronismo	ECD
17	115	RCK	Sincronismo de Recepção	Sincronismo	ECD
24	113	TCKE	Sinc. de transmissão externo	Sincronismo	ETD
20	108	DTR	ETD operacional/pronto	Controle	ETD
6	107	DSR	ECD operacional/pronto	Controle	ECD
11	126	MOD	Seleção modo(origem/Destino)	Controle	ETD
23	111	VEL	Seleção de Velocidade	Controle	ETD
4	105	RTS	Solicitação para transmitir	Controle	ETD
5	106	CTS	Pronto para transmitir	Controle	ECD
8	109	DCD	Portadora detectada	Controle	ECD
22	125	RING	Linha chamando	Controle	ECD
21	140	LDR	Enlace digital remoto	Teste	ETD
18	141	LAL	Enlace analógico local	Teste	ETD
25	142	TST	ECD em teste	Teste	ECD
7	102	0V	Nível de referência de tensão	---	---
1	101	GND	Terra de proteção (0V)	---	---

Fonte: [47] [58] [62]

As características procedurais definem a seqüência de sinalizações na interface para que os dados sejam transmitidos corretamente no meio físico. Por exemplo, a Figura 39 ilustra algumas interações entre os sinais de interface, descritas abaixo segundo Hexsel [61]:

- Imediatamente depois de energizados, os ETDs e ECDs trocam os sinais DTR (*Data Terminal Ready*) e DSR (*Data Set Ready*) pelos pinos correspondentes indicando que estão aptos a iniciarem o processo de transmissão;

- O ETD que deseja transmitir dados solicita autorização ao ECD, através do sinal RTS (*Request to Send*);
- O ECD que recebe o RTS libera a portadora;
- Ao receber a portadora o ECD remoto informa DCD (*Data Carrier Detected*), portadora detectada, ao ETD remoto;
- Após um intervalo pré-determinado, o ECD local envia autorização de transmissão ao ETD através do sinal CTS (*Clear to Send*);
- Na fase de transmissão, ocorrem a modulação ou codificação, a transferência dos dados através do canal de comunicação, e a recepção, com demodulação ou decodificação.

Figura 39 – Seqüência básica de sinalizações na interface

A interface digital pode ser aplicada para a interconexão direta de dois equipamentos de mesmo tipo (ETD-ETD ou ECD-ECD), se estes estirem fisicamente próximos.

A ligação é estabelecida através de um cabo onde os sinais de dados e controle são invertidos, ou seja, transmissão de um lado com recepção de outro e vice-versa. O cabo com as ligações de sinais invertidos é denominado *crossover*, e comporta-se como um *modem nulo*, onde não existe a necessidade de portadora para transmissão. Os dados digitais são transferidos diretamente após o processo de inicialização (Figura 40).

Figura 40 – Cabo crossover com interface RS-232 e conector mecânico DB-9

3.3.11.2 RS-449, V.35, V36, G.703 e USB

Com o intuito de aumentar os limites de velocidade e distância impostos pela RS-232 e V.24/V28, EIA/TIA e ITU-T, respectivamente, elaboraram novos padrões para conexão dos dispositivos de comunicação de dados.

A EIA/TIA-RS-449 é uma interface para transmissão de dados em velocidades acima de 20 kbps, e utiliza um conector de 37 pinos devido à adição de várias funções não pertinentes a RS-232. São possíveis configurações balanceadas e desbalanceadas, dependendo da velocidade de transmissão requerida.

As propriedades elétricas das linhas desbalanceadas são definidas pela EIA/TIA-RS-423, que na representação dos sinais binários interpreta o 0 (espaço) quando uma variação de +4 V ocorrer, e o sinal binário 1 (marca) para uma tensão inferior a -4 V. Opera com uma taxa de 300 kbps em distâncias de 10 m, ou em uma distância máxima de 1000 m a uma taxa de transmissão de 3 kbps [49] [59].

As linhas balanceadas encontram-se na EIA/TIA-RS-422, cuja variação de tensão maior do que +0,2 V descreve o sinal binário 1 (marca). Caso a diferença seja negativa e maior que -0,2 V, o sinal é compreendido como 0 (espaço). A taxa de transmissão neste padrão pode atingir 2 Mbps com cabos de 60 m, 10 Mbps com 10 m, ou de 100 kbps em 1000 m [49] [62].

As recomendações V.35 e V.36 da ITU-T são aplicáveis às taxas de transmissão iguais ou superiores a 48 kbps. As vias de dados e relógio são balanceadas, enquanto as linhas de controle e indicação são desbalanceadas.

A recomendação V.24 descreve as várias funções das linhas da interface V.35, sendo os níveis elétricos para indicação e controle explicitadas na recomendação V.28. Já os níveis lógicos para sinais de dados e sincronismo são os seguintes:

- 0 (espaço) = +0,55 V;
- 1 (marca) = -0,55 V.

A ligação desta interface digital é executada através de um conector com 34 pinos (M-34), descrito pela ISO-2593.

Na interface V.36 as linhas balanceadas de dados e sincronismo são descritas na recomendação V.11, ITU-T, que explicita o nível lógico 0 (espaço) entre +2 V e +6 V, e o nível lógico 1 (marca) entre -2 V e -6 V. As funções das outras linhas da interface são definidas pela recomendação V.24, sendo utilizado um conector de 37 pinos ISO-4902.

Equipamentos que operam com velocidades de $n \times 64$ kbps podem utilizar também a interface G.703, recomendação da ITU-T, que discorre, principalmente, das especificações da interface física a quatro fios e da sinalização digital para hierarquia de transmissão T1/E1, referindo-se ao sistema da América do Norte de 24 canais de 64 kbps (1544 kbps) para transmissão de voz e dados, e o padrão europeu de 30 canais de 64 kbps (2048 kbps), respectivamente [63].

No método de transmissão o sincronismo é codificado com os dados, existindo apenas dois pares de sinal: transmissão e recepção. A técnica mais comum de codificação é o HDB3, entretanto, outras técnicas são admissíveis.

As mídias de transmissão a 2048 kbps podem ser cabos coaxiais de 75Ω , delineando o nível lógico 0 (espaço) entre 0 V e $\pm 0,3$ V, e o nível lógico 1 (marca) com pico máximo de +3 V, ou interface balanceada de pares trançados simétricos de 120Ω , onde o nível lógico 0 (espaço) está entre 0 V e $\pm 0,237$ V, e o nível lógico 1 (marca) com pico máximo de +2,37 V [64], conector tipo BNC ou SPINER.

Têm conquistado popularidade nas arquiteturas dos ETDs a interface digital USB (*Universal Serial Bus*), que permite a interligação de até 127 dispositivos com uma taxa de transmissão da ordem de 12 Mbps [49].

A conexão e desconexão de dispositivos ocorrem de maneira dinâmica, ou seja, sem a necessidade de efetuar o desligamento do ETD.

Diversas são as interfaces digitais padronizadas para compatibilizar equipamentos de transmissão no âmbito da comunicação de dados. Minúcias dos sinais e conectores das interfaces podem ser encontradas nas referências [47] [49] [58] [64] [65].

IV. LAN, WAN, TCP/IP e *Intranet* em Sistemas de Potência

Os sistemas de automação e controle das subestações têm se apoiado cada vez mais em sistemas de comunicação de dados e redes de computadores, pela crescente complexidade dos processos intrínsecos ao sistema elétrico, pela distribuição geográfica – fator presente entre geração, transmissão e distribuição da energia elétrica – e pela busca de melhores condições de proteção do sistema elétrico. No momento, sistemas distribuídos e interconectados são utilizados em muitas aplicações, tal como no controle e automação de subestações, nas filosofias de proteção e gerenciamento das informações fornecidas pelos dispositivos do SEP.

Considera-se, que uma rede de computadores é formada por um conjunto de módulos processadores (MPs)⁷ autônomos, capazes de trocar informações e compartilhar recursos, interligados por um sistema de comunicação de dados [59].

Segundo Mendes (*apud* Rosário [66]), vários fatores motivaram a utilização dos sistemas de comunicação de dados e redes de computadores para sistema interligados, tais como:

- Possibilidade de obter dados confiáveis para a tomada de decisões;
- Redução de custos operacionais e de investimento, graças ao compartilhamento de recursos;
- Distribuição geográfica crescente, resultante da diminuição de custos dos sistemas pela tecnologia do processamento distribuído;

⁷ A definição de módulos processadores se refere a qualquer dispositivo capaz de se comunicar através do sistema de comunicação para troca de mensagens. Pode-se citar, por exemplo, um microcomputador, um relé digital ou numérico, e um processador de comunicação.

- Necessidade de implantação gradativa de sistemas com novas tecnologias, na medida das necessidades e da expansão, de acordo com a evolução das aplicações, com vista a promover sua viabilização técnica e econômica no processo de implantação e operacionalidade;
- Maior competitividade dentro do mercado;
- Especialização funcional dos sistemas locais microprocessados.

Dentre as modernas tendências na proteção do sistema elétrico, Coury [8] explicita que os sistemas de potência se apresentam como um ramo altamente beneficiado através do uso das tecnologias de comunicação, devido fundamentalmente à capacidade de monitoramento e controle que estes podem trazer às mais diversas áreas, uma evolução em comparação aos sistemas de comunicação convencionais, utilizados nos sistemas de proteção, conforme descrito no Capítulo III. Giovanini [16] deduz que, apesar da comunicação existente entre os relés, estes sistemas trabalham de maneira solitária (*standalone*), sendo que nenhuma tomada de decisão é feita de maneira conjunta pelos relés presentes no sistema.

No âmbito da automação de subestações as necessidades da comunicação atual incluem:

- Comunicação de alta velocidade entre os dispositivos situados nos níveis de processo, *bay* e estação;
- Interoperabilidade e intercambialidade entre diferentes fabricantes;
- Comunicação entre redes do SEP;
- Facilidade para manejar amostras de dados de tensão e corrente de forma local e distribuída (entre os vários IEDs);
- Facilidades de transferência de arquivos;
- Tempos de envio garantidos;
- Configuração automática;
- Segurança.

Neste ínterim, o sistema de comunicação da subestação constitui-se de um arranjo topológico que interliga vários módulos processadores autônomos, como, por exemplo, os IEDs, através de enlaces físicos, os canais de comunicação, e de um conjunto de regras, protocolos, com o objetivo de organizar a troca de informações, conforme ilustra a Figura 41.

Os sistemas de monitoramento, controle e proteção podem ser otimizados com a utilização de uma rede local (*Local Area Networks*, LAN), ou rede local de subestação (SLAN) cujas distâncias entre os módulos processadores se enquadram na faixa de alguns poucos metros a um 1 km, conforme explicita Tanenbaum [62].

Figura 41 – Sistema de controle e proteção baseado em sistema de comunicação e redes
Fonte: [67]

Segundo o mesmo autor [62] uma rede cuja dispersão está entre 1 e 10 km, projetada para se estender por toda uma cidade é intitulada rede metropolitana (*Metropolitan Area Network*, MAN). Para finalizar esta classificação, uma rede cuja dispersão é maior que 10 km, abrangendo uma ampla área geográfica, com frequência um país ou continente é denominada rede geograficamente distribuída (*Wide Area Network*, WAN). No ambiente da subestação uma WAN pode ser utilizada para interligação de uma subestação ao centro de controle, a outras subestações ou usinas, conforme propõe Hammatsu [67].

4.1 Redes LAN

As redes locais, LANs, são redes privativas que apresentam seus dispositivos instalados em uma área restrita, como a sala de uma subestação ou o prédio da usina elétrica, permitindo o compartilhamento de recursos e a troca de informações.

Dentre diversos aspectos que devem ser considerados na LAN, uma breve introdução à teoria de redes locais deve apreciar: (1) Topologias Físicas, (2) Dispositivos de *Hardware* e, (3) Topologias Lógicas.

4.1.1 Topologias Físicas

A topologia física enuncia o modo como os dispositivos de uma rede são interligados fisicamente. As topologias primárias usadas com LANs são barramento, estrela e anel.

4.1.1.1 Topologia em barramento

Topologia em barramento (*Bus*) apresenta um condutor, canal de comunicação (também conhecido como *backbone* ou segmento), no qual os dispositivos se conectam, como, por exemplo, relés digitais ou numéricos (Figura 42).

Figura 42 – Topologia em barramento

As principais vantagens dessa topologia são [55] [68]:

- Facilidade de implementação e manutenção;
- O condutor (*backbone*) pode ficar situado ao longo de um caminho mais eficiente, Desse modo, a topologia utiliza menos cabeamento para interligação dos dispositivos;
- Facilidade de ampliação, tanto na quantidade de dispositivos quanto na extensão;
- Menor custo.

As principais desvantagens dessa topologia são [55] [68]:

- Se houver uma grande quantidade de dados sendo transmitidos, ocorre uma diminuição na taxa de transmissão, pois o meio de comunicação é único para todos os dispositivos conectados no barramento;
- Caso ocorra algum problema com o barramento, por exemplo, ruptura do cabo, ou com dispositivos conectados ao barramento, pode acontecer a interrupção do funcionamento de toda a rede.

4.1.1.2 Topologia em estrela

Uma rede com topologia em estrela é ilustrada na Figura 43. Cada dispositivo da rede é interligado a um componente centralizador, através do qual as mensagens devem passar. Segundo Soares [59], tal nó age, assim, como centro de controle da rede, interligando os demais nós. Nada impede que haja comunicações simultâneas, desde que as estações envolvidas sejam diferentes.

Esse dispositivo, que pode ser um *hub* ou *switch*, possui várias portas, pelas quais os dispositivos são conectados individualmente e para onde converge todo o tráfego.

Figura 43 – Topologia em estrela

As principais vantagens apresentadas por essa topologia são [59] [68]:

- Uma falha no cabo ou dispositivo não paralisa toda a rede, somente aquele segmento onde está a falha será afetado;
- Facilidade de expansão, pois para acrescentar um dispositivo, basta conectá-lo em uma entrada do componente centralizador;
- Quando se excede a capacidade de conexão do centralizador, basta trocá-lo por outro com maior número de portas.

As principais desvantagens apresentadas por essa topologia são [59] [68]:

- A rede poderá ser paralisada se houver uma falha no dispositivo central;
- Apresenta um custo maior de instalação, devido ao componente centralizador e maior quantidade de cabos, pois cada dispositivo deve ser conectado diretamente no dispositivo centralizador.

4.1.1.3 Topologia em anel

Essa topologia possui um anel de comunicação central no qual todos os dispositivos serão conectados. Um sinal é transmitido ao longo do anel numa única direção, de um dispositivo a outro, até alcançar o destino (Figura 44).

Figura 44 – Topologia em anel

As principais vantagens apresentadas por essa topologia são [68]:

- Um anel é relativamente fácil de instalar e reconfigurar, pois cada dispositivo é interligado somente com os vizinhos imediatos;
- Um alerta é gerado se qualquer dispositivo não receber um sinal dentro de um período de tempo predeterminado, técnica que facilita o isolamento de uma falha.

As principais desvantagens da topologia anel são [55] [68]:

- Falha de um dispositivo pode afetar o restante da rede;
- Para ampliar a rede é necessária sua paralisação.

4.1.2 Dispositivos de *Hardware* das LANs

Vários equipamentos podem ser utilizados na interconexão e composição de redes locais, dependendo das características desejadas e da topologia escolhida. Os elementos ativos, formados por todos os equipamentos que proporcionam o funcionamento adequado conforme o padrão de rede estabelecido, interagem, produzindo um sistema de comunicação balanceado e estruturalmente equilibrado. Segundo Soares Neto *et al* [69] estes elementos são peças sumariamente importantes ao processo de comunicação local e distante.

A seguir, são apresentados alguns dos dispositivos de *hardware* utilizados em ambientes de LANs.

4.1.2.1 Placa de rede

Placa de rede, ou NIC (*Network Interface Card*) atua como a interface física entre os dispositivos de *hardware* e o cabeamento da rede, preparada para receber, enviar e controlar os dados transferidos na rede de um dispositivo para outro (Figura 45). Já está presente ou é instalada no *slot* de expansão de cada dispositivo, ETD, com as seguintes funções [70]:

- Preparar dados do dispositivo para o cabo de rede;
- Enviar os dados para outro dispositivo, diretamente, ou através de um concentrador, como, por exemplo, um *hub* ou *switch*;
- Controlar o fluxo de dados entre o dispositivo e o sistema de cabeamento;
- Receber os dados vindos do cabo e traduzi-los em *bytes*, para que sejam entendidos pelo dispositivo.

Figura 45 – Placa de rede efetuando a conversão de dados

Os dados são transportados de forma paralela por meio de barramentos. Quando, por exemplo, um barramento é especificado com 32 *bits*, significa que 32 *bits* podem ser enviados juntos de uma só vez, porém, os dados em um cabo de rede não viajam na forma paralela e sim na forma serial. A conversão é responsabilidade da placa de rede, seja de sinais digitais em sinais elétricos ou ópticos, e vice-versa [70].

Cada placa de rede existente em um dispositivo conectado à rede possui um endereço MAC (*Medium Access Control*), único, que é gravado em uma memória PROM (*Programmable Read-Only Memory*). Teoricamente não há como ser alterado. Esse endereço utiliza seis *bytes*, em que os três primeiros identificam o fabricante da placa e os três últimos são números controlados pelo fabricante, como, por exemplo, 00-80-C7-E0-8E-B5:

- 00-80-C7 identifica o fabricante;
- E0-8E-B5 identifica o número de série do fabricante.

4.1.2.2 Repetidores

Os repetidores, geralmente, são utilizados em redes que compartilham o meio de comunicação e possuem a mesma arquitetura. Têm a função de recuperar o sinal atenuado e retransmiti-lo.

O repetidor atua apenas no nível físico: amplifica, regenera e retemporiza o sinal que é transmitido na rede, sendo, portanto, apenas um amplificador de sinais elétricos ou luminosos, que não efetua nenhum tratamento nem controle nos dados transmitidos [52], conforme exemplo ilustrado na Figura 46.

Figura 46 – Exemplo de uso de repetidores

Com o uso do repetidor é possível interligar vários segmentos em uma única rede, e ampliar o comprimento máximo permissível. Na ligação entre dois repetidores, pode ou não haver dispositivos instalados.

4.1.2.3 Bridges

As *bridges*, basicamente, são compostas por duas portas que conectam duas redes locais. O tráfego gerado por um segmento fica confinado, evitando assim que haja interferência no tráfego de outro segmento. A Figura 47 apresenta um esquema de ligação de LANs através de uma *bridge*.

Só existirá tráfego entre as LANs quando a mensagem tiver sido transmitida por um dispositivo em um dos segmentos para um dispositivo de destino em outro segmento.

Como exemplo, pode-se imaginar que uma das estações de trabalho da LAN B necessite imprimir um relatório de estatísticas do SEP na impressora que se encontra na própria LAN B. Caso não houvesse a *bridge*, a mensagem de impressão estaria circulando pelas redes, aumentando o tráfego de dados na LAN A sem necessidade, pois a mensagem não é para nenhum dos dispositivos dessa rede. Nesse caso, a *bridge* não permite que isso aconteça e a mensagem de impressão trafega somente na LAN B. Porém, se a mesma estação de trabalho da LAN B necessitasse acessar um IED da LAN A para executar sua configuração, a *bridge* permitiria que as informações tramitassem para a outra rede.

Figura 47 – Esquema de aplicação de uma *bridge*

4.1.2.4 Hubs

Os *hubs* são dispositivos utilizados para concentrar e distribuir o tráfego de informações e, por consequência, os cabos dos equipamentos terminais ligados numa topologia física estrela. Ao receber o sinal de uma porta, repete-o para todas as outras, ou seja, a topologia lógica⁸ simula um barramento físico compartilhado (Figura 48).

Figura 48 – *Hub*, topologia física e lógica

Demais funções podem ser descritas, como o isolar de falhas que venham a ocorrer em dispositivos ou cabos da rede local e a detecção de qual segmento da rede apresentou um determinado problema. A partir disso, isola-se esse segmento, mantendo os outros em comunicação.

Os *hubs* podem ser [71]:

- Passivos: não existe regeneração do sinal, ele simplesmente recebe e envia os sinais;
- Ativos: existe regeneração, permitindo distâncias maiores;
- Gerenciáveis: além de regenerar o sinal, faz gerenciamento e seleção de conexões;

⁸ Topologia lógica se refere à forma como os dados e informações, trafegam pelos dispositivos.

- Empilháveis: denominados *stackable* (cascateável), permite a ampliação do número de portas.

4.1.2.5 Switches

São dispositivos que apresentam um funcionamento semelhante ao encontrado nas *bridges*, mas com a vantagem de que mais segmentos podem ser conectados [68].

O *switch* faz uma comutação virtual entre os dispositivos de origem e destino, processo que isola as demais portas (Figura 49). Essa característica permite que a comunicação ocorra em modo *full-duplex*.

Figura 49 – Switch, topologia física e lógica

Pode-se imaginar que uma estação de trabalho da LAN B deseje imprimir um relatório de estatísticas do SEP na impressora que se encontra na LAN D. O *switch*, nesse caso, conecta a LAN B à LAN D para que a mensagem possa trafegar normalmente. Enquanto isso, uma estação de trabalho da LAN C deseja acessar as parametrizações que estão armazenadas no relé digital conectado à LAN A. Nesse caso, o *switch* conectará as duas LANs para que ocorra o tráfego. A filosofia é centralizar a conexão de várias LANs, mas com conexão duas-a-duas. Observa-se que, se no momento em que essas conexões estiverem ativas, uma estação de trabalho da LAN A desejar imprimir um relatório na impressora da LAN D, isso não será possível até que as conexões entre as LANs A e C e entre as LANs B e D sejam desfeitas, ao término do tráfego das mensagens.

4.1.3 Topologias Lógicas das LANs

As regras para a transmissão dos dados em uma rede definem a sua topologia lógica. Dentre as mais importantes destaca-se a *Ethernet* e suas diversas padronizações: família *Ethernet*.

4.1.3.1 *Ethernet*

A rede local *Ethernet* (*The Ethernet Local Area Network*), desenvolvida pelos engenheiros Bob Metcalfe e David Boggs, 1972, com protocolo de patente em 1975, é normalizada com o padrão IEEE 802.3 CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection*), que define a sinalização elétrica e a forma de acesso de dispositivos ao meio ou barramento da rede local. A Figura 50 é similar ao desenho que Metcalf usou em uma apresentação ao explicar o conceito da rede *Ethernet* [26] [49].

Figura 50 – Metcalf e o conceito da rede *Ethernet*
Fonte: [26]

Similar ao éter luminoso usado pelos antigos pesquisadores para explicar como a luz e outras ondas magnéticas viajam através do vácuo, a rede atua como o éter permitindo a transmissão de mensagens entre dispositivos, como computadores.

Segundo Woodward [26], as redes *Ethernet* não foram desenvolvidas especificamente para operação em subestações e outros ambientes desfavoráveis. Porém a *Ethernet* é tão popular em outras aplicações que é mais simples empregar e reforçar sua utilização do que criar algo novo.

Numa rede local *Ethernet*, todos os dispositivos compartilham um único segmento de rede, que é conhecido como domínio de colisão. Expressa a certeza de que, em um determinado momento, mais de um dispositivo tentará transmitir dados sob o meio de transmissão, a mídia, momento quando ocorre uma colisão. Marçula [55] salienta que a

topologia lógica *Ethernet* pode ser utilizada com diversos tipos de topologia física, pois o que ela indica é como os dados devem ser trocados entre os dispositivos e não qual deve ser a topologia física da rede.

Nessa regra de comunicação, CSMA/CD, o dispositivo que deseja transmitir escuta o meio de transmissão, ao perceber uma colisão, aborta a transmissão. Detectada a colisão, o dispositivo espera por um intervalo de tempo aleatório, mas diferente para cada dispositivo (da ordem de milissegundos) e tenta retransmitir. Essa diferença de tempos é uma tentativa de diminuir a possibilidade de nova colisão. Ocorrendo colisões com dados de outros dispositivos, o processo de espera é novamente iniciado e, assim, sucessivamente, enquanto houver necessidade de enviar dados pelo meio de comunicação.

4.1.3.2 Família *Ethernet*

A conexão de um dispositivo ao meio de transmissão pode ocorrer de diversas formas, de acordo com características como, por exemplo, velocidade, mídia de comunicação e topologia física. Essas formas são conhecidas como Família *Ethernet*, composta pelos seguintes padrões, conforme exposição minuciosa descrita por Marçula [55]:

- **10Base2:** é uma rede que utiliza como meio de transmissão o cabo coaxial fino (*thinnet*) com conectores do tipo BNC (Figura 51), tem velocidade de transmissão de 10 Mbps, permite um número máximo de cinco segmentos⁹ com 30 dispositivos conectados e pode ter um comprimento máximo por segmento de 185 m. Utiliza topologia física em barramento.

Figura 51 – Cabeamento de rede coaxial e conectores BNC

- **10Base5:** rede conhecida como *Thicknet* ou AUI (*Attachment User Interface*), pois utiliza cabos coaxiais grossos (*thicknet*) com transceptores popularmente denominados

⁹ Comprimento máximo dos cabos entre os dispositivos sem necessidade de repetir o sinal.

*vampiro*¹⁰, acoplados diretamente ao cabo (Figura 52). Também transmite a 10 Mbps, permite um número máximo de cinco segmentos com até 100 dispositivos conectados, permitindo um comprimento máximo de 500 m por segmento. Utiliza topologia física em barramento.

Figura 52 – Conexões de uma rede *Thicknet* ou AUI

- **10BaseT**: rede que possui velocidade de 10 Mbps e utiliza pares de cabos trançados com conectores do tipo RJ-45 (Figura 53). Além disso, utiliza um *hub* para centralizar a conexão de cabos, topologia física em estrela. O comprimento máximo dos cabos entre o dispositivo e o *hub* é de 100 m.

Figura 53 – Montagem de cabo par trançado, UTP (*Unshielded Twisted Pair*)

¹⁰ Os transceptores “vampiros” permitem a conexão a um barramento de rede (cabo) sem a necessidade de um conector nesse barramento. É conhecido como “vampiro” porque perfura a isolamento do cabo e realiza a conexão com o cabo [55].

Sendo:

1. Cabo par trançado, UTP;	4. Alicates para conexão;
2. Conector RJ-45;	5. Crimpagem do cabo;
3. Introduzindo o conector no cabo;	6. Cabo par trançado com capa de borracha.

As redes *Ethernet* de fibra óptica, também com velocidades de 10 Mbps, apresentam os seguintes padrões [55]:

- **FOIRL** (*Fiber Optic Inter-Repeater Link*): permite segmentos com até 1 km de comprimento.
- **10BaseFL** (*Fiber Link*): substituiu o FOIRL, permitindo segmentos com até 2 km de comprimento.
- **10BaseFB** (*Fiber Backbone*): tecnologia semelhante à FL, mas utilizada para infraestruturas centrais de comunicação em alta velocidade. Pouco utilizada comercialmente.
- **10BaseFP** (*Fiber Passive*): também permite segmentos de até 2 km de comprimento, mas utiliza topologia lógica em estrela com um concentrador para fibras.

Outro padrão existente é o *Fast Ethernet* (IEEE 802.3u), que apresenta velocidades de 100 Mbps. É um padrão adotado por diversos dispositivos numa subestação. Os tipos existentes são [55]:

- **100BaseTX**: utiliza dois pares de cabo par trançado UTP categoria (Cat.) 5¹¹ ou STP (*Shielded Twisted Pair*), blindado, sendo um par utilizado para detecção de colisão e outro para transmissão e recepção de dados. A rede pode ter um comprimento máximo de 250 m, e do dispositivo ao concentrador de dados, por exemplo, ao *switch*, o comprimento pode ser no máximo 100 m.
- **100BaseT2**: utiliza dois pares de cabo UTP categoria 3.
- **100BaseT4**: utiliza quatro pares de cabos UTP categorias 3, 4 ou 5 ou STP, sendo que três pares são utilizados para transmissão e um para detecção de colisão. A rede pode ter um comprimento máximo de 250 m, e do computador ao concentrador de dados, por exemplo, ao *switch*, o comprimento pode ser no máximo 100 m.

¹¹ Com base na norma americana EIA/TIA 568-A, o cabo de par trançado obedece ao seguinte padrão de desempenho: categoria 3: 16 MHz; categoria 4: 20 MHz; categoria 5: 100 MHz; categoria 5e: 100 MHz (com melhora na resposta do cabo para as frequências maiores). Aguardando finalização da regulamentação junto às entidades mundiais, têm-se: categoria 6: 250 MHz e categoria 7: 600 MHz [69]

- **100BaseFX**: utiliza um par de fibras ópticas, sendo uma para a transmissão e outra para recepção. A rede pode ter um comprimento máximo entre 50 e 100 km, e cada segmento pode ter comprimento máximo de 412 m.

Ainda segundo Marçula [55], em 1996 foi apresentado um novo padrão para a família *Ethernet*, o Gigabit *Ethernet*. Essa tecnologia é dividida em dois padrões: o 802.3z (cabos de fibra óptica) e 802.3ab (cabos de pares trançados). Apresenta velocidades de 1 Gbps, na mesma estrutura encontrada para as redes *Ethernet* de 10 Mbps ou 100 Mbps. A Gigabit *Ethernet* apresenta os seguintes tipos:

- **1000BaseT**: utiliza cabos UTP categoria 4 e 5.
- **1000BaseCX**: utiliza cabos STP.
- **1000BaseLX**: utiliza fibras ópticas de 1300 nm (multimodo ou monomodo) a laser.
- **1000BaseSX**: utiliza fibras ópticas de 850 nm (multimodo) a laser.

A Família *Ethernet*, composta pelos padrões supracitados também é referenciada por [52] [59] [62] [68]. Quando se faz necessário adicionar novas funcionalidades ou novos meios de transmissão, o IEEE publica suplementos que contêm as cláusulas de alterações do padrão original (IEEE 802.3). A Tabela 7 lista alguns dos principais suplementos.

Tabela 7 – Suplemento com as cláusulas de alteração na família *Ethernet*

Suplemento	Ano	Descrição
802.3a	1985	10Base2, Ethernet Cabo Coaxial Fino
802.3d	1987	FOIRL (<i>Fiber Optic Inter-Repeater Link</i>)
802.3i	1990	10BaseT, Par Trançado
802.3j	1993	10BaseF, Fibra Óptica
802.3u	1995	100BaseT, <i>Fast Ethernet</i>
802.3x	1997	Padrão <i>Full-Duplex</i>
802.3z	1998	1000BaseX, Gigabit <i>Ethernet</i>
802.3ab	1999	1000BaseT, Gibabit <i>Ethernet</i>
802.3ae	2002	10 Gigabit <i>Ethernet</i>
802.3ak	2004	10 Gigabit <i>Ethernet</i> , sobre cabo coaxial fino
802.3an	2006	10 Gigabit <i>Ethernet</i> , sobre par trançado não blindado (UTP)
802.3aq	2006	10GBASE-LRM, 10 Gigabit <i>Ethernet</i> sobre fibra óptica multimodo
802.3ba	2009	Grupo de estudo para redes de alta velocidade (40 e 100 Gigabit <i>Ethernet</i>).

Fonte: [72] [73]

4.2 Redes WAN

A WAN é uma rede que abrange uma ampla área geográfica, utilizada como forma de alastrar os recursos proporcionados por uma rede local além dos limites físicos de uma sala ou edifício, como ilustrou a Figura 41, referente ao sistema de controle e proteção do SEP. Entende-se uma WAN como a reunião de redes locais, LANs, associadas via canais de comunicação de dados em alta velocidade, permitindo, por exemplo, que no ambiente do sistema elétrico, o centro de controle execute a gerência de informações, operação do sistema, monitoração do sistema de potência, manutenção e treinamento de pessoal.

Essas redes interligadas podem estar em diferentes cidades e países, fisicamente distantes e utilizar canais de comunicação de dados, conforme descreve a Tabela 8.

Tabela 8 – Canais de comunicação para Redes WAN

Conexões em Redes WAN	Descrição
Circuitos diretos dedicados	Denominados de Linha Privativa de Comunicação de Dados (LPCD) ou <i>Leased Line</i> . São circuitos ponto a ponto, que conectam fixamente dois pontos de uma rede, com velocidades de 64 kbps a 34 Mbps ou mais, como, por exemplo, enlaces de microondas, satélite, fibras ópticas e pares metálicos.
Conexões comutadas por telefone	Utilizam a rede telefônica ou a rede ISDN (<i>Integrated Services Digital Network</i>). São conexões discadas, seriais e assíncronas, normalmente utilizadas em conexões temporárias para <i>backup</i> no caso de falhas do circuito principal.
Conexões por redes de pacotes	Utilizam redes compartilhadas através dos protocolos X.25, <i>Frame Relay</i> e ATM, também chamadas de <i>Packet-Switched</i> . Redes comutadas por pacotes criam circuitos virtuais entre origem e o destino para transmitir os dados.

Fonte: [65]

O canal de comunicação de dados numa rede WAN é basicamente composto por um meio de transmissão com ECDs nas duas pontas, que interligam ETDs através de interfaces digitais, como, por exemplo, V.35, V.36 ou G.703, descritas no Capítulo III.

Face às necessidades de confiabilidade dos sistemas e as várias considerações em relação ao custo, a interligação entre os diversos módulos processadores, em tal rede determinará a utilização de um arranjo topológico específico, tal como a topologia em malha (Figura 54).

Figura 54 – Topologia em malha, conexão do MP com todos os demais na rede

Onde:

- ECD – <número do MP>.<Número do ECD>

Como exemplo, o ECD-1.2, significa que o ECD-2 está conectado ao MP-1.

Nos seus primórdios, as velocidades de transmissão empregadas eram baixas, na ordem de 9600 bps, alcançando nos dias atuais dezenas de Megabits/seg [52] [59].

4.2.1 Dispositivos de *Hardware* das WANs

Existem dispositivos de *hardware* que exercem funções importantes nas redes WAN. Tais dispositivos serão apresentados a seguir.

4.2.1.1 Roteadores

São equipamentos que fazem a conexão de redes distintas entre si ou redes que operam com regras de comunicação diferentes.

Os roteadores estabelecem as melhores interconexões, sendo responsáveis pelo encaminhamento das mensagens através da rede de acordo com os endereços de origem e destino fornecidos, o mais rápido possível. Procuram utilizar os caminhos mais curtos e, quando não é possível, utilizam os caminhos que apresentam melhor disponibilidade (Figura 55).

Figura 55 – Tráfego de dados entre Roteadores

Para determinar o melhor caminho o roteador faz a leitura de uma lista (tabela de roteamento) que pode ser dinâmica, quando gerada automaticamente no momento em que o roteador é ligado, por meio do recebimento do estado de todos os outros equipamentos da rede, ou estática, quando definida pelo administrador da rede [74]. Alguns métodos conhecidos de roteamento são detalhados pelas seguintes referências: [65] [68] [75].

4.2.1.2 Gateways

Basicamente, os *gateways* podem ser entendidos como conversores de protocolo, que interligam redes que utilizam regras de comunicação diferentes (Figura 56).

Figura 56 – Gateway como conversor de protocolos no SEP

Compatibiliza a comunicação, como, por exemplo, diferenças entre tamanhos de pacotes de dados ou formas de endereçamento. O termo *gateway* “pode indicar *hardware*, mas também pode designar um *software* que faz a função de conversão entre redes com protocolos diferentes” [55].

4.3 Protocolos

Os protocolos são definidos como conjuntos de regras que coordenam e asseguram a condução das informações úteis entre dois ou mais dispositivos. Estabelecem os formatos, as regras e os métodos, negociam e concordam sobre o uso de parâmetros, tratando de questões básicas, tais como [76]:

- Quais são os sinais que podem ser enviados?
- Como fazer o endereçamento de uma mensagem?
- Quando pode ocorrer o envio de uma mensagem?
- Quais são as mensagens que podem ser enviadas?
- Qual é o significado de uma mensagem?
- Como estabelecer uma conexão?

De acordo com Kurose e Ross [77], os sistemas de comunicação em geral fazem uso intenso de protocolos. Diferentes tipos são utilizados para realizar diferentes tarefas de comunicação, definindo a ordem das mensagens trocadas entre duas ou mais entidades comunicantes, bem como as ações realizadas na transmissão e no recebimento de uma mensagem ou outro evento.

Tanenbaum (*apud* [55]) lembra ainda, que o protocolo é um acordo entre as partes que querem se comunicar. As funções de um protocolo são descritas como: a fragmentação e remontagem das mensagens; o controle da conexão; a entrega de pacotes de dados de forma ordenada; o controle de fluxo dos dados; o controle de erro; além do endereçamento das mensagens.

4.3.1 Modelo ISO/OSI

O panorama que o segmento de redes de computadores apresentava no final da década de 70 caracterizava-se da seguinte forma [78]:

“(...) de um lado, por enormes perspectivas de crescimento, mas, de outro, por uma situação de crise criada pela heterogeneidade dos padrões, protocolos e equipamentos de comunicação de dados existentes no mercado.

Cada interessado havia definido, unilateralmente, sua arquitetura. Os fabricantes, as arquiteturas proprietárias; as operadoras de telecomunicações, as arquiteturas das redes públicas; e algumas entidades, como era o caso da ARPA (*Advanced Research Project Agency*), que tinha como base o conhecimento e o potencial de pesquisa das universidades e dos centros de pesquisa norte-americanos, possuíam arquiteturas específicas para atender às suas redes. A solução foi encontrada pela ISO (*International Organization for Standardization*), sob a forma de propostas de elaboração de um modelo que viesse a sintetizar, de modo abstrato, o funcionamento de computadores e demais dispositivos, integrados por redes de comunicação de dados. Baseada nas experiências advindas do funcionamento dos sistemas de teleprocessamento, da rede ARPA e das redes públicas e proprietárias, a ISO, entre 1978 e 1984, elaborou o RM-OSI ou Modelo de Referência para Interconexão de Sistemas Abertos (*Reference Model – Open Systems Interconnection*)”.

O modelo RM-OSI foi criado seguindo a filosofia das arquiteturas multicamadas¹². Sua arquitetura delibera 7 camadas, cujos princípios de definição foram os seguintes [78]:

- Cada camada corresponde a um nível de abstração necessária ao modelo;
- Cada camada possui suas funções próprias e bem definidas;
- As funções de cada camada foram escolhidas segundo a definição dos protocolos normalizados internacionalmente;
- A escolha das fronteiras entre cada camada deveria ser definida de modo a minimizar o fluxo de informação nas interfaces;
- O número de camadas deve ser suficientemente grande para que funções distintas não precisem ser colocadas na mesma camada, e ser suficientemente pequeno para que a arquitetura não se torne difícil de controlar.

Nesse modelo cada camada possui um conjunto de padrões, especificações e protocolos que vão atuar no processo de comunicação.

Se diferentes sistemas e plataformas tecnológicas existentes no mercado seguem esse modelo e seus padrões de comunicação, podem se comunicar entre si e avalia-se que esses sistemas possuem interoperabilidade [65].

O modelo RM-OSI não é um protocolo. Serve como um padrão para quem necessita criar um protocolo, ou seja, ele indica funções e relacionamentos, mas não indica como isso será realizado. Competência do desenvolvedor do protocolo, que, na verdade, pode nem utilizar todas as funcionalidades propostas pelo modelo [55].

A descrição das camadas do modelo RM-OSI está exposta na Tabela 9.

¹² Quando a comunicação exige um grande número de protocolos, eles são agrupados em funcionalidades, formando uma camada. Por sua vez, o conjunto de camadas (multicamadas) forma uma pilha de protocolos [77].

Tabela 9 – Camadas definidas com descrição de funções básicas, RM-OSI

Camada	Descrição
7 – Aplicação	Responsável por permitir que as aplicações do computador ou dispositivos possam acessar a rede. Nessa camada, estão os protocolos ligados às aplicações utilizadas pelo usuário, tais como: sistemas operacionais, correio eletrônico, Telnet, FTP e HTTP.
6 – Apresentação	Trata como os diferentes sistemas representam os dados, através de uma formatação e seleção da sintaxe adequada. Faz a conversão de diferentes formatos, como ASCII, EBCDIC, para que possam ser apresentados pelas aplicações, comprimi/descomprimi textos, emula terminais virtuais e criptografa/descriptografa dados.
5 – Sessão	Permite autenticação do usuário (<i>logon entre dois processos</i>), controle, inicialização e finalização de transações entre aplicações.
4 – Transporte	É responsável por garantir a transferência de dados, entre origem e destino. Independente de qual rede física é utilizada.
3 – Rede	Cuida do endereçamento lógico e estabelecimentos de rotas para o fluxo de mensagens.
2 – Enlace	Faz a detecção e a correção de erros. Cuida do endereçamento físico e das regras de intercâmbio de dados, executado por intermédio de um canal de comunicação.
1 – Físico	Especifica por exemplo, as conexões elétricas, cabos, pinagem, nível de voltagem ou pulsos de luz, e o sentido do fluxo de dados, sendo que a unidade de transmissão é o <i>bit</i> representado pelos sinais elétricos.

Fontes: [52] [55] [62] [65]

A seguir, conforme exemplo proposto em Souza [52], percebem-se as sete camadas e como elas interagem (Figura 57).

Figura 57 – Camadas de rede – RM-OSI, alocação de dispositivos ativos

O exemplo ilustra a comunicação entre dois dispositivos, nos quais o dado de informação passa por todas as camadas até chegar a seu destino. Observa-se, basicamente, que no nível

físico temos o ECD (*modem/codec*); no nível 2, o *switch* ; no nível 3, o roteador. Do nível 4 ao 7, as funções dessas camadas são executadas por *softwares* dentro dos dispositivos.

Cabe ressaltar que os componentes passivos, tais como, *hubs*, conectores e cabos, estão vinculados ao nível físico, camada 1.

4.4 Arquitetura *Internet*, TCP/IP

Martins [78] explicita que a arquitetura *Internet* é largamente utilizada para interconexão e interoperação de sistemas computacionais heterogêneos.

Tal arquitetura foi lançada pelo departamento de defesa do governo norte-americano, 1974, e escolhida para ser o padrão de comunicação entre os diversos sistemas daquela organização. Seus padrões não são definidos por entidades de padronização internacional como a ISO, por exemplo. As definições dos protocolos são encontradas em documentos denominados RFC (*Request for Comments*), os quais são elaborados pelo IAB (*Internet Activities Board*) [78].

A arquitetura *Internet* também é organizada em camadas. Ela é composta por dois protocolos principais: o TCP (*Transmission Control Protocol*) e o IP (*Internet Protocol*). O TCP tem por função o transporte confiável de mensagens entre dois dispositivos, ou sistemas. O IP é responsável pelo encaminhamento de pacotes de dados através das diversas sub-redes, desde a origem até o seu destino.

Neste interim, a arquitetura TCP e IP é um conjunto de padrões e protocolos de comunicação de dados, utilizado na interconexão e endereçamento de computadores, dispositivos e redes, sendo denominado protocolo TCP/IP.

No ambiente de automação do SEP o protocolo TCP/IP permite tornar os dados, provenientes das subestações, disponíveis em LANs, WANs, *Intranets* ou na *Internet*. Os IEDs atuais, como os relés digitais ou numéricos, fornecem uma implementação do protocolo TCP/IP, ou seja, são capazes de se comunicar com outros equipamentos e redes que também utilizem o padrão.

4.4.1 Camadas da Arquitetura TCP/IP

A arquitetura TCP/IP divide seus processos em um modelo de quatro camadas, conforme [62] [79] [80] [81]:

- Camada de Aplicação: define os protocolos que interagem diretamente com o usuário, oferecendo os serviços para as aplicações utilizadas, tais como os exemplificados na Tabela 10.

Tabela 10 – Alguns protocolos da camada de aplicação, TCP/IP

Protocolo	Descrição
Telnet	<i>Terminal Emulation</i> : fornece emulação de terminais para acesso a sistemas de outros dispositivos.
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> : faz a transferência de arquivos entre dispositivos.
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i> : coleta e analisa ocorrências na rede.
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i> : protocolo de aplicação de correio eletrônico.
HTTP	<i>Hyper Text Transfer Protocol</i> : executa a comunicação entre <i>browser</i> e servidor <i>web</i> .

- Camada de Transporte: coordena o envio de mensagens de um dispositivo para outro, podendo ou não implementar algum mecanismo de controle para garantir a entrega das mensagens, conforme protocolos descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Alguns protocolos da camada de transporte, TCP/IP

Protocolo	Descrição
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> : é um protocolo orientado à conexão ¹³ e com garantia de entrega do pacote de dados.
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> : protocolo que não requer uma conexão entre os programas. Sem garantia de entrega do pacote de dados.

- Camada de Inter-Rede ou *Internet*: define o mecanismo utilizado para que um dispositivo de origem localize o dispositivo de destino, definindo a rota que as mensagens deverão percorrer, como, por exemplo, os protocolos da Tabela 12.

Tabela 12 – Alguns protocolos da camada de inter-Rede ou *internet*, TCP/IP

Protocolo	Descrição
IP	<i>Internet Protocol</i> : define os mecanismos de endereçamento e roteamento de pacotes na rede.
ARP	<i>Address Resolution Protocol</i> : fornece o endereço de <i>hardware</i> para dispositivos localizados na mesma rede física.
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i> : fornece informações sobre as condições de transmissão de datagramas na rede ou sobre erros.
RIP	<i>Routing Information Protocol</i> : protocolo que transmite periodicamente tabelas com as rotas existentes na rede para todos os dispositivos.
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i> : protocolo de roteamento semelhante ao RIP, mas que gera menor quantidade de <i>bits</i> extra de sinalização, portanto, diminui o tráfego em redes WAN.

- Camada de Interface de Rede: define os padrões de transmissão de informações através do meio físico. Está relacionada ao *hardware* e a maioria dos protocolos

¹³ Orientado à conexão, ou seja, antes do intercâmbio de dados entre os dispositivos se iniciar, estes são obrigados a estabelecer uma conexão, que só se encerra no final da transmissão de dados.

dessa camada é implementada pelos *drivers* da placa de rede. Estes protocolos se relacionam com o tipo de rede, como descrito na Tabela 13.

Tabela 13 – Alguns protocolos da camada de interface de Rede, TCP/IP

Tipo de Rede	Protocolo
Redes LAN	<i>Ethernet, Fast Ethernet, Token Ring e FDDI.</i>
Redes WAN	<i>ATM, FDDI, Frame Relay e X.25.</i>
Acesso Discado	<i>PPP e SLIP.</i>

O protocolo TCP/IP não utiliza as sete camadas do modelo RM-OSI, porém mantém suas características nas quatro camadas, conforme ilustra a Figura 58.

O exemplo esboça a comunicação entre dois dispositivos nos quais o dado de informação passa por todas as camadas até chegar a seu destino. Observa-se, basicamente, que no nível físico do RM-OSI ou Rede do TCP/IP, temos o ECD (*modem/codec*); no nível 2 do RM/OSI, o *switch* ; no nível 3, o roteador. Enquanto no nível 2 do TCP/IP temos os dois dispositivos, *switch* e roteador. Do nível 4 ao 7 do RM-OSI ou nível 4 do TCP/IP, as funções dessas camadas são executadas por *softwares* dentro dos dispositivos.

Figura 58 – Comparação das camadas do modelo RM-OSI e TCP/IP
Fonte: [62]

4.4.2 Endereçamento IP

O protocolo IP é responsável pelo endereçamento lógico dos dispositivos ativos da rede de arquitetura TCP/IP, conforme exemplo descrito na Figura 59.

Figura 59 – Exemplo de aplicação do endereçamento IP

O datagrama (pacote) IP que trafega na rede de comunicação possui o endereço IP de origem e o endereço IP de destino, além dos campos de controle do protocolo IP.

A versão do protocolo IP utilizada atualmente para endereçamento é a IPv4¹⁴, composta por 4 *bytes*, totalizando 32 *bits*, que na representação decimal fica com quatro números separados por pontos. Cada *byte* pode assumir valores de 0 a 255, conforme exemplo:

- Endereço IPv4, representação binária: 11000000.10101000.00000000.00100001
- Endereço IPv4, representação decimal: 192.168.0.33

O endereçamento IP é estruturado em classes, sendo que uma parte do endereço IP identifica o número da rede (endereço da rede), ou seja, o conjunto de módulos processadores capazes de trocar informações e compartilhar recursos e a outra é utilizada para identificar os próprios módulos ou dispositivos ativos na rede (endereço de *host* ou dispositivo). O que varia de uma classe para outra é o número de *bytes* utilizados para representar os endereços de rede e os endereços de dispositivos.

Cinco classes de endereçamento IP são descritas (IPv4):

- Classe A: o primeiro *byte* representa o número da rede e os outros três *bytes*, o número do dispositivo. Esta classe permite representar 128 redes e 16.777.214 dispositivos.
- Classe B: os dois primeiros *bytes* representam o número da rede e os outros dois *bytes*, o número do dispositivo. Permite representar 16.384 redes e 65.534 dispositivos para cada uma das redes.

¹⁴ A partir do início dos anos 1990 a pilha TCP/IP encontrou sérios problemas que não poderiam ser resolvidos sem a modificação do formato do pacote IP e da lógica de processamento dos campos do cabeçalho IP. Em face disso a comunidade da *Internet* decidiu desenvolver uma nova versão do IP, o IPv6. Um endereço IPv6 compreende 128 *bits* ou 16 *bytes*, cuja representação se dá no formato hexadecimal [75] e [80]. Segundo Olifer [75] a transição do IPv4 para o IPv6 apenas começou.

- Classe C: os três primeiros *bytes* representam o número da rede e o último *byte*, o número do dispositivo. Permite representar 2.097.152 redes e 254 dispositivos para cada uma das redes.
- Classe D: é utilizada para o envio de dados a grupo específico de dispositivos, o que é denominado *multicast*. Não é utilizada para dispositivos de uma rede.
- Classe E: é reservada para pesquisa e desenvolvimento de novas aplicações.

A representação de um endereço IP, conforme sua classe está delineada na Figura 60.

Figura 60 – Exemplo de representação IP do endereço de rede e endereço de dispositivo, Classe C

Neste caso, Classe C, a rede é definida pelos três primeiros *bytes* (da esquerda para direita) e o dispositivo pelo último *byte* (ou, primeiro *byte* da direita). Isso indica que todos os dispositivos da mesma rede têm o mesmo endereço de rede, ou seja, todos eles terão início com 192.168.0.

Para se obter a designação da rede, completam-se os *bytes* faltantes relativos ao endereço de dispositivo, com zeros, neste caso, 192.168.0.0 é o endereço da rede (valor reservado, que não pode ser utilizado como endereço de dispositivo).

O último endereço da rede, neste íterim, 192.168.0.255, é reservado para envio de mensagem *broadcast*¹⁵.

4.4.2.1 Endereços privados

Para evitar conflitos entre endereços IP utilizados em redes locais e endereços IP da *Internet*, separou-se uma gama que poderia ser utilizada exclusivamente em redes locais internas, e repetidas em redes distintas.

¹⁵ Mensagens *broadcast* são recebidas por todos os dispositivos da rede simultaneamente.

Os roteadores, quando identificam um pacote no qual consta um desses endereços privados, bloqueiam a sua passagem para a *Internet*. A seguir, temos as faixas reservadas [65]:

- Classe A Privada – 10.0.0.0/8 até 10.255.255.255/8
- Classe B Privada – 172.16.0.0/12 até 172.31.255.255/12
- Classe C Privada – 192.168.0.0/16 até 192.168.255.255/16

Em que /8, /12, /16 indicam o número de *bits* utilizado para representar o número da rede no endereço IP.

Supondo a montagem de uma rede em subestação do SEP, pode-se utilizar qualquer um desses endereços para os dispositivos da rede, como, por exemplo, relés digitais da rede interna supracitada.

De acordo com Martins [78], o endereço 127.x.x.x também é um valor reservado e utilizado para diagnóstico de um dispositivo. O 127.0.0.1 é o endereço da interface de *loopback*¹⁶ do dispositivo local. Por exemplo, ao digitar o comando “ping” no *prompt* do sistema operacional Windows™, em um computador da subestação, testa-se o funcionamento do referido dispositivo, conforme ilustra a Figura 61. São enviados quatro pacotes de 32 *bytes* (valor *default*) que devem retornar com 0% de perda.

```

Microsoft Windows XP [versão 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\juliano>ping 127.0.0.1

Disparando contra 127.0.0.1 com 32 bytes de dados:

Resposta de 127.0.0.1: bytes=32 tempo<1ms TTL=128
Resposta de 127.0.0.1: bytes=32 tempo<1ms TTL=128
Resposta de 127.0.0.1: bytes=32 tempo<1ms TTL=128
Resposta de 127.0.0.1: bytes=32 tempo<1ms TTL=128

Estatísticas do Ping para 127.0.0.1:
    Pacotes: Enviados = 4, Recebidos = 4, Perdidos = 0 (0% de perda),
    Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
        Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Média = 0ms

C:\Documents and Settings\juliano>_
  
```

Figura 61 – Diagnostico com endereço 127.0.0.1

4.4.2.2 Máscara de sub-rede

Quando se configura o TCP/IP num dispositivo, deve ser configurado o endereço IP e a máscara de sub-rede.

¹⁶ “Normalmente o endereço 127.0.0.1 é definido para uma interface especial denominada interface local (*loopback interface*) ou *local host*, que atua como um circuito fechado. Qualquer pacote IP enviado para esta interface a partir dos protocolos TCP ou UDP será retornado ao próprio *host* (...)” [78].

De acordo com Palma e Prates [79], a máscara de sub-rede é uma seqüência de 4 *bytes*, como o endereço IP, onde os *bits* que se encontram em 1 indicam *bits* do endereço IP que se referem ao endereço de rede, e os *bits* que se encontram em 0 referem-se aos *bits* do endereço do dispositivo, conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Máscaras de sub-rede padrão

Classe	Máscara Decimal	Máscara Binária
A	255.0.0.0	11111111.00000000.00000000.00000000
B	255.255.0.0	11111111.11111111.00000000.00000000
C	255.255.255.0	11111111.11111111.11111111.00000000

Pode-se dividir uma rede em sub-redes menores através de máscaras de sub-rede diferentes do padrão definido pelas classes de endereços, separando, por exemplo, dois grupos de dispositivos que estavam anteriormente conectados de forma conjunta.

Ao considerar, por exemplo, que o endereço de rede classe C de uma empresa do setor elétrico seja 192.168.0.*x*, podemos determinar que neste caso, o valor de *x* pode variar de 1 a 254, ou seja, 1 a 254 dispositivos em uma única rede (segmento) da empresa. Todos utilizando a máscara 255.255.255.0 (/24), o que indica a utilização dos três primeiros *bytes* ou 24 primeiros *bits* para identificação da rede.

Para que possam ser endereçados dois segmentos de rede dentro da empresa, contextualiza-se (Figura 62):

- Usar o primeiro *bit* do *byte x* para endereçar as sub-redes (segmentos);
- Usar os demais *bits* de *x* para endereçar os dispositivos de cada segmento.

Isto pode ser feito pela inserção da máscara 255.255.255.128 ou /25, em que o último *byte* vale:

- 128 em binário = 10000000

O *bit* (da esquerda) com 1 indica que no endereço IP o último *byte* (*x*) representará em seu primeiro elemento o endereço da sub-rede. O restante dos *bits*, em 0 indicam as posições que representam os endereços de dispositivos.

Com a máscara 128 (10000000) pode-se representar 2 sub-redes, conforme o valor do *bit* à esquerda:

- 00000000 = sub-rede 0 (192.168.0.0/25), com 126 dispositivos por sub-rede;
- 10000000 = sub-rede 128 (192.168.0.128/25), com 126 dispositivos por sub-rede.

Figura 62 – Exemplo de uso da máscara de sub-rede

4.5 Intranet

A interconexão de redes por roteadores é denominada *internet*. Comer [81] considera que uma das principais desvantagens desta arquitetura é a falta de privacidade. O mesmo inconveniente aflige os conteúdos que viajam através da *Internet* pública, de abrangência mundial.

Uma arquitetura de dois níveis pode distinguir dados internos e externos, isto é, informações enviadas entre computadores ou dispositivos dentro de uma subestação e informações enviadas entre um computador na subestação e um computador externo ao ambiente. O objetivo é manter intactos os dados internos, privados e, ao mesmo tempo, permitir a comunicação externa, através, por exemplo, de um *firewall*¹⁷.

Uma das formas de busca da privacidade entre os computadores e dispositivos é construir uma *internet* privada completamente isolada, que normalmente é denominada de rede privada ou *Intranet* privada (Figura 63).

A *Intranet* é uma rede dentro de uma organização, que utiliza tecnologias da arquitetura *Internet*, como o protocolo TCP/IP, para permitir que os dispositivos utilizem e compartilhem recursos.

Dentre as vantagens de uma *Intranet*, tem-se:

- O uso da interface gráfica pelo usuário, o que facilita o acesso às aplicações;
- Utilização do mesmo navegador que é utilizado para *Internet*;

¹⁷ No contexto das facilidades de comunicação é importante analisar a função servidora que controla a segurança e os procedimentos operacionais válidos para a rede de comunicação. *Firewall* é um mecanismo que controla o acesso à interligação em redes, lidando com o problema de filtrar uma rede em particular de uma comunicação indesejada [76] e [81].

- Os sistemas operacionais mais conhecidos são compatíveis com a aplicação *Intranet*;
- Agilidade no compartilhamento de serviços e recursos, devido ao acesso local.

Figura 63 – Arquitetura de rede, um e dois níveis, interno e externo

Como desvantagens são citadas:

- Exige uma política rígida de segurança de rede dentro da empresa;
- Centralização dos dados.

Segundo Souza [52], na elaboração de um projeto de *Intranet*, é importante:

- Projeto com cronograma, alocação de tarefas e orçamentos;
- Piloto e testes antes da instalação;
- Elaborar documentação de todos os processos a serem colocados na *Intranet*;
- Fornecer treinamento aos usuários;
- Montar equipe de suporte;
- Avaliar que processos a *Intranet* vai automatizar e agilizar.

Quando o conceito deixa de ser local, possibilita a comunicação com outras *Intranets*, tem-se então o termo *Extranet* (*Extendend Intranet*), no qual fornecedores e parceiros comerciais se comunicam entre si.

Conforme temas abordados neste capítulo, a escolha de um tipo particular de rede para suporte a um dado conjunto de aplicações no SEP é uma tarefa que apresenta dificuldades. Cada arquitetura possui certas características que afetam sua adequação a uma aplicação em particular. Muitos atributos devem ser considerados, conforme descreve Soares *et al* [59]:

- Custo: o custo de uma rede é dividido entre o custo dos módulos processadores, o custo das interfaces com o meio de comunicação e do próprio meio de comunicação;
- Retardo de transferência: inclui todo o tempo de entrega de uma mensagem, desde o momento em que se deseja transmiti-la, até o momento em que ela chega para ser recebida pelo destinatário;
- Desempenho: a capacidade efetiva de transmissão. A topologia, o meio de interconexão, o protocolo de comunicação, bem como a velocidade de transmissão influenciam em muito na adequação de uma rede a uma aplicação em particular. A seleção dos mecanismos de interconexão orientada para a natureza da aplicação é essencial para o bom desempenho de uma rede;
- Confiabilidade: pode ser avaliada em termos de tempo médio entre falhas (*Medium Time Between Failures* – MTBF), tolerância a falhas, degradação amena (*gracefull degradation*), tempo de reconfiguração após falhas e tempo médio de reparo (MTTR – *Medium Time to Repair*);
- Modularidade: pode ser caracterizada como o grau de alteração de desempenho e funcionalidade que um sistema (rede) pode sofrer sem mudar o projeto original;
- Compatibilidade: a capacidade que um sistema (rede) possui para se ligar a dispositivos de vários fabricantes, quer no nível de *hardware* ou *software*;
- Sensibilidade Tecnológica: em sua essência, é a capacidade de suportar todas as aplicações para a qual foi dedicada, mais aquelas que o futuro possa requerer.

Estes e demais atributos podem ser visualizados na Figura 64.

Figura 64 – Parâmetros de comparação para escolha da rede

4.6 LANs Virtuais e Prioridade

Uma rede local virtual, LAN Virtual (VLAN), é um agrupamento de dispositivos da rede de comunicação cujo tráfego de dados, inclusive difusões¹⁸, é isolado dos outros dispositivos da rede. A tecnologia VLAN oferece uma base flexível para construção de uma rede de larga escala, uma vez que os comutadores possibilitam que sejam criados segmentos isolados por configuração lógica sem a utilização de comutação física [72] [75].

As VLANs agrupam dispositivos pertencentes a uma ou mais LANs físicas para formar domínios de *broadcast*. Estes dispositivos numa VLAN se comunicam uns com os outros, embora, muitas vezes, pertençam a segmentos físicos diferentes, conforme ilustra a Figura 65.

Figura 65 – Exemplo de uso das VLANs

¹⁸ Quando o comutador, por exemplo, um *switch*, transmite quadros para todos os segmentos da rede.

Os dispositivos conectados aos *switches* 1 e 2 (Figura 65) podem pertencer a qualquer uma das VLANs implementadas (VLAN 1, 2 ou 3). Este exemplo é uma possível solução para a conexão de duas subestações de energia elétrica distantes geograficamente. Cada subestação com uma rede LAN estruturada através de um *switch*, e estes conectados por um enlace de comunicação de dados. Dispositivos diferentes nas duas subestações podem pertencer ao mesmo grupo de trabalho até mesmo quando estiverem em LANs fisicamente diferentes.

Muitos parâmetros são utilizados para agrupar dispositivos numa VLAN, tais como: número de portas, endereços MAC, endereços IP, endereços IP *multicast* ou combinações desses.

Alguns fabricantes estabelecem os números das portas do(s) *switch(es)* como parâmetro de agrupamento lógico, como, por exemplo, as portas 1 e 4 de um *switch* pertencem à VLAN 1, enquanto a porta 2 pertencem à VLAN 2, e a porta 3 à VLAN 3, e assim por diante. Este tipo de agrupamento é denominado *Port VLAN* [68].

Outra apreciação necessária se refere ao tipo de identificação de VLANs. Numa rede conectada por *switches*, cada um deve conhecer não somente os dispositivos associados às VLANs que este gerencia, mas também os outros dispositivos gerenciados pelos demais *switches*.

Dentre os métodos existentes, pode-se destacar a identificação de quadros (*frame tagging*), que se baseia na adição de informação ao quadro *Ethernet* numa rede. Quando um quadro viaja entre os *switches*, um cabeçalho extra é adicionado ao quadro MAC para definir a VLAN de destino. Esta adição pode ocorrer também, no dispositivo transmissor, conforme mostra a Figura 66.

Figura 66 – Adição da identificação (*tag*) ao quadro MAC

A informação contida no quadro de identificação (*frame tagging*) é utilizada pelos *switches* para determinar a(s) VLAN(s) que devem receber a mensagem.

Em 1996, o subcomitê IEEE 802.1 especificou um padrão, denominado 802.1Q que define o formato do *frame tagging* (Figura 67).

Figura 67 – Trecho do quadro MAC (rede *Ethernet* padrão) com identificação (*tag*) no cabeçalho
Fonte: [75]

Um agrupamento que utiliza este tipo de identificação pode ser denominado *Tag* VLAN.

Olifer [75], detalha o protocolo de identificação de acordo com a Figura 67:

Os dois primeiros *bytes* formam o TPID (*Tag Protocol Identifier*) e sempre contêm o valor hexadecimal 0x8100, pelo qual os equipamentos da rede devem reconhecer que esse quadro é o quadro *Ethernet* com identificação (*tag*). Os dois *bytes* seguintes são denominados TCI (*Tag Control Information*), e o protocolo IEEE 802.1Q os compartilha com o protocolo IEEE 802.1p (campo de prioridade do usuário, relativo a Qualidade de Serviço em LANs, QoS). Nesse campo 12 *bits* são usados para armazenar o número da VLAN (o campo VLAN ID), e 3 *bits* são alocados para armazenar a prioridade do quadro definida no padrão IEEE 802.1p. Um *bit*, conhecido como CFI (*Canonical Format Identifier*), foi introduzido para proporcionar a possibilidade de se distinguir quadros *Ethernet* de quadros *Token Ring*. Em quadros *Ethernet* esse *bit* deve ser configurado como 0. O campo de 12 *bits* VLAN ID possibilita a criação de até 4096 redes virtuais. Como o quadro de dados do quadro *Ethernet* diminui em dois *bytes* quando se adiciona o cabeçalho IEEE 802.1Q/p, seu tamanho máximo também diminui. Por exemplo, no caso do quadro *Ethernet* II esse tamanho se torna igual a 42-1496 *bytes*, ao contrário dos valores padrões de 46-1500 *bytes*.

Os três *bits* utilizados para determinar a prioridade do quadro (Figura 67) armazenam uma das oito possíveis classes de tráfego descritas pelo padrão IEEE 802.1D-1998, que inclui a especificação 802.1q, conforme descreve a Tabela 15.

As classes vídeo (VI), voz (VO), e controle de rede (NC) são as mais sensíveis a retardos. Sendo que a última, controle de rede, tem a prioridade mais alta, uma vez que todas as características da rede dependem de uma oportuna tomada de decisões e entrega de informações aos dispositivos da rede [75].

Tabela 15 – Classe de tráfego, IEEE 802.1D-1998

Prioridade do usuário	Acrônimo	Tipo de Tráfego	Descrição
0 (000 ₂)	BE	<i>Best Effort</i> (BE – Melhor Esforço)	Tráfego de LAN típica (baixa prioridade). Prioridade <i>Default</i> .
1 (001 ₂)	BK	<i>Background</i> (BK – Segundo Plano)	A origem desse tráfego pode transmitir volumes consideráveis de dados, porém não deve retardar outros tipos de aplicações.
2 (010 ₂)	-	Espaço	Não definido.
3 (011 ₂)	EE	<i>Excellent Effort</i> (EE – Esforço Excelente)	É o maior esforço que uma organização que presta serviços de informação poderia prestar aos seus melhores clientes.
4 (100 ₂)	CL	<i>Controlled Load</i> (CL – Carga Controlada)	Aplicações comerciais importantes, sujeitas a algum tipo de controle.
5 (101 ₂)	VI	Vídeo	Caracterizado por um atraso < 100 ms.
6 (110 ₂)	VO	Voz	Caracterizado por um atraso < 10 ms.
7 (111 ₂)	NC	<i>Network Control</i> (NC – Controle de Rede)	Controle de Rede (alta prioridade).

Fonte: [82]

Um *switch* que suporta a QoS usa diversas filas para processamento diferenciado das classes de tráfego, sendo que estas filas, podem ser atendidas por algoritmos distintos, como, por exemplo, ritmo de enfileiramento por prioridade.

A Tabela 16 menciona a recomendação do padrão IEEE 802.1D-1998, quanto ao número de filas e a distribuição das classes de tráfego atendidas.

Tabela 16 – Classes de tráfego e número de filas

Número de Filas	Definição do 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

Fonte: [82]

Como exemplo, quando somente uma fila está disponível (Tabela 16), então só pode existir a classe de tráfego BE na rede. Já com duas filas, o tráfego pode ser dividido em duas classes, BE e VO. Nessa condição, todo tráfego sensível a retardos deve ser classificado como VO (alta prioridade), não só o tráfego de voz como também o de vídeo e o de gerenciamento da rede. O restante do tráfego seria classificado como BE e considerado de baixa prioridade.

Cabe ressaltar que o procedimento sugerido é apenas uma recomendação, e os administradores de rede têm liberdade para classificar o tráfego de acordo com as suas necessidades [75].

4.7 Desempenho e Confiabilidade da Rede

Para avaliar objetivamente a qualidade dos serviços de comunicação em rede, existem características formalizadas que permitem a ponderação quantitativa de determinados aspectos da qualidade. Podem-se especificar os seguintes grupos de características [68] [75]:

- Desempenho;
- Confiabilidade;
- Segurança.

O desempenho de uma rede pode utilizar características estatísticas, como, por exemplo, a taxa de informações, mensurada como o resultado da divisão do volume de dados transmitidos pela duração de um dado intervalo de tempo; e os atrasos de transmissão, como: atraso médio, *jitter* (desvio médio dos atrasos a partir do atraso médio), coeficiente de variação, atraso máximo, variação máxima do atraso, tempo de resposta da rede e tempo líquido necessário para o transporte de dados do dispositivo de origem ao dispositivo de destino e para o retorno (RTT, *Round Trip Time*).

A confiabilidade da rede inclui percentagem de perda de pacotes, o coeficiente de disponibilidade durante o qual o sistema é utilizável, e a tolerância a falhas. Vale mencionar que a “confiabilidade dos serviços de transporte de dados fornecidos pela rede é garantida pela credibilidade de seus componentes (enlace de comunicação de dados e equipamentos de comunicação), disponibilidade de rotas alternativas e retransmissão de pacotes perdidos ou danificados” [75].

A segurança envolve ferramentas destinadas a proteger os recursos internos de informações localizadas dentro da rede local ou localizados em dispositivos individuais. Além de proteger informações no curso da sua transmissão através da rede.

Em sintonia com os objetivos específicos deste trabalho, duas características serão examinadas, relacionadas a desempenho e confiabilidade, respectivamente:

- Características de atrasos freqüentemente utilizadas na prática;
- Característica da perda de pacotes.

4.7.1 Características dos Atrasos de Pacote

Quando um pacote viaja entre transmissor e receptor, sofre ao longo desse caminho, diversos tipos de atrasos [77], como, por exemplo:

- Atraso de processamento: o tempo requerido para examinar o cabeçalho de um pacote e determinar para onde direcioná-lo;
- Atraso de fila: o tempo de espera do pacote no *buffer* de saída de um comutador;
- Atraso de transmissão: a quantidade de tempo requerida para transmitir todos os *bits* do pacote para o enlace de dados;
- Atraso de propagação: o tempo que um *bit* precisa para propagar-se do início até o fim de um enlace.

Investigando os desvios sofridos na entrega dos pacotes de dados, abstrai-se que o atraso é uma variável que permite a utilização de ferramentas estatísticas, para inferir as tendências de comportamento de uma rede de comunicação.

Neste ínterim, a modelagem de dados permite escolher a melhor representação deste fenômeno (atraso de pacotes), e pode ser descrita em três etapas [83]:

- Coleta de dados: corresponde ao processo de amostragem do fenômeno;
- Tratamento de dados: utilização de técnicas para descrever os dados levantados, identificar as possíveis falhas nos valores amostrados e aumentar o conhecimento acerca do fenômeno em estudo;
- Inferência: aplicam-se nesta etapa, conhecimentos do cálculo de probabilidades para inferir qual o comportamento a partir da amostra.

Na fase de tratamento dos dados é possível utilizar ferramentas da estatística descritiva para extrair medidas de posição e dispersão dos atrasos de pacotes, características freqüentemente usadas na prática, como as descritas por Tanenbaum [62], Fourozan [68] e Olifer [75]:

- Valor mínimo de atraso: tempo mínimo de atraso exposto na amostra;
- Valor máximo de atraso: tempo máximo de atraso exposto na amostra;
- Atraso médio (D): expresso como a soma de todos os atrasos (d_i) dividida pelo número total de amostras por mensurações (N);

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (2)$$

- *Jitter* (J), variação de atraso: representa o desvio médio dos atrasos a partir do atraso médio;

$$J = \sqrt{\frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^N (d_i - D)^2} \quad (3)$$

Tanto o atraso médio como o *jitter* são medidos em segundos.

- Coeficiente de variação (C_v): valor adimensional igual à razão entre o *jitter* e o atraso médio.

$$C_v = \frac{J}{D} \quad (4)$$

Na etapa de inferência é possível construir um histograma a partir das amostras, que possibilite identificar uma distribuição de probabilidades que represente o fenômeno. Distribuições comumente utilizadas são descritas por Chwif e Medina [83], e Freitas Filho [84]: Binominal, Poisson, Beta, Erlang, Exponencial, Gama, Lognormal, Normal, Uniforme, Triangular e Weibull.

4.7.2 Característica da Perda de Pacotes

Esta característica está relacionada, principalmente, a sobrecarga dos *buffers* de comutadores. Quando um pacote chega a um comutador e encontra uma fila cheia, sem espaço disponível para armazenamento, ocorre o descarte do pacote; isto é, ele é perdido.

A perda de pacotes é definida como a razão entre o número de pacotes perdidos e o número total de pacotes transmitidos:

$$\text{Razão de pacotes perdidos} = \frac{N_L}{N} \quad (5)$$

Onde:

- N é igual ao número total de pacotes transmitidos durante um determinado período de tempo;
- N_L é igual ao número de pacotes perdidos durante o mesmo período de tempo.

V. IEC-61850, Uma Nova Perspectiva

A automação de subestações demanda a implantação de uma rede de comunicação de dados e computadores, envolvendo telecomunicações e computação, para a integração de dispositivos com medição, controle e proteção, conforme a necessidade crescente de consolidar e disseminar, de forma rápida e precisa, informações provenientes do SEP.

Esta integração envolve uma grande diversidade de fabricantes, equipamentos, gerações de tecnologia, redes de comunicação, arquiteturas, *softwares*, protocolos de comunicação, e como consequência, alto custo para obtenção de uniformidade de seus dados.

Conforme supracitado na seção 4.3, os protocolos estabelecem os formatos, as regras, os métodos, negociando e concordando no uso de parâmetros, que assegurem o transporte de informações úteis entre dois ou mais dispositivos. No ambiente da automação o elevado número de protocolos, proprietários e não proprietários têm representado um desafio para conexão entre equipamentos de fabricantes distintos, conforme ilustra a Figura 68.

Figura 68 – Protocolos no ambiente de automação

Assim, vislumbra-se o anseio por uma solução que acomode essa diversidade, possibilite a integração dos dados nos ambientes de tecnologia de informação e automação de subestações, reduzindo custos de engenharia, comissionamento, operação, monitoração, diagnóstico e manutenção [20].

5.1 Histórico IEC-61850

Em 1988 o EPRI (*Electric Power Research Institute*) iniciou atividades para definição de uma arquitetura de comunicação para concessionárias de energia elétrica, UCA (*Utility Communications Architecture*). Com base nestes estudos a versão 2.0 da arquitetura foi publicada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) como o relatório técnico TR1550, 1999, definindo dois contextos de comunicação [30]:

- Comunicação entre centros de controle;
- Comunicação entre dispositivos de campo.

Paralelamente, a IEC (*International Electrotechnical Commission*) reconheceu a necessidade de normalizar as interfaces para os dispositivos de telecontrole, por meio da série de normas IEC-60870-5, através dos comitês técnicos IEC-TC57 e IEC-TC95 [17]:

- IEC-60870-5-101: trouxe a inovação para a padronização da comunicação entre unidades terminais remotas (UTRs) 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.

Este protocolo utiliza o modelo mestre-escravo, com a restrição de um pequeno número de funções e modelo de dados padronizado [85].

Em 1994, reconheceu-se a necessidade de uma padronização mais geral cobrindo redes de comunicação e sistemas em subestações, e foram criados os grupos de trabalho WG10, WG11 e WG12, conectados ao Comitê Técnico IEC-TC57 [86]. Esses três grupos reuniram especialistas de vários países com experiência nos protocolos, segundo a norma IEC-60870-5 e a UCA 2.0. A IEC e o EPRI concordaram então em ter uma única normalização, o padrão IEC-61850, Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações [17], estabelecendo o modelo de dados e a pilha de protocolos para troca de informações.

5.2 Composição e Objetivo

O padrão IEC-61850 foi organizado em 10 partes, todas aprovadas e com estado de padrão internacional, conforme descreve a Tabela 17.

Tabela 17 – Documentos que definem o padrão IEC-61850

Característica	Parte	Descrição	Publicação
Aspectos do Sistema	1	Introdução e Visão Geral	04/2003
	2	Glossário	01/2002
	3	Requisitos Gerais	01/2002
	4	Gerenciamento de Sistema e Projeto	01/2002
Configuração	5	Requisitos de Comunicação para Funções e Modelos de Dispositivos	07/2003
	6	Linguagem de Configuração para IEDs de Subestações Elétricas (SCL)	03/2004
Estrutura de Comunicação Básica para Equipamentos de Subestações e Alimentadores	7.1	Princípios e Modelos	07/2003
	7.2	Serviços de Interface de Comunicação Abstrata (ACSI)	05/2003
	7.3	Classe de Dados Comun (CDC)	05/2003
	7.4	Classes de Nós Lógicos e de Dados Compatíveis	05/2003
Mapeamento de Serviços de Comunicação Específicos	8.1	Mapeamento para MMS (ISO/IEC 9506 Parte 1 and Parte 2) e para ISO/IEC 8802-3	05/2004
	9.1	Valores Amostrais sobre Enlace Serial Unidirecional <i>Multidrop</i> Ponto-a-Ponto	05/2003
	9.2	Valores Amostrais sobre ISO/IEC 8802-3	04/2004
Ensaio	10	Testes de Conformidade	06/2005

Fonte: [86]

A parte 1 do padrão IEC-61850 [86] descreve como premissa a interoperabilidade na troca de informações entre dispositivos de fabricantes distintos, como, por exemplo, equipamentos eletrônicos inteligentes (IEDs), sendo que a comunicação deve suportar as funções operativas das subestações, e garantir entre outras, as seguintes características:

- A comunicação baseada no perfil de padrões já existentes (IEC/IEEE/ISO/OSI);
- A utilização de protocolos abertos com suportar a auto-descrição dos dispositivos, o que deve permitir a adição de novas funcionalidades;
- A utilização de uma estrutura de dados (*data object*) que represente informações específicas, por exemplo, estados e medições, relativas às necessidades da indústria de energia elétrica;

- A sintaxe e semântica das informações devem basear-se no uso de objetos de dados comuns relativos ao sistema de potência; e
- Suportar futuros desenvolvimentos tecnológicos.

Adicionalmente, as operadoras do sistema de energia elétrica também requerem como objetivo a intercambialidade entre IEDs de fabricantes distintos, ou seja, a substituição de equipamentos de um fabricante por outro, sem necessidade de alterações nos demais dispositivos constituintes do sistema.

Embora inicialmente o padrão IEC-61850 tenha sido concebido apenas para uso interno às subestações, estudos estão sendo realizados para utilizá-lo também na comunicação entre subestações, e subestação – centro de controle.

Mackiewicz [29] esboça que a estrutura do padrão IEC-61850 utiliza o conceito de *definição abstrata* para aceção de dados e serviços, isto é, objetos e serviços são criados independentemente de qualquer outro protocolo, permitindo neste entretempo, mapeá-los para diversas regras de comunicação que atendam os dados e serviços requeridos.

Conforme explicita a Tabela 17, a parte 2 do padrão IEC-61850 contém o glossário com as terminologias específicas e definições utilizadas na conjuntura do sistema de automação de subestações, e das várias partes do padrão.

5.3 Requisitos Gerais

A parte 3 do IEC-61850 define requisitos gerais da comunicação em rede, com ênfase para as exigências de qualidade e recomendações específicas sobre a relevância de outras normas e especificações. As minúcias desta parte referem-se a requisitos, como [87] [88]:

- No requisito de confiabilidade o padrão exige que a falha de um componente de comunicação não afete a operabilidade do sistema e que o monitoramento e controle local sejam mantidos. Dependendo dos requisitos de confiabilidade e da filosofia de operação, redundância de diferentes níveis pode ser aplicada;
- A falha de um componente não deve desativar funções críticas do sistema, de tal modo que as funções de proteção devem atuar de maneira autônoma;
- O padrão também estabelece que a interface homem máquina (IHM) local deve operar independente da sala de controle central;
- Devem-se observar as influências climáticas, mecânicas e elétricas que são aplicadas as mídias e interfaces de comunicação utilizadas para monitoramento e controle de processos dentro da subestação;

- Com relação à interferência eletromagnética (EMI), o padrão define que os equipamentos de comunicação devem suportar os níveis presentes em uma subestação;
- A integridade dos dados transmitidos deve ser garantida. Detecção de erros de transmissão, recuperação frente ao congestionamento devem ser considerados;
- A rede de comunicação dentro da subestação deve ser capaz de cobrir distâncias com até 2 km;
- A rede de comunicação dentro da subestação deve ser capaz de servir toda configuração típica de *bay* no chaveamento de alta tensão;
- O desempenho dos dispositivos de comunicação não deve ser afetado por interrupções no fornecimento de alimentação por até 10 ms.

Os demais requisitos da comunicação estão na parte 3 do padrão IEC-61850 [87].

5.4 Gerenciamento do Projeto e Sistema

As especificações pertencentes à parte 4 do padrão IEC-61850 descrevem as exigências básicas de gerenciamento do projeto e sistema para automação da subestação com respeito aos tópicos [89]:

- Processo de engenharia e as ferramentas de suporte;
- O ciclo de vida de todo sistema e dos IEDs;
- A garantia de qualidade iniciada com o estágio de desenvolvimento e terminada com o abandono e desmantelamento do SAS e seus IEDs.

A fase de engenharia inclui a definição das configurações de *hardware* necessárias para a subestação, a definição dos IEDs e suas interfaces com outros IEDs e com o ambiente, conforme ilustra a Figura 69. Consiste também no dimensionamento das funcionalidades e quantidade de sinais envolvidos, na parametrização e documentação do projeto.

De acordo com a Figura 69 o SAS consiste de diferentes IEDs cuja comunicação com outros dispositivos acontece via canais de comunicação. Estes dispositivos executam tarefas concernentes às interações com:

- O ambiente de telecomunicações;
- O centro de controle da rede;
- Sistemas subordinados e de teleproteção;
- Operadores locais; e

- No nível de processo, com: disjuntores e chaves seccionadoras, transformadores e equipamentos auxiliares.

Figura 69 – Estrutura do SAS e seu ambiente
Fonte: [89]

Os IEDs considerados são:

- Para o ambiente de telecomunicações:
 - Gateways;
 - Conversores;
 - Unidades terminais remotas (UTRs);
 - Relés de proteção.
- Para a interface homem máquina (IHM):
 - Computadores pessoais e Estações de trabalho;
 - IEDs com IHM integrada.
- Para o ambiente de processo:
 - Unidades de controle do bay;
 - Relés de proteção;
 - UTRs;
 - Unidades de medição;
 - Controles autônomos;
 - Transdutores;
 - TCs e TPs digitais.

Os parâmetros de um projeto são classificados em [89]:

- Parâmetros de configuração: definem o comportamento de todo o SAS e seus IEDs;
- Parâmetros de operação: definem o comportamento de certas funcionalidades do SAS, usualmente incluem parâmetros funcionais e de processo, tais como: valores limites, tempos de saída de um comando e tempos de atraso numa sequência de chaveamentos.

Com relação as suas funcionalidades os parâmetros são classificados em:

- Parâmetros de sistema: definem a cooperação entre IEDs, como, por exemplo, a configuração de componentes de *hardware* no SAS, a taxa de transmissão e protocolos de comunicação entre os IEDs, as exigências e funções disponíveis no *software* dos IEDs ao nível de estação;
- Parâmetros de processo: descrevem todos os tipos de informações trocadas entre o ambiente de processo e o SAS, por exemplo, a relação entre um evento de entrada e um comando;
- Parâmetros funcionais: descrevem quantitativamente e qualitativamente os recursos utilizados pelo usuário, como as condições de *trip* no relé de proteção.

O processo de engenharia e as ferramentas utilizadas criam condições para adaptar um SAS às especificações da subestação e sua filosofia de operação.

A parte 4 também explicita que o ciclo de vida de um SAS e de seus IEDs está sujeito a diferentes pontos de vista, do fabricante e do cliente:

- Para o fabricante o ciclo de vida inclui o período entre o início de produção e da descontinuidade da família de produtos do SAS;
- Do ponto de vista do cliente, o ciclo de vida compreende o período entre o comissionamento da primeira instalação do SAS, com base em uma família de produtos, e do desmantelamento da última instalação utilizando a referida família.

O padrão IEC-61850 descreve que o fabricante deve anunciar a descontinuidade de um produto e prestar suporte após a interrupção na fabricação.

Como ponto final, explicita que a qualidade é uma tarefa comum às duas entidades, fabricante e cliente. Como exemplo, o fabricante deve estabelecer e manter um sistema de qualidade, relativo aos seus produtos, de acordo com a ISO-9001. Já o cliente é responsável

por garantir que o ambiente e as condições de funcionamento satisfaçam as condições descritas na documentação técnica do SAS e seus produtos.

5.5 Requisitos de Comunicação

O IEC-61850, parte 5, especifica os requisitos para comunicação das funções implementadas nos diversos níveis do SAS, e para o modelo de dispositivos.

As funções referem-se a tarefas que devem ser executadas na subestação, por exemplo: controle, monitoração e proteção dos equipamentos da subestação. E podem ser logicamente alocadas nos três diferentes níveis hierárquicos de uma subestação, conforme descreve a Figura 70 (referida no Capítulo I).

Figura 70 – Níveis e interfaces lógicas no SAS
Fonte: [90]

As interfaces (IF) explicitadas são definidas como:

- IF1: troca de dados de proteção entre os níveis de *bay* e estação;
- IF2: troca de dados de proteção entre os níveis de *bay* e proteção remota;
- IF3: troca de dados dentro o nível de *bay*;
- IF4: troca de dados instantâneos de TC e TP entre os níveis de processo e *bay*;
- IF5: troca de dados de controle entre os níveis de processo e *bay*;
- IF6: troca de dados de controle entre os níveis de *bay* e estação;
- IF7: troca de dados entre a subestação e o local de trabalho da engenharia;

- IF8: troca de dados entre os *bays* especialmente para funções rápidas como intertravamento;
- IF9: troca de dados dentro no nível da estação;
- IF10: troca de dados de controle entre os dispositivos da subestação e o centro de controle remoto.

Apesar da similaridade lógica não há forma única para que as funções sejam atreladas aos dispositivos físicos. O mapeamento é dependente, por exemplo, da disponibilidade e desempenho requeridos, restrição de custos e estado da arte em tecnologia.

Neste contexto, o objetivo do padrão IEC-61850 *series* é fornecer interoperabilidade entre os IEDs de diferentes fabricantes, ou mais precisamente, entre as funções desempenhadas nos níveis hierárquicos da subestação, que residem em dispositivos físicos distintos [90].

Conforme mostra a Figura 71, diferentes funções (*Functions*, F) são implementadas em vários dispositivos físicos (*Physical Devices*, PD) através da divisão em subfunções, ou nós lógicos (*Logical Nodes*, LN). Os nós lógicos podem trocar informações necessárias à implementação das funções através de conexões lógicas (*Logical Connections*, LC) e físicas (*Physical Connections*, PC).

Figura 71 – Noção de conexão e Nó Lógico (LN)

Fonte: [90]

5.5.1 Nó Lógico, LN

Na automação de uma subestação os protocolos normalmente definem como os *bytes* serão transmitidos, utilizando um conceito orientado aos sinais, pelo qual, cada mensagem representa um ponto de dado como, por exemplo, uma informação de estado ou um valor

numérico [34]. Isto requer que o engenheiro de sistemas configure e mapeie os sinais manualmente, elemento por elemento, endereço por endereço.

Em contraste com o modelo orientado aos sinais, o padrão IEC-61850 utiliza o conjunto de conhecimentos de orientação a objeto para enunciar as características essenciais e específicas de uma modelagem de dados orientada à informação e não ao dispositivo. Harmoniza assim, atributos e funções dos equipamentos físicos de uma subestação, ou usina do sistema elétrico, de forma a garantir a consistência e o intercâmbio dos dados, padronizados, independente da marca ou do fabricante.

Um IED que forneça o protocolo IEC-61850 é formado, inicialmente, por um *hardware* que se conecta ao sistema de comunicação de dados, através de um endereço de rede (físico e lógico), e o conjunto de funções que caracterizam seu comportamento.

As funções de um SAS como supervisão, controle e proteção dos dispositivos primários e do próprio SEP, foram identificadas e separadas em subfunções, que são descritas como um grupo de dados e serviços associados em classes, formando um nó lógico (LN). Por sua vez, um conjunto de LNs forma um dispositivo lógico (DL), que reside no dispositivo físico (IED), conforme ilustra a Figura 72 [29] [31].

Figura 72 – Modelo de dados

Os nós lógicos são congregados em grupos, que por sua vez são identificados por indicadores, conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Grupo de LN

Grupo Indicador	Grupo de Nó Lógico
A	Controle Automático
C	Controle Supervisionado
G	Função Genérica
I	Interfaces e Arquivamento
L	Sistema de Nó Lógico
M	Contador e Medição
P	Função de Proteção
R	Função Relacionada a Proteção
S	Sensores, Monitoração
T	Transformador de Instrumento
X	Disjuntor e Chave Seccionadora
Y	Transformador de Potência e Funções Relacionadas
Z	Equipamentos Adicionais do SEP

Fonte: [91]

Cada LN possui uma denominação, iniciada pelo grupo indicador, como, por exemplo:

- RREC – Religamento automático;
- CSWT – Controlador de chaveamento;
- MMXU – Medição operativa e indicativa;
- MMTR – Contador;
- MHAI – Medição de harmônicos e inter-harmônicos;
- MDIF – Medição Diferencial;
- PDIS – Proteção de Distância;
- XCBR – Chave Disjuntor;
- XSWI – Chave Seccionadora;
- TCTR – Transformador de corrente.

Um sufixo pode ser utilizado para o nome do nó, e possibilitar a diferenciação de nós lógicos com o mesmo nome. Como exemplo, Mackiewicz [29] supõe a existência de duas entradas de medição em um equipamento para aferir dois alimentadores trifásicos. O nome padronizado para um nó lógico de medição é MMXU. Para diferenciar as medições de cada um dos alimentadores, o IEC-61850 adiciona o sufixo 1 e 2 aos nomes, procedendo à identificação como MMXU1 e MMXU2.

Os nós lógicos mantêm sob controle uma relação de dados concernente a sua função com atributos que dizem respeito a cada um em particular. Cada elemento de dados tem um nome único, sendo que sua representação tem sentido definido nas funcionalidades e características do SEP.

Estes pontos lógicos permitem criar modelos de informação de um dispositivo real, como, por exemplo, a representação de um disjuntor é denominada XCBR, indicador X (disjuntor e seccionadora) e CBR (*circuit breaker*), conforme ilustra a Figura 73.

Figura 73 – Nó lógico XCBR

Este dispositivo contém uma diversidade de dados associados (classe de dados), tais como:

- Pos: posição;
- OpCnt: contador de operações;
- BlkOpn: bloqueado para comando de abertura;
- BlkCls: bloqueado para comando de fechamento;
- CBOpCap: disponibilidade de operação;
- LOC: bloqueado.

O elemento de dado associado, *Pos*, é diferente de um simples ponto de estado do disjuntor. Segundo Gurjão, Souza e Carmo [31], *Pos* tem vários atributos de controle, substituição, configuração, descrição e extensão, como *Pos.ctlVal*, que representa um controle e pode ser um comando de abertura ou fechamento. O *Pos.stVal* que representa a posição real de um disjuntor, podendo assumir os seguintes estados: transição, aberto, fechado ou defeito.

Para que os requisitos de comunicação sejam atendidos, a identificação de todas as funções faz-se necessária, o que versa na descrição e divisão das funções em LNs e na definição das subfunções e seus atributos.

5.6 Linguagem de Configuração

Diante de possibilidades distintas de uso dos nós lógicos em diferentes dispositivos, se faz necessário uma estratégia que atribua o caminho que a informação deve seguir. A definição desta estrutura está descrita na parte 6 do padrão IEC-61850, que especifica uma linguagem de descrição formal de configuração para sistemas de automação de subestações, conhecida como *Substation Configuration Language* (SCL).

Esta linguagem permite uma descrição das relações entre o sistema de automação da subestação e os equipamentos de pátio, ou seja, configuração dos IEDs com seus respectivos parâmetros, além de configuração de funções de subestações, de acordo com o IEC-61850-5 e IEC-61850-7x. Cada equipamento deve prover um arquivo SCL que descreva sua própria configuração, com base na *eXtender Markup Language* (XML) versão 1.0.

A SCL é composta por arquivos que contêm dados da subestação; das relações dos equipamentos de manobra; da funcionalidade dos IEDs e de todos os serviços de comunicação, permitindo a troca de informações de configuração entre ferramentas de fabricantes distintos [31], conforme Tabela 19.

Tabela 19 – Arquivos de configuração da SCL

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

Fonte: [92]

Estes arquivos são escritos em formato texto, o que permite sua criação e manutenção em qualquer editor, embora existam aplicativos de engenharia com ambientes gráficos e amigáveis.

A Figura 74 ilustra a estrutura da SCL deliberada pelo padrão.

Figura 74 – Estrutura da linguagem de configuração da subestação
Fonte: [37]

Com base na descrição de Rein Jr. [93], a Figura 75 descreve um trecho de arquivo SCL da subestação (LSEE), que contém um *bay* Q1, alimentação E1, um disjuntor QA1 e uma seccionadora QB1, ambos conectados ao nó L1. O disjuntor está associado ao LN XCBR1, da classe XCBR, e a seccionadora está associada ao LN XSWI2.

Figura 75 – Fragmento de um arquivo SCL
Fonte: [93]

Um *software* para configuração de IEDs deve ser capaz de importar ou exportar arquivos definidos pelo padrão. A Figura 76 esboça a arquitetura de um sistema de configuração que utiliza a linguagem SCL. Vislumbra-se a estação de engenharia utilizando um aplicativo para o gerenciamento das configurações, onde:

- O configurador do sistema é baseado no arquivo SSD, descrevendo os diagramas e as funcionalidades da automação da subestação associados aos LNs.

- O configurador de IED, que utiliza o arquivo ICD para delinear as capacidades e pré-configurações dos IEDs.

O aplicativo de gerenciamento das configurações transfere através do *gateway* os arquivos contendo as configurações para os IEDs conectados a rede de comunicação de dados.

Figura 76 – Arquitetura do sistema de configuração que utiliza linguagem SCL
Fonte: [92]

A SCL em toda a sua extensão descreve modelos, como os citados por Gurjão, Souza e Carmo [31] em referência a norma [92]:

- Estrutura do sistema de potência primário: traça como os equipamentos estão conectados e as funções utilizadas;
- Sistema de comunicações: estabelece como os IEDs serão conectados nas redes e sub-redes, e quais os pontos de acesso de comunicação;
- Nível de aplicação das comunicações: mostra como os dados serão agrupados para envio e como os IEDs disparam o envio dos dados, além dos serviços escolhidos;
- Configuração de cada dispositivo lógico, como nós lógicos com suas classes e tipos pertencentes a cada dispositivo lógico;
- Definições de tipo para cada instância de nó lógico;
- Relacionamento entre cada instância de nó lógico e o IED hospedeiro.

Os principais benefícios do SCL, conforme Mackiewicz [29]:

- Disponibiliza ferramentas de desenvolvimento *off-line* para gerar os arquivos necessários à configuração automática dos IEDs, reduzindo custos e, senão todas, quase todas as tarefas de configuração manual;

- Possibilita que os arquivos de configuração sejam padronizados e utilizados por vários usuários e, assim, reduz inconsistências e equívocos na configuração do sistema. Os usuários podem fornecer seus próprios arquivos SCL para seus respectivos fornecedores e receberem seus IEDs já adequadamente configurados;
- Permite que as configurações sejam feitas *off-line* sem a necessidade de o IED estar conectado na rede.

5.7 Estrutura de Comunicação

A estrutura de comunicação do padrão IEC-61850 utiliza o conceito de “definição abstrata” para acepção de dados e serviços, permitindo mapeá-los para outros protocolos que atendam os dados e serviços requeridos. A parte 7.1 especifica os princípios e modelos necessários para compreender as seções posteriores [94]. As partes 7.2 e 7.4 do padrão definem os serviços abstratos e os objetos de dados abstratos respectivamente.

Conforme Mackiewicz [29], os objetos de dados são compostos de partes comuns, como: estados, medições e controle. O conceito de *Common Data Classes* (CDC) foi desenvolvido utilizando-se de blocos comuns para compor objetos de dados maiores, de acordo com a parte 7.3 do padrão.

5.7.1 Serviço de Interface de Comunicação Abstrata, ACSI

A parte 7.2 do padrão IEC-61850 define o serviço de interface de comunicação abstrata (ACSI) como um modelo de classe hierárquica de todas as informações que podem ser acessadas e trocadas, implantando a cooperação entre os vários dispositivos do sistema.

O ACSI dispõe das seguintes interfaces abstratas, conforme exemplifica a Figura 77:

- A interface abstrata que descreve a comunicação entre um cliente e um servidor remoto, para:
 - Acesso e recuperação de dados em tempo real;
 - Controle do dispositivo;
 - Eventos de registro e *login*;
 - Editor (publica) e Assinante (subcreve) de informações;
 - Auto-descrição do dispositivo;
 - Arquivo de transferência.

- A interface de comunicação para sistemas cujo tempo na troca de dados é um fator crítico, por exemplo, a troca de dados entre IEDs utilizados para proteção do sistema elétrico.

Figura 77 – Método de comunicação ACSI
Fonte: [94]

Esta parte do padrão IEC-61850 também pode ser aplicada para descrever modelos de dispositivos e funções para atividades adicionais, tais como [95]:

- Troca de informações entre subestações;
- Troca de informações entre subestações e centro de controle;
- Troca de informações entre o ambiente de campo e o centro de controle;
- Troca de informações para medição.

A parte 7.2, descreve os modelos de classe hierárquica que constroem domínios específicos de informações, para serem acessadas e trocadas, tais como:

- *Logical-Node*: contém as informações produzidas e consumidas por domínios específicos, por exemplo, a função de proteção 59 (sobretensão);
- *Data-Set*: agrupamento de dados e atributos utilizados para acesso direto entre IEDs;
- *File Transfer*: define a troca de grandes blocos de dados, tais como programas;
- *Control*: define os serviços de controle para o sistema e seus dispositivos;

- *Time and time synchronization*: define a base de tempo para o sistema e seus dispositivos.

5.7.2 Classe Comum de Dados, CDC

O elemento de dados característico de um nó lógico é definido de acordo com a especificação de uma classe comum de dados (*Common Data Class*, CDC), descrita no padrão IEC-61850, parte 7.3. Cada CDC tem um nome definido e determina o tipo de estrutura dos dados, dentro de um nó lógico, como, por exemplo, informação de estado, medição, parametrização ou controle (Tabela 20).

Tabela 20 – CDCs citadas no padrão IEC-61850 parte 7.3

Nome	Tipo da Informação	Descrição
ACT	Estado	Proteção ativa
ACD	Estado	Proteção direcional ativa
SEC	Estado	Contador de violações
SPS	Estado	Ponto simples
DPS	Estado	Ponto duplo
INS	Estado	Inteiro
BCR	Estado	Contador binário
MV	Medição	Valor real
CMV	Medição	Valor complexo
SAV	Medição	Valor análogo
WYE	Medição	Valor fase-terra de sistema trifásico em estrela
DEL	Medição	Valor fase-terra de sistema trifásico em triângulo
SEQ	Medição	Seqüência de fases
HMV	Medição	Valor de harmônica
HWYE	Medição	Valor de harmônica para ligação em estrela
HDEL	Medição	Valor de harmônica para ligação em triângulo
SPC	Controle	Posição única controlável
DPC	Controle	Posição dupla controlável
INC	Controle	Posição inteira controlável
BSC	Controle	Informação binária de controle de posição de passos
ISC	Controle	Informação analógica de controle de posição de passos
APC	Controle	Informação do valor de referência
SPG	Parametrização	Parâmetros de um ponto de medição
ING	Parametrização	Parâmetros de valores inteiros
ASG	Parametrização	Parametrização analógica
CURVE	Parametrização	Parametrização de curva
DPL	Supervisão	Identificador do dispositivo
LPL	Supervisão	Identificador do Nó Lógico
CSD	Supervisão	Descrição do formato da curva

Fonte: [96] [88]

A Figura 78 esboça a modelagem de um nó lógico XCBR que é composto de dados estruturados, tais como, *Pos* e *BlkOpn* (subseção 5.5.1). Pode-se verificar que *Pos* não se restringe apenas a indicar a posição do disjuntor (ou seja, o estado aberto ou fechado), mas um conjunto de atributos, separados pelo tipo de informação que representam (controle, indicação, substituição etc).

Figura 78 – Estrutura do LN, tipo de informação e atributos
Fonte: [94]

Para o arranjo das CDCs são definidos vários tipos de atributos, conforme trecho do padrão descrito na Tabela 21.

Tabela 21 – Exemplo de definição dos tipos de atributos

Definição do Tipo de Atributo	Tipo de Atributo	Descrição
Qualidade	<i>validity</i>	A validade da informação deve ser boa, questionável ou inválida.
Valores Analógicos	<i>FLOAT32</i>	Valores analógicos representados no formato <i>float</i> .
Configuração de Range	<i>min, max</i>	Representam respectivamente o mínimo e o máximo para a variável do processo.
Posição de Passo	<i>posVal</i>	Indicação de posição.
Configuração de Pulso	<i>cmdQual</i>	Indica se o comando é pulsado ou persistente.
Booleano	<i>stVal</i>	Define o estado de valor do dado.
Qualidade	<i>q</i>	Qualidade do atributo(s) que representa o estado de valor do dado.

Fonte: [96]

Como exemplo de anatomia, a Tabela 22 expõe a CDC ACT (*Protection Activation Information*).

Tabela 22 – Anatomia de uma classe de proteção ativa (ACT), funcionalidade de estado

ACT class											
1	Attribute Name	2	Attribute Type	3	FC	4	TrgOp	5	Value/Value Range	6	M/O/C
	DataName	Inherited from Data Class (see IEC 61850-7-2)									
DataAttribute											
status											
	general	BOOLEAN	ST	dchg						M	
	phsA	BOOLEAN	ST	dchg						O	
	phsB	BOOLEAN	ST	dchg						O	
	phsC	BOOLEAN	ST	dchg						O	
	neut	BOOLEAN	ST	dchg						O	
	q	Quality	ST	qchg						M	
	t	TimeStamp	ST							M	
configuration, description and extension											
	operTm	TimeStamp	CF							O	
	d	VISIBLE STRING255	DC		Text					O	
	dU	UNICODE STRING255	DC							O	
	cdcNs	VISIBLE STRING255	EX							AC_DLND_M	
	cdcName	VISIBLE STRING255	EX							AC_DLND_M	
	dataNs	VISIBLE STRING255	EX							AC_DLN_M	
Services											
As defined in Table 13											

Fonte: [96]

Onde:

1. Nome do Atributo;
2. Tipo do Atributo;
3. *Functional Constraints* (FC) indica que o atributo só se aplica a determinados serviços específicos, tais como:
 - Estado (ST, *status*);
 - Medição de valores analógicos (MX);
 - Controle (CO);
 - Valor amostrado (SV);
 - Configuração (CF);
 - Descrição (DC);
 - Parâmetros de ajuste de grupos (SG); e
 - Definição do espaço para nomes (EX).
4. *Trigger Option* (TrgOp) influencia nas possibilidades de mudar parâmetros de um relatório;

5. *Value Range* define o conjunto de valores permitidos para um determinado atributo;
6. M/O/C, informa se o atributo é mandatário, opcional ou condicional.

5.7.3 Compatibilidade entre Nós Lógicos e Classes de Dados

A parte 7.4 do padrão IEC-61850 [91] especifica os modelos de informação dos dispositivos e funções relacionadas para aplicações em subestações. Em especial, estabelece a compatibilidade dos nomes dos nós lógicos e o nome dos dados para comunicação entre IEDs, possibilitando a interoperabilidade na comunicação.

São apontados os detalhamentos de cada LN, isto é, o nome dos dados e atributos, as CDCs utilizadas, o tipo de informação e demais elementos, conforme ilustra a Tabela 23 para o LN XCBR.

Tabela 23 – Anatomia do nó lógico (XCBR), Disjuntor

1	2	3 XCBR class	4
Attribute Name	Attr. Type	Explanation	T M/O
LNName		Shall be inherited from Logical-Node Class (see IEC 61850-7-2)	
Data			
Common Logical Node Information			
		LN shall inherit all Mandatory Data from Common Logical Node Class	M
Loc	SPS	Local operation (local means without substation automation communication, hardwired direct control)	M
EEHealth	INS	External equipment health	O
EEName	DPL	External equipment name plate	O
OpCnt	INS	Operation counter	M
Controls			
Pos	DPC	Switch position	M
BlkOpn	SPC	Block opening	M
BlkCls	SPC	Block closing	M
ChaMotEna	SPC	Charger motor enabled	O
Metered Values			
SumSwARs	BCR	Sum of Switched Amperes, resetable	O
Status Information			
CBOpCap	INS	Circuit breaker operating capability	M
POWCap	INS	Point On Wave switching capability	O
MaxOpCap	INS	Circuit breaker operating capability when fully charged	O

Fonte: [91]

Onde:

1. Nome dos Dados e Atributos;
2. Classe Comum de Dados, CDC;

3. Descrição do dado relacionado a um LN, e como ele é utilizado;
4. M/O/C, informa se o atributo é mandatário, opcional ou condicional.

Santos [88] salienta que o padrão não se restringe apenas aos LNs previstos, suporta novos LNs que podem ser criados por usuários seguindo os padrões estabelecidos na parte 4.

5.8 Mapeamento de Serviços de Comunicação Específicos

A parte 8.1 do padrão IEC-61850 especifica um método de troca de dados com, ou sem restrições críticas de tempo, através de uma LAN, tendo como objetivo o fornecimento de instruções e especificações detalhadas quanto aos mecanismos e as regras necessárias para implementar os serviços, objetos e algoritmos apontados no padrão IEC-61850, partes 7.2, 7.3 e 7.4, quanto ao uso da norma ISO 9506, *Manufacturing Message Specification* (MMS).

Os serviços e o protocolo MMS são especificados para operar sobre as camadas do modelo OSI e compatíveis com os perfis de comunicação do TCP/IP. A utilização do MMS permite o uso de arquiteturas centralizadas e distribuídas, e inclui a troca de dados seja de estado, operações de controle ou notificações em tempo real [97].

Existem vários serviços especificados na parte 7.2 do padrão IEC-61850, que são intencionalmente mapeados para protocolos e perfis de comunicação que não fazem uso da norma ISO 9506 (MMS, como o protocolo da camada de aplicação), devido a informações com restrições críticas de tempo.

5.8.1 Pilha de Protocolos e Tipos de Mensagem

Na especificação do padrão IEC-61850, foram definidos dois perfis (*profiles*), ou conjuntos de padrões escolhidos para se implementar um determinado protocolo, dividindo as sete camadas do modelo RM-OSI em dois grupos, o “*Application Profile (A-Profile)*” que engloba as três camadas superiores (aplicação, apresentação e sessão) e o “*Transport Profile (T-Profile)*” que conglobera as quatro camadas inferiores restantes (transporte, rede, enlace e física) [97]. Várias combinações de *A-Profile* e *T-Profile* podem ser executadas com o intuito de permitir a troca de determinados tipos de informações e serviços.

Os serviços, conforme especifica a parte 7.2 do padrão IEC-61850, são mapeados em quatro diferentes combinações:

- Cliente/Servidor: núcleo de serviços ACSI, utilizando o conjunto de protocolos MMS;

- *Time Sync*: para realizar sincronismo de tempo com o protocolo *Simple Network Time Protocol* (SNTP);
- *Sampled Values* (SV): valores amostrados, como corrente e tensão de transformadores;
- GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*)/GSSE (*Generic Substation Status Event*): mensagens pertencentes à classe GSE (*Generic Substation Event*).

A Tabela 24 explicita quais camadas do modelo OSI tem protocolos descritos pelo padrão IEC-61850, para cada combinação supracitada, de acordo com o respectivo *profile* (consultar a parte 8.1 para vislumbrar os protocolos apontados pelo padrão [97]).

Tabela 24 – Combinações de serviços dos protocolos, padrão IEC-61850 parte 8.1

A ou T <i>profile</i>	Camada do modelo RM-OSI	Serviço Cliente/Servidor (OSI)	Serviço Cliente/Servidor (TCP/IP)	<i>Time Sync</i>	SV	GOOSE	GSEE
A	Aplicação	X	X	X	X	X	X
	Apresentação	X	X		X	X	X
	Sessão	X	X				X
	Transporte	X	X	X			X
T	Rede	X	X	X			X
	Enlace	X	X	X	X	X	X
	Física	X	X	X	X	X	X

Observa-se na Tabela 24 que somente as duas primeiras camadas, física e de enlace, são comuns a todos os serviços e suas respectivas mensagens, sendo que na camada física utilizam-se dados do tipo *Ethernet*. As células em verde (*Time Sync*, SV e GOOSE) não possuem protocolos estabelecidos pelo padrão IEC-61850.

Para permitir diferentes exigências no ambiente das subestações, as diversas mensagens normalizadas pelo IEC-61850, parte 5, são classificadas conforme o desempenho. Existem dois grupos independentes, um para controle e proteção, outro para medições e aplicações de qualidade de energia. Uma vez que as classes de desempenho são definidas de acordo com as funcionalidades necessárias, elas se tornam independentes do tamanho da subestação.

A Tabela 25 descreve os tipos de mensagem, as classes de desempenho e os serviços onde estão vinculadas (vide Tabela 24).

Tabela 25 – Tipos de mensagem e classes de desempenho

Tipo	Classe de Desempenho	Serviço
1	Mensagem rápida	GOOSE/GSSE
1A	<i>Trip</i>	GOOSE/GSEE
2	Mensagem de média velocidade	Cliente/Servidor
3	Mensagens lentas	Cliente/Servidor
4	Dados em rajada (<i>raw data</i>)	SV
5	Funções de transferência de arquivo	Cliente/Servidor
6	Mensagens de sincronismo de tempo	<i>Time Sync</i>

Fonte: [97]

As mensagens do tipo 1 e 1A possuem restrições críticas de tempo, como, por exemplo, o comando de abertura de um disjuntor de alta tensão, e necessitam de maior prioridade para acessar a camada de enlace. Já as mensagens do tipo 2, 3 e 5 permitem a utilização de toda a pilha do protocolo em troca de maior funcionalidade incluída pelo MMS e a ACSI, operando, por exemplo, sobre o TCP/IP. As do tipo 4 são utilizadas em transmissão de valores amostrados e as do tipo 6 buscam a sincronização entre IEDs por meio de mensagens de sincronismo de tempo, enviadas pela rede de comunicação, através do protocolo SNTP (*Simple Network Time Protocol*).

As mensagens que não têm restrição de tempo utilizam toda a pilha de protocolos; enquanto as demais, que têm restrições quanto a atrasos, são mapeadas diretamente na camada de enlace [31], conforme exemplifica de forma sumarizada a Figura 79, para as mensagens SV e GOOSE.

Figura 79 – Representação simplificada da pilha de protocolos IEC-61850

Fonte: [31]

A parte 8.1 do padrão descreve também os tempos esperados para cada tipo de mensagens, por exemplo:

- Mensagens Tipo 1: espera-se uma atuação imediata do IED;
- Mensagens Tipo 1A: aplicado em um *bay* de distribuição cujas exigências são mais baixas, espera-se um desempenho na ordem de 10 ms; no caso típico de um *bay* de transmissão, ou se nada for especificado pelo usuário, espera um desempenho de 3 ms.

Para as demais mensagens consultar [97].

5.8.2 Mensagens GOOSE

As mensagens tipo 1 e 1A são denominadas GSE e podem ser classificadas em GOOSE e GSSE. Pereira [32] cita que nas mensagens GOOSE, a informação é configurável e pode utilizar um grupo de dados (*data set*) que permite a um receptor tomar ciência que um estado foi modificado e o instante da alteração. Já as mensagens GSSE somente suportam uma estrutura fixa de informação de estado, a qual é publicada e disponibilizada na rede.

Bastos e Castro [20] descrevem que a mensagem GOOSE foi implementada como um datagrama ISO não orientado a conexão, contendo em seu cabeçalho as informações de endereço e nome do emissor, tempo do evento que disparou a mensagem GOOSE e o tempo esperado para a nova mensagem. Cada IED da rede de comunicação, ao receber essa mensagem *multicast*, deve determinar o emissor da mensagem e se o dado recebido é de seu interesse, conforme ilustra a Figura 80.

Figura 80 – A mensagem GOOSE para identificação do IED

Na Figura 80 somente os relés digitais 2 e 3 consideram a mensagem GOOSE, por ser de interesse para ambos. Assim, uma mensagem GOOSE enviada pode ser recebida e utilizada por diversos dispositivos da rede, ou apenas por um dos destinatários. A reação do receptor depende de sua configuração e funcionalidade.

Uma grande vantagem das mensagens GOOSE é permitirem a interligação entre dois ou mais IEDs através da rede, intercambiando mensagens com alta velocidade e substituindo as diversas ligações por meio de fios metálicos, pela rede local de comunicação.

5.8.2.1 Seleção de endereço *multicast*

A fim de aumentar o desempenho de recepção das mensagens *multicast* (por exemplo, GOOSE, GSSE e valores amostrados) é preferível realizar uma filtragem pelo endereço MAC.

Os endereços *multicast* utilizados pelo padrão IEC-61850 têm a seguinte estrutura:

- Os três primeiros octetos são atribuídos pelo IEEE com: 01-0C-CD;
- O quarto octeto será 01 para mensagens GOOSE, 02 para mensagens GSSE, e 04 para *multicast* de valores amostrais (SV);
- Os últimos dois octetos devem ser utilizados como endereços individuais atribuídos pelo intervalo definido na Tabela 26.

Tabela 26 – Exemplo de endereço *multicast* recomendado

Serviço	Recomendação da gama de endereços a serem distribuídos	
	Início do endereço (Hexadecimal)	Fim do endereço (Hexadecimal)
GOOSE	01-0C-CD-01-00-00	01-0C-CD-01-01-FF
GSSE	01-0C-CD-02-00-00	01-0C-CD-02-01-FF
SV	01-0C-CD-04-00-00	01-0C-CD-04-01-FF

5.9 Merging Unit

A Figura 81 ilustra o conceito básico de uso de uma MU (*Merging Unit*) no barramento de processos, descrito na parte 9 do padrão IEC-61850. De acordo com Mackiewicz [29], os sinais provenientes de fontes de tensão e corrente, tais como, TP e TC, e as informações de estado, por exemplo, sinais de entrada binários, são conduzidas para a unidade de interface da MU. Esta unidade faz a amostragem dos sinais mediante uma taxa predeterminada e disponibiliza os dados para outros IEDs, que podem objetivar como exemplo, o controle de

um *bay* ou proteção de uma linha de transmissão, atividades inerentes ao contexto de subestações.

Figura 81 – Exemplo de uma MU no barramento de processo
Fonte: [98]

As taxas de amostragem convencionadas atualmente são de 80 amostras por ciclo, para monitoração e proteção, e de 256 amostras por ciclo, para qualidade de energia e oscilografias de alta resolução [38].

A comunicação adotada para as MUs é serial e *multidrop*, isto é, pode-se conectar em mais de um elemento na rede, além de ser *simplex* e ponto-a-ponto.

5.10 Sistema de Teste Baseado no IEC-61850

A parte 10 do padrão IEC-61850 [99] tem como objetivo assegurar que todos os seus modelos e serviços sejam executados corretamente, na busca por melhorar as possibilidades para a interoperabilidade entre os dispositivos do sistema de automação.

Conforme especificação de Paulino [36] um sistema de teste baseado no padrão IEC-61850 deve permitir um ensaio apropriado, adequado às exigências do sistema de supervisão, controle e proteção, e simular as características da subestação e do sistema elétrico em questão. Para tal, o sistema deve possuir as seguintes funções:

- Simulador de sinal analógico que proporcione mudanças dinâmicas nas grandezas analógicas através de suas saídas de correntes a tensões;
- Ensaios realizados através da reprodução de eventos reais ou gerados em *software* de simulação;
- Simulador de sinal digital que represente as mudanças do estado de disjuntores e quaisquer outros dispositivos que possam afetar o desempenho do relé em teste;
- Simulador de comunicação que gere mensagens GOOSE a fim de simular a operação de outros IEDs conectados à área de rede local;
- Analisador de mensagem GOOSE que monitore e registre o tempo das mensagens recebidas proveniente dos IEDs em teste a fim de avaliar a performance e resposta do relé;
- Ferramentas que permitam ao usuário configurar o dispositivo de teste para os requisitos dos IEDs testados, enviar mensagens GOOSE simuladas para múltiplos IEDs incluídos no sistema de supervisão, controle e proteção, e operar com alta velocidade;
- *Software* de teste que permita configurações flexíveis das seqüências de teste necessárias e simulações que utilizem as funções acima.

VI. Infra-Estrutura de Comunicação

LSEE

Fundado em 2000, o Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), da Universidade de São Paulo (USP), situado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), está atualmente (2009) sob a coordenação do Prof. Tit. Denis Vinicius Coury (Figura 82).

Figura 82 – Laboratório de sistemas de energia elétrica, LSEE, 2008

Trata-se de um laboratório de pesquisa que tem como objetivo estudar o desempenho dos sistemas elétricos de potência através de práticas laboratoriais e técnicas de simulação digital

no contexto da proteção digital de sistemas elétricos de potência e da qualidade da energia elétrica.

Para manter a atualização e excelência das pesquisas em proteção do sistema elétrico de potência, conforme tendência do setor de energia elétrica tornou-se necessário elaborar ao longo de 2006, um projeto para interconexão de IEDs sob uma rede de comunicação de dados, *Intranet*, para troca de informações através do padrão IEC-61850.

6.1 Processo de Implantação da Rede de Comunicação

As ações destinadas a reunir os elementos e dispositivos, ou qualquer objeto complexo, de modo que possa funcionar ou preencher o fim a que se destina, como, a montagem de uma rede de comunicação para determinada subestação, demanda experiência e critérios que devem ser seguidos.

O processo de implantação de uma rede de comunicação de dados e computadores pode ser dividido em quatro fases [55]:

- Planejamento: deve ser feito sob perspectiva do usuário. Neste momento, são levantadas todas as necessidades do usuário e o que a rede de comunicação de dados deve cumprir;
- Projeto: são preparados os esquemas físicos e lógicos da rede que será montada. No projeto, as principais preocupações devem ser criar uma rede confiável e determinar pontos nos quais possam ocorrer falhas;
- Implementação: é realizado o projeto físico, em que a rede é montada com *hardwares* e *softwares* específicos. Além disso, a rede deve passar por testes para verificação de conformidades com os requisitos iniciais;
- Ajustes: fase em que são corrigidas pequenas falhas na criação da rede.

6.1.1 Planejamento da Rede de Comunicação de Dados

Diante dos muitos impactos e benefícios vislumbrados pelo padrão IEC-61850, no que tange ao uso comum da infra-estrutura de comunicação, em plataforma *Ethernet*, e o intercâmbio de *hardware* e dados independente do fabricante, fez-se necessário implementar no LSEE, uma rede de comunicação de dados e computadores, *Intranet*, possibilitando experimentações, análises, medições e avaliações da intercambialidade e interoperabilidade entre equipamentos de supervisão, controle e proteção, nos níveis de processo e *bay*.

Neste contexto, a rede de comunicação de dados deve cumprir as necessidades mencionadas através de aplicações utilizadas no controle e proteção do sistema elétrico, e, por conseguinte, a interligação de relés digitais de proteção, simuladores do sistema de potência (caixa de teste), microcomputadores padrão IBM PC, conversores de mídia, relógio GPS (*Global Positioning System*) e demais dispositivos do SEP com capacidade de comunicação, seja numa subestação local ou na interligação de duas subestações.

Com esta perspectiva, realizou-se inicialmente o levantamento dos dados, os quais serviram de fundamento para a elaboração do sistema de telecomunicações, que é sustentado pelo cabeamento estruturado.

Como é um sistema de telecomunicações, isto é, composto por vários nós, dimensionou-se o tipo de tráfego entre os nós principais da rede, conforme mostra a Figura 83.

Figura 83 – Sistema básico e o tipo de tráfego planejado

Considerando o sistema básico mostrado na (Figura 83), adotou-se o nó A, subestação 1, com as seguintes características:

- Tráfego de voz para a rede pública = 1 tronco ou ramal;
- Tráfego de dados para o Nó B = 1 canal de dados.

Por sua vez, o nó B, subestação 2, é caracterizado por:

- Tráfego de voz para a rede pública = 1 tronco ou ramal;
- Tráfego de dados para o Nó A = 1 canal de dados.

Com esta topologia sistêmica, deduziu-se que, em cada subestação, haveria uma rede local de computadores, LAN, com os equipamentos de supervisão, controle e proteção, e uma rede telefônica, composta de troncos e ramais.

O enlace que interliga os nós da rede pode ser de propriedade da concessionária de energia elétrica ou alugada de terceiros. Conforme Capítulo III, este enlace pode ser via fibra óptica, rádio ou cabo de pares metálicos, dependendo da distância entre os nós, da ausência

de obstáculos para propagação do sinal e disponibilidade das facilidades de instalação. No caso do LSEE foram planejados os seguintes enlaces para comunicação de dados:

- Linha discada;
- Linha dedicada (LPCD); e
- Cabo de fibra óptica.

A linha discada e dedicada foram propostas para testes específicos no ambiente laboratorial (descritos na subseção 7.1.4), porém, o enlace 1 da Figura 83, explicita a utilização de fibra óptica interligando de forma simulada duas subestações, distantes 20 km uma da outra.

6.1.2 Projeto da Rede de Comunicação

O projeto de rede é um roteiro com a descrição de cada subsistema de uma rede estruturada, com a intenção de dar unidade à obra que será executada, segurança e a determinação exigida pelo investimento [69].

Serão enumeradas algumas fases que compõem a sua especificação, as quais se completam e se inter-relacionam.

6.1.2.1 Levantamento de demanda

É nesse momento que se determina, junto ao cliente, a extensão ou o limite da rede. Ou seja, quais os sinais que serão integrados no ambiente da subestação, quais áreas serão envolvidas no processo e quais recursos deseja-se disponibilizar a cada setor.

Executou-se então o levantamento de pontos de telecomunicações envolvidos para atender às perspectivas do planejamento. De acordo com a demanda para cada um dos tipos de tráfego envolvido, determinou-se a sua localização e quantidade, conforme Tabela 27.

Tabela 27 – Demanda de pontos

Nó	Ambiente	Pontos de Voz	Pontos de Dados
A	1	1	6
B	2	1	9
	3	0	6

Os ambientes de cada nó, ou subestação, são representados por *racks* instalados dentro do LSEE. Neste espaço laboratorial, o Ambiente 3 deverá propiciar para os Ambientes 1 e 2 o

subsistema *backbone*, que dentro do cabeamento estruturado, tem a função de interligar os vários *racks* de comunicação (Figura 84).

É primordial um levantamento adequado da densidade de pontos para atender as necessidades atuais e futuras da rede, na intenção de possibilitar uma vida útil mínima ao projeto, na faixa de cinco a dez anos, sem necessitar de alterações que exijam, por exemplo, a passagem de mais cabos pelos dutos, aumento do painel de distribuição ou dos pontos de voz e dados.

Figura 84 – Distribuição dos ambientes: Nó A, Nó B e *backbone*, LSEE

Num ambiente laboratorial esta faixa pode diminuir no que diz respeito à expansão da rede, pois o volume e diversidade das pesquisas, e principalmente, emissão de recursos ou doações de equipamentos, torna este ato necessário, diferenciando-o do ambiente empresarial e industrial.

A porção do projeto relativa ao cabeamento estruturado da subestação é desvinculada do *hardware*, como, por exemplo, os relés de proteção. Mas é de extrema importância conhecer todas as aplicações que serão integradas, pois a descrição de como serão organizados: a sala de equipamentos, os armários de telecomunicações, os *racks*, e o *backbone*, depende essencialmente deste conhecimento.

Com o objetivo de subtrair informações precisas em torno das intenções com o cabeamento algumas perguntas tradicionais devem ser feitas, conforme exemplifica a Tabela

28. Segundo Soares Neto *et al* [69] estes questionamentos formam uma pequena lista de pontos que devem ser realçados nessa fase do projeto, pois é neste momento que são conhecidos os anseios, as dificuldades e as intenções do usuário.

Tabela 28 – Algumas perguntas tradicionais durante o levantamento de demanda da rede

Lista de Pontos	Resposta para o LSEE
Existe alguma rede implantada atualmente?	Sim. A rede de computadores que permite acesso a <i>Internet</i> e compartilhamento de dispositivos periféricos. Porém deve-se constituir uma nova rede para os testes em laboratório (<i>Intranet</i>).
Quais as aplicações pretendem-se integrar?	Aplicações envolvendo supervisão, controle e proteção do SEP no ambiente laboratorial, por exemplo: um controle de <i>bay</i> típico de saída de linha, dispondo de meios de comunicação de dados (linha discada, linha dedicada e rede <i>Ethernet</i>), e uma lógica para comutação entre fontes de alta tensão em uma subestação industrial.
Qual o número de funcionários existente na empresa?	O laboratório de equipamentos comporta 8 pessoas (estudantes, pesquisadores e professores).
O prédio da empresa está interligado a algum outro?	A rede de comunicação deve ser disposta em apenas uma sala (LSEE), porém o ambiente deve simular duas subestações distribuídas geograficamente, numa distância de 20 km, e conectadas por um enlace de fibra óptica.
Quais equipamentos existem na empresa para interligar em rede?	Relés de proteção digital, microcomputadores tipo IBM PC, simuladores do sistema elétrico de potência (caixa de teste), conversores de mídia e demais dispositivos do SEP com capacidade de comunicação.
Quais os tipos de mídia serão utilizados na rede local?	Cabo do tipo par trançado UTP Cat. 5e, cordões de fibra óptica em 850 nm, cordões de fibra óptica em 1.310 nm, cabo manga 10x26 AWG (<i>American Wire Gauge</i>), condutor de cobre com 2,5 mm ² , bobina em fibra óptica monomodo (1.310 nm) com 20 km de comprimento.

6.1.2.2 A configuração proposta, *lay-out* da rede

De acordo com o planejamento, este projeto incorpora a utilização de relés digitais de proteção de fabricantes distintos, e demais dispositivos do SEP com capacidade de comunicação, simulando duas subestações distribuídas geograficamente. A partir desta proposta foi possível confeccionar o primeiro documento do projeto, o *lay-out* da rede, conforme ilustra a Figura 85.

Figura 85 – Lay-out resumido da rede de comunicação de dados, LSEE

Embora o *layout* não seja um documento obrigatório segundo a norma NBR-14565 – Procedimento básico para elaboração de projetos de cabeamento de telecomunicações para rede interna estruturada [100], ajuda na identificação dos equipamentos ativos e passivos da rede, conforme sintetiza a Tabela 29, para a estrutura laboratorial do LSEE.

Tabela 29 – Principais elementos constituintes da estrutura laboratorial, LSEE

Dispositivo	Ativo(1) Passivo(2)	Descrição
Armários de Telecomunicações <i>Racks 19"</i> (fechado)	2	O Nó A da rede foi contemplado por um <i>rack</i> , Ambiente 1, para instalação dos relés de proteção digital e demais dispositivos relativos à Subestação 1. De forma análoga, o Nó B da rede foi contemplado por um <i>rack</i> , Ambiente 2, para instalação dos dispositivos relativos à Subestação 2. O <i>rack</i> destinado ao Ambiente 3 considerou a instalação dos demais dispositivos, como, por exemplo: microcomputadores tipo IBM PC, simuladores do sistema elétrico de potência (caixa de teste), conversores de mídia, relógio GPS, processador de comunicação, <i>patch-panel</i> (painel de distribuição fixo para cabeamento de rede), <i>switches</i> , bobina de fibra óptica com 20 km e demais dispositivos do SEP
Relés digitais de proteção	1	Relés digitais de proteção de diversos fabricantes e filosofias de proteção, com capacidade de controle e comunicação
<i>Switches</i> gerenciáveis	1	Placa <i>Ethernet</i> 10 Mbps e <i>Fast Ethernet</i> 100 Mbps
		Conectores de cabo par trançado
		RJ-45
		Conectores de fibra multimodo
		Porta de fibra, tipo ST (<i>twist-lock</i>): fibra multimodo, 10 Mbps, 10Base-FL Porta de fibra, tipo ST (<i>twist-lock</i>): fibra multimodo, 100 Mbps, 100Base-FX
		Padrões de rede
		<i>Ethernet</i> v1.0/v2.0 IEEE 802.3: <i>10Base-T</i> IEEE 802.3u: <i>100Base-TX</i> , <i>100Base-FX</i> IEEE 802.1p: <i>Priority protocol</i> IEEE 802.1d: <i>Spanning tree protocol</i> IEEE 802.1q: <i>VLAN tagging</i> IEEE 802.3x: <i>Flow control</i>
Conversores de Mídia	1	Conversor de fibra óptica multimodo para monomodo
Conversores de Mídia	1	Conversor de interface EIA-485 para <i>Ethernet</i>
Microcomputador tipo IBM PC	1	Microcomputadores do tipo IBM PC com placa de rede <i>Ethernet</i> 100 Mbps, interface RJ-45
Simulador do sistema de potência	1	Simulador de sistemas de potência (caixa de teste) hexafásico, com canais de corrente, tensão e placa de rede <i>Ethernet</i>
Relógio GPS	1	Sincronismo de tempo dos equipamentos da rede através de sinal IRIG-B, garantindo precisão de $\pm 10 \mu s$ nas estampas de tempo das oscilografias
Cordões em fibra óptica	2	Cordões de fibra óptica em 850 nm Cordões de fibra óptica em 1.310 nm

Bobina em fibra óptica	2	Bobina em fibra óptica monomodo (1.310 nm) com 20 km de comprimento
Cabo Metálico	2	Cabo do tipo par trançado UTP Cat. 5e Cabo manga 10x26 AWG e 10x26 mm ² Condutor de cobre com 2,5 mm ²
<i>No-break</i>	2	Alimentação auxiliar alternada (127 Vac)
Materiais de consumo e ferramental	2	Materiais e ferramentais diversos para compor e instalar a estrutura de comunicação de dados e redes de computadores proposta

Os componentes da rede laboratorial são os mesmos encontrados em subestações reais de energia elétrica, sendo sua montagem e configuração similares ao que de fato se encontra em campo. Cabe dizer, também, que as demandas exigidas sejam em desempenho ou aplicação, devem ser moldadas a partir de necessidades reais, e caso necessário, reajustarem o projeto da rede.

6.1.2.3 Escolha da solução de cabeamento estruturado

Duas linhas de tecnologia permeiam pelo mundo do cabeamento e direcionam as soluções de tecnologia existentes. Essas linhas se baseiam nos sistemas BCS (*Building Cabling System*) e IBCS (*Integrated Building Cabling System*) [69].

A linha BCS, Sistema de Construção de Cabeamento, anuncia os atributos essenciais e específicos do padrão de solução americano, que ostenta como característica básica o uso de *patch panels* ou painéis de distribuição fixos, montados em *racks* ou armários com largura padrão de 19 polegadas.

Em correspondência, a linha IBCS ou Sistema de Construção de Cabeamento Integrado, padrão de solução europeu, possui como característica básica a possibilidade de individualizar cada par de um cabo, o que propicia a injeção de sinal par a par.

Soares Neto *et al* [69] descreve que na ocorrência de transmissão de um sinal analógico, advindo, por exemplo, de um equipamento PABX (*Private Automatic Branch Exchange*), também analógico, juntamente com o sinal digital de um concentrador *Fast-Ethernet*, podem ocorrer falhas devido ao ruído que o sinal analógico pode embutir no cabo. Para evitar esta ocorrência nas aplicações a serem desenvolvidas no LSEE, optou-se pela solução BCS.

As principais partes do sistema de cabeamento estruturado do LSEE podem ser vislumbradas na Figura 86.

Figura 86 – Estrutura do cabeamento estruturado da rede, LSEE

Fonte: [101]

A Figura 86 representa o imóvel onde o LSEE está alojado, neste caso, o departamento de engenharia elétrica, onde:

- SET, Sala de Entrada de Telecomunicações: indica o ponto de acesso externo, via um enlace de comunicação de dados;
- SEQ, Sala de Equipamentos: onde os equipamentos de telecomunicações e comunicação em rede, ativos ou passivos, serão instalados (o próprio LSEE);
- AT, Armário de Telecomunicações: armários, ou *racks*, onde os equipamentos padronizados em 19 polegadas e eventualmente montados em bandejas serão instalados;
- PT, Ponto de Telecomunicações: representa os pontos de conexão das estações de trabalho (neste caso, computadores do tipo IBM PC).

O documento obrigatório que mostra de forma simplificada os pavimentos do imóvel com as localizações dos armários de telecomunicações, com base na descrição anterior, é o Diagrama Unifilar de Tipo 1 (Figura 87).

Percebe-se no diagrama unifilar um esquema simplificado do cabeamento da rede: os cabos no ambiente da SEQ conectam os ATs, e estes atuam como distribuidores, conectando os dispositivos da rede. Cabe mencionar que existem outros diagramas unifilares que propiciam informações não oferecidas na Figura 87, como, por exemplo:

- A quantidade de cabos;
- A identificação dos cabos; e
- A presença de linhas de aterramento.

Figura 87 – Diagrama unifilar tipo 1, LSEE

6.1.2.4 Ocupação dos armários de telecomunicações e planta da SEQ

Todos os armários de telecomunicações, *racks*, necessitam de um documento denominado ocupação dos armários de telecomunicações, similar ao que aparece na Figura 88.

Figura 88 – Ocupação dos armários de telecomunicações, LSEE

Todos os equipamentos descritos na fase de levantamento das demandas (subseção 6.1.2.1) e *lay-out* da rede (Tabela 29) estão descritos na ocupação dos armários de telecomunicações (AT01, AT02 e AT03) do LSEE (Figura 88).

Todos os dispositivos seguem como referência de tamanho a unidade de altura (U). Devem-se consultar os manuais técnicos dos equipamentos ativos na rede, para explicitar de forma coerente a quantidade de equipamentos por armário de telecomunicações, além da melhor disposição física (conforme o tamanho em Us).

De posse de todas as aspirações e desejos relativos à rede de comunicação das subestações, foram considerados os detalhes que esboçam os pontos de telecomunicações na planta da sala de equipamentos, conforme mostra a Figura 89.

Figura 89 – Esboço da planta da sala de equipamentos, LSEE

6.1.2.5 Quantidade de materiais

Nesta fase do projeto deve-se preparar a lista de material necessária à implantação da infra-estrutura de comunicação, relacionando todos os itens imprescindíveis para executar a instalação de elementos ativos e passivos da rede.

“Em toda instalação, para criar a lista de materiais, é necessário, a priori, conhecer o projeto, de forma que os produtos quantificados estejam conforme as exigências explicitadas no mesmo” [69]. A Tabela 30 descreve de forma resumida a lista de materiais do LSEE.

Tabela 30 – Quantificação resumida de materiais, projeto de rede LSEE

Dispositivo	Quantidade
Armários de Telecomunicações (<i>racks</i> 19", fechado)	3
Relés digitais de proteção	10
<i>Switches</i> gerenciáveis	2
Conversores de Mídia (fibra óptica: multimodo/monomodo)	2
Conversores de Mídia (RS-485/ <i>Ethernet</i>)	1
Microcomputador tipo IBM PC	3
Simulador do sistema de potência	2
Relógio GPS	1
Cordões em fibra óptica	10
Bobina em fibra óptica	2
Cabo Metálico (bobina por tipo de cabo)	1
<i>No-break</i>	1
Materiais de consumo e ferramental	-
<i>Software</i> para configuração e controle (por dispositivos ativo)	1

6.1.3 Implementação do Projeto

As fases de planejamento e projeto da infra-estrutura de comunicação do LSEE ocorreram entre 2006 e 2007, originadas de uma estrutura composta por um relé de proteção digital e um simulador do sistema de potência (caixa de teste), conforme Figura 90.

Figura 90 – Ambiente LSEE, 1º semestre/2006

Com o findar dos passos precedentes, o processo de estruturação da rede de comunicação de dados passou para a fase de implementação, ou seja, a realização física e lógica da infra-estrutura proposta, a montagem com *hardwares* e *softwares* específicos.

As instalações físicas e lógicas da infra-estrutura de comunicação de dados, *Intranet*, ocorreram entre 2007 e 2008, conforme ilustra a Figura 91.

Figura 91 – Fases de implantação da infra-estrutura de comunicação, LSEE, 2007/2008

Para a instalação do cabeamento estruturado, foi necessário especificar:

- Os tubos para proteção mecânica dos cabos;
- Os tipos de cabos de pares metálicos;
- Os cordões de fibra óptica;
- A bobina de fibra óptica;
- Os padrões utilizados para conectorização (EIA/TIA 568A ou EIA/TIA 568B);
- O roteamento dos cabos pelos armários de telecomunicações (*racks*);
- A conectorização dos cabos e painéis.

A certeza de um cabeamento confiável passa pelos produtos de qualidade e uma instalação cuidadosa, com base no projeto de rede, conforme ilustra a Figura 92.

Figura 92 – Instalação do cabeamento (cordões de fibra óptica e cabos UTP), LSEE

6.1.3.1 Identificação física e lógica

A identificação é a alma da organização, e a base da informação que proporciona o relacionamento entre todos os componentes instalados. Para o cabeamento uma identificação através de etiquetas pode ser formada por caracteres específicos com os seguintes significados [102]:

PT XX XXX

Onde:

- PT é o ponto de telecomunicações;
- XX representa o pavimento do PT;
- XXX indica o seqüencial do PT.

Outros campos de identificação podem ser utilizados, como [103]: número da porta do dispositivo; posição no distribuidor/painel de distribuição (*patch panel*); e informações do dispositivo.

O formato da identificação dos cabos metálicos e cordões de fibra óptica do LSEE foram desenvolvidos com base no exemplo descrito pela Figura 93, representativo de cinco possíveis pontos de identificação, entre um relé de proteção digital e um *switch*.

Figura 93 – Exemplos de pontos possíveis de identificação no cabeamento do LSEE

Descrição dos pontos de identificação:

1. Ponto de conexão com o relé digital de proteção: PT A B C D E

Onde:

PT, ponto de telecomunicações;

A, seqüencial do *patch panel* (posição de origem);

B, o armário de telecomunicações (AT) onde o cabo ou cordão será conectado;

C, seqüencial do dispositivo onde o cabo ou cordão será conectado;

D, seqüencial do fabricante;

E, porta do dispositivo onde o cabo ou cordão será conectado.

2. Ponto de conexão traseiro do *patch panel* (ponto opcional): AT A B C D

Onde:

AT, armário de telecomunicações (posição de origem);

A, seqüencial do dispositivo onde o cabo ou cordão está conectado;

B, seqüencial do fabricante;

C, porta do dispositivo onde o cabo ou cordão está conectado.

D, seqüencial do *patch panel* (posição de destino).

3. Seqüencial da posição de uso do *patch panel*: PP

4. Ponto de conexão frontal do *patch panel*: AT A B C D

Onde:

AT, armário de telecomunicações (posição de origem);

A, seqüencial do dispositivo onde o cabo ou cordão está conectado;

B, seqüencial do fabricante;

C, porta do dispositivo onde o cabo ou cordão está conectado.

D, seqüencial do *patch panel* (posição de destino).

5. Ponto de conexão com o *switch*: A B C D E

Onde:

A, seqüencial do *patch panel* (posição de origem);

B, o armário de telecomunicações (AT) onde o cabo ou cordão será conectado;

C, seqüencial do dispositivo onde o cabo ou cordão será conectado;

D, seqüencial do fabricante;

E, porta do dispositivo onde o cabo ou cordão será conectado.

Para facilitar o entendimento dos dados de identificação a Tabela 31 serve como orientação das conexões a serem executadas.

Tabela 31 – Tabela de orientação dos cabos e cordões

Dispositivo	Ponto	Identificação Local	Ponto	Identificação Remota
Relé de Proteção Digital 01	1	PT 03 01 01 01 01	2	03 01 01 01 03
<i>Switch 01</i>	5	03 01 02 01 01	4	01 03 01 02 01

Considerando o relé de proteção digital 01, ponto 1 (PT A B C D E), identificação local, pode-se descrever:

- PT, ponto de telecomunicações;
- 03 (A), seqüencial do *patch panel* (posição de origem);
- 01 (B), o armário de telecomunicações (AT) onde o cabo ou cordão será conectado;
- 01 (C), seqüencial do dispositivo onde o cabo ou cordão será conectado;
- 01 (D), seqüencial do fabricante do relé digital de proteção 01;
- 01 (E), porta do dispositivo onde o cabo ou cordão será conectado, neste caso o relé digital de proteção 01.

Além da identificação física, o administrador do sistema de comunicação deve possuir um documento com os pontos lógicos da rede. No LSEE o protocolo de identificação lógica dos dispositivos é o IP (subseção 4.4.2), e a formatação segue conforme a Figura 94.

Figura 94 – Exemplo da identificação lógica da rede, LSEE

6.1.3.2 Fase de testes do cabeamento

Segundo Marin [103] o cabeamento em cobre ou óptico, deve ser verificado adequadamente antes da entrega aos seus usuários finais, tomando como referência normas aplicáveis a cada parâmetro elétrico cuja verificação é requerida.

Atualmente, são utilizadas várias técnicas para testar e avaliar o funcionamento de uma rede estruturada. Neste ínterim, o cabeamento em cobre da rede estabelecida para o LSEE passou pelos seguintes testes físicos:

- Inversão de pares;
- Cabo ou pares rompidos;
- Pares mal conectados;
- Pares em curto circuito.

Os testes físicos foram executados por meio do equipamento denominado *Cable Tester*, conforme mostra a Figura 95. Todos os testes obtiveram êxito.

Figura 95 – *Cable Tester* NS-468, LSEE

Cabe ressaltar que este equipamento não informa se a rede trafega dentro dos limites de frequência da categoria 5e (subseção 4.1.3.2) escolhida para instalação no LSEE, quanto o sinal está sendo atenuado, ou qual a interferência que um par gera em outro. Estes parâmetros são obrigatórios em caso de certificação da rede.

O cabeamento óptico foi adquirido com certificação de qualidade, no que tange a testes como, por exemplo, a perda de inserção (atenuação) do conector. No LSEE foram executadas novas medições da atenuação nos cordões e na bobina de fibra óptica instalada, conforme a norma americana ANSI/TIA/EIA-568-B, e utilização de um analisador de espectro óptico. A Figura 96 explicita os pontos de medição para um dos testes executados.

Figura 96 – Medição de perda de potência óptica (analisador de espectro: Anritsu MS9710A)

Inicialmente o analisador de espectro foi utilizado para medir a potência do sinal óptico de transmissão do relé digital 01, ponto 1 (Figura 96). O segundo ponto de análise foi após o cordão óptico interligando o *switch* 01 e o conversor multimodo/monomodo 01, ponto 2. O ponto de medição 3 foi após a bobina de fibra óptica com 20 km de extensão. Os resultados podem ser observados na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados das medições com o analisador de espectro

2

3

Percebe-se que entre a saída do sinal óptico do relé digital 01 e sua passagem pelo conversor de mídia 01, ponto de medição 2, o sinal foi atenuado em 3,17 dBm. Considerando que a potência de transmissão do conversor de mídia 01 é de -3 dBm, e que o sinal recebido pelo *switch* 02 conectado ao ponto de medição 3 foi de -28,97 dBm, vislumbra-se uma atenuação de 25,97 dBm entre o conversor de mídia 01 e o *switch* 02, transpondo a bobina de fibra, conectores e emendas associadas. Cabe ressaltar que os *switches* utilizados possuem sensibilidade para sinais até -31 dB.

6.1.3.3 Ativação da rede

Após a passagem por todas as etapas do projeto e implantação, a infra-estrutura de comunicação de dados e redes de computadores do LSEE ficou pronta para receber aplicações envolvendo o sistema elétrico de potência, conforme ilustra a Figura 97.

Figura 97 – Infra-estrutura de comunicação de dados e redes de computadores, LSEE, 2009

VII. Aplicações Desenvolvidas

Com o intuito de desenvolver aplicações focadas ao estudo da automação de subestações entre os níveis de processo e *bay*, nos quesitos de supervisão, controle, proteção e comunicação, apresenta-se neste capítulo um controle de *bay* típico de saída de linha, dispondo de meios de comunicação de dados, e uma lógica para comutação entre fontes de alta tensão em uma subestação industrial.

Estes casos oportunizam a realização de testes quanto à troca de informações adotando o padrão IEC-61850 como protocolo de comunicação, e a rede *Ethernet* em substituição à fiação paralela, freqüentemente utilizada como canal de comunicação, além da intercambialidade entre IEDs de fabricantes distintos, neste estudo relés digitais comerciais

Numa relação minuciosa com os itens supracitados nos objetivos específicos, busca-se também, avaliar neste capítulo, o comportamento no tempo de mensagens do tipo GOOSE, em condições distintas de tráfego e de configuração da topologia lógica da rede de comunicação, e o monitorar de um possível extravio entre as mensagens geradas por um emissor e aquelas recebidas por um ou mais destinatários. De forma complementar, o caso possibilita avaliar a premissa de interoperabilidade na troca de informações entre IEDs de fabricantes distintos, descrita como um dos objetivos do padrão IEC-61850.

Em todas as aplicações é utilizada uma metodologia para especificar a automação das lógicas discretas mediante emprego do padrão IEC-61850, caracterizando os conceitos descritos no Capítulo V, por exemplo, a especificação funcional das aplicações segundo o padrão IEC-61850, o mapeamento das informações enviadas e recebidas, a definição do tipo de LN utilizado, a configuração do serviço de mensagens GOOSE, a atribuição da estrutura de dados de cada LN aos pontos pertinentes dentro das lógicas preestabelecidas e, a avaliação das ações de controle, supervisão e intertravamentos.

7.1 Lógica para Controle de *Bay* Dispondo de Enlaces para Comunicação de Dados

Um *bay* pode ser composto por equipamentos para manobra, medição, controle e proteção, associados a uma determinada porção do SEP. Sua natureza pode ser diversa, como, por exemplo, *bay* de linha, de transformação e de acoplamento. Este termo é aplicado com maior frequência ao pátio de equipamentos das subestações (Figura 98).

Figura 98 – Exemplo de *bay* – Pátio de 138 kV em subestação industrial
Fonte: [104]

Historicamente o controle do *bay* é realizado pelo emprego de elementos físicos como contadores, temporizadores, botoeiras, lâmpadas de sinalização e demais elementos dispostos em painéis. Modernamente os CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) são utilizados como alternativa às desejadas funções de controle, por sua capacidade de executar funções como operações lógicas, seqüencialização, temporização, computação numérica, armazenamento de procedimentos para controle e, atualmente, controle em rede.

Como fato, tem-se que os relés digitais possuem grande potencial para resolver alguns dos problemas intrínsecos ao SEP, seja do ponto de vista das funções de medição, supervisão, controle, análise de eventos, proteção e comunicação. Contudo, em decorrência de uma visão do uso destes equipamentos às específicas e restritas funções quando da sua aquisição, estes muitas das vezes permanecem subutilizados.

Uma das vantagens associadas à utilização da característica multifunção dos relés digitais está em seu potencial de simplificar a arquitetura dos painéis que compõem as instalações de potência, diminuindo os tempos de construção, comissionamento e manutenção, além de agregar maior confiabilidade e flexibilidade ao controle (Figura 99).

Figura 99 – Migrar do controle convencional para controle por relés digitais
Fonte: [104]

Na busca por minimizar estas constatações e, como meio alternativo ao uso dos CLPs, a presente aplicação explicita, pelo emprego de relés comerciais, o desenvolvimento e implementação de uma lógica para controle, supervisão e intertravamento de *bay* para uma configuração com barra simples, disjuntor, chaves seccionadoras de linha e chave seccionadora de terra, vindo a caracterizar ações por comando local ou remoto, quando da possibilidade de utilização de certos enlaces de comunicação de dados.

7.1.1 Topologia física e operação do *bay*

A topologia física constitui-se de um *bay* formado por um disjuntor (DJ-1), duas chaves seccionadoras de linha (CS-1 e CS-2) e uma chave seccionadora de aterramento (CST-1), conforme Figura 100.

Figura 100 – *Bay* em estudo

Conhecido o objeto em estudo, passou-se a caracterizá-lo do ponto de vista de manobra. A preocupação neste ponto é a de conhecer como, em campo, os intertravamentos são compostos. Segundo Miyagi [105], intertravamentos são condições restritivas como a habilitação ou inibição de operação ou funcionamento de um equipamento. Todavia, de modo mais consistente, podem ser considerados como funções que não permitem qualquer tipo de mudança de estado ou de ação até que outros estados ou ações estejam completados.

Existem, em princípio, os seguintes tipos de intertravamento [105]:

- Intertravamento de partida: condições que devem ser satisfeitas no instante de inicialização de um equipamento e que não são consideradas durante o estado de funcionamento;
- Intertravamento de funcionamento: condições que devem ser satisfeitas não somente na inicialização, mas também durante o funcionamento;
- Intertravamentos temporizados: determina-se um intervalo de tempo entre o funcionamento de cada equipamento;
- Intertravamentos de não simultaneidade: evita que certos estados ocorram simultaneamente em diversos equipamentos;
- Intertravamento de seqüência: estabelece as condições de habilitação ou inibição de ações entre os equipamentos interligados em série;
- Intertravamento de processo: realiza a evolução de estados através da ocorrência de eventos, isto é, estabelece as condições de inibição ou habilitação para a transição de estados.

No contexto da aplicação, os intertravamentos são interconexões elétricas e lógicas entre os equipamentos de uma subestação, com a finalidade de estabelecer ações de comando permissíveis. De forma resumida pode-se dizer que:

- A chave de aterramento CST-1 só pode ser fechada com o disjuntor DJ-1 aberto e, ambas as chaves seccionadoras CS-1 e CS-2 de linha abertas;
- As chaves CS-1 e CS-2 só podem ser abertas com o disjuntor DJ-1 aberto;
- As chaves CS-1 e CS-2 só podem ser fechadas com a chave de aterramento CST-1 aberta;
- O disjuntor DJ-1 só pode ser fechado com as chaves seccionadoras de linha CS-1 e CS-2 fechadas;
- Os estados dos demais equipamentos do *bay* não possuem qualquer influência sobre a abertura do disjuntor. A proteção é majoritária nesse quesito.

Além dos intertravamentos foi estabelecida a seqüência de manobras para energização e deserenergização total, resumidas da seguinte maneira:

- Energização total: abrir CST-1, fechar CS-2, fechar CS-1, fechar DJ-1, entregar o *bay* para operação;
- Deserenergização total: abrir DJ-1, abrir CS-1, abrir CS-2, fechar CST-1, entregar o *bay* para manutenção.

Para o caso em estudo, é inicialmente proposta a montagem ilustrada na Figura 101, que se assemelha ao que é feito em uma instalação real.

Figura 101 – Montagem inicial do ensaio

7.1.2 Programação de Controle e Supervisão Desenvolvida

Com base nas manobras evidenciadas em campo para o *bay* em estudo, seus intertravamentos entre disjuntor, seccionadoras de linha e aterramento foram compostas as lógicas pertinentes ao controle e supervisão. Para isso, foram utilizados elementos dos sistemas digitais já agregados aos relés como, por exemplo, portas *and*, *or* e *not*, *flip-flops* e temporizadores.

A lógica advinda dos sistemas digitais para comando de fechamento do disjuntor, DJ-1, conforme Figura 102, foi implementada considerando as chaves seccionadoras de linha, CS-1 e CS-2, fechadas (nível lógico 1). Por sua vez, a chave seccionadora de terra, CST-1, deve estar aberta (nível lógico 0), conforme lógica descrita posteriormente.

Figura 102 – Lógica de comando, intertravamento e supervisão para o disjuntor DJ-1

Considerando a lógica desenvolvida para DJ-1, pode-se descrever:

- O *Timer 1*, inicialmente recebendo nível lógico 0 do botão PB-1, mantém sua saída, que está conectada na entrada da porta *not-1*, também em 0;
- O *Timer 2*, recebendo nível lógico 1 da porta *not-1*, mantém sua saída também em 1. Esta por sua vez, está conectada à porta *and-1*, e aguarda um acionamento local, PB-1, ou remoto pelo bloco de Telecomando (porta *or-1*);
- Com o intuito de garantir uma operação local, via uma IHM eficaz e à prova de ações intempestivas, foi inserida uma condição de segurança, a qual prevê que o operador precisa pressionar o botão de controle PB-1 por 3 segundos, conforme configuração dos tempos de PU (*pickup timer* = 3 segundos) e DO (*dropout timer* = 0 segundos);
- Quando o botão PB-1 for pressionado durante 3 segundos, acionando o *Timer 1*, este levará a entrada do *Timer 2* para nível lógico 0. Porém, devido à configuração dos tempos de PU (0 segundos) e DO (1 segundo), tem-se nas duas entradas da porta *and-1*, nível lógico 1, durante um segundo;
- Na opção de comando remoto, o acionamento é executado de forma imediata pelas portas *or-1* e *and-1*;
- O valor de saída da porta *and-1* é inserido nas portas *and-2* e *and-3*, cujas saídas são enviadas para as bobinas de fechamento (BF) e abertura (BA) do DJ-1;
- A porta *and-2* possui como entrada outras variáveis, como o estado das chaves seccionadoras de linha (CS-1 e CS-2), através da porta *and-4*, e do DJ-1, aberto, pelo *Timer 3*;

- A porta *and-4*, no fechamento do DJ-1, necessita que suas entradas estejam em nível lógico 1, CS-1 e CS-2 (fechadas), conforme intertravamento já descrito;
- A lógica elaborada contempla também o comprimento do pulso aplicado às bobinas de fechamento (BF), *Timer 3*, e abertura (BA) do disjuntor, *Timer 4*, sendo definido pelo programador no momento de criação da lógica. Nesta aplicação, foi considerado um comprimento de pulso igual a 1 segundo (PU, 1 segundo, e DO, 0 segundo);
- Percebe-se que foi definida outra característica de comportamento para o botão de controle, que é ser capaz de executar ambos os comandos, ligar e desligar o disjuntor, fazendo uso eficiente dos botões disponíveis no relé digital;
- A manobra de abertura do DJ-1 é executada por um novo pressionar de PB-1;
- Neste segundo momento, PB-1 garantirá nível lógico 1 para porta *and-3*, junto à variável advinda do estado fechado do DJ-1, via *Timer 4*;
- O estado do disjuntor, aberto (*Led*, L1) ou fechado (*Led*, L2), também fora contemplado e monitorado na lógica desenvolvida. Além da função de sinalização, essa supervisão funciona como um circuito anti-bombeamento (*Timer 3* e *Timer 4*).

O comportamento global das lógicas de controle, supervisão e intertravamento para as chaves CS-1(Figura 103), CS-2 (Figura 104) e CST-1(Figura 105), é similar àquele desenvolvido para o controle e supervisão do disjuntor DJ-1. A sensibilidade da mudança está restrita às condições de intertravamento, as quais já foram descritas.

Figura 103 – Lógica de comando, intertravamento e supervisão para a chave CS-1

Figura 104 – Lógica de comando, intertravamento e supervisão para a chave CS-2

Figura 105 – Lógica de comando, intertravamento e supervisão para a chave CST-1

7.1.3 Arranjo do Ensaio

Para o caso em estudo foi proposta a montagem ilustrada na Figura 106, composta por um simulador de sistemas de potência, com a propriedade de fornecer fonte de alimentação contínua e dois relés digitais.

Figura 106 – Arranjo do ensaio – Controle de bay

Um relé digital será responsável por toda lógica de controle, intertravamentos e supervisão necessárias ao bay. Como esta aplicação foi desenvolvida em um ambiente laboratorial, os equipamentos de pátio, disjuntor e chaves seccionadoras, não estavam disponíveis para receber os comandos de abertura e fechamento, fornecendo informações para supervisão. A solução encontrada foi utilizar um segundo relé digital para simular os equipamentos do bay em estudo, demandando capacidade de comunicação e programação.

Com o conhecimento sobre o comportamento biestável e da forma pelas quais os equipamentos a serem manobrados (disjuntor e chaves seccionadoras) fornecem indicação a respeito do seu estado atual (aberto ou fechado) pode-se compor a programação de simulação dos mesmos, a qual está exemplificada a seguir para o disjuntor DJ-1 (Figura 107).

Figura 107 – Programação para o simulador de equipamentos biestáveis (DJ-1)

Caso o disjuntor, DJ-1, receba comando para fechar, a Entrada-1 do *flip-flop* recebe nível lógico 1, levando a saída Q também para 1, e conseqüentemente acendendo os *Leds*, L2 (DJ-1, fechado) e L4 (contato 52a, concordante).

Desta etapa, o foco passou a ser as conexões para a troca de informações entre o simulador de *bay* e o relé digital que possui as instruções de controle, intertravamento e supervisão, tornando toda a implementação verossímil. A Figura 108 ilustra as conexões elétricas realizadas utilizando condutores metálicos de cobre (classe de isolamento para baixa tensão).

Figura 108 – Conexões elétricas realizadas, sendo [] Saída Digital e () Entrada Digital

Como exemplo, a porta *and-2*, pertencente à lógica de comando do disjuntor (Figura 102), tem conexão via *software* (do relé digital) com sua saída em *hardware*, saída digital “[01]” (primeira linha de conexão da Figura 108). Quando esta é fechada (de acordo com o comando e permissão do intertravamento), a tensão nos bornes da caixa de teste (± 125 Vdc) é percebida pelos terminais da entrada digital “(01)”, referente ao simulador de *bay*, causando a indicação de fechamento do disjuntor de alta tensão.

7.1.4 Enlaces para Comunicação de Dados

As lógicas para comando de abertura e fechamento, além de executadas localmente pela IHM do relé digital, podem ser realizadas de forma remota através de enlaces de comunicação de dados.

Como os comandos das aplicações desenvolvidas não exigem execução em tempo real, ou seja, pode existir um atraso de tempo entre a requisição e a efetivação dos mesmos, em uma escala de segundos, as concessionárias de energia elétrica adotam entre suas instalações e centros de operação, enlaces típicos como a linha discada, a linha privativa de comunicação de dados (LPCD) e as redes *Ethernet*, via cabo metálico de par trançado ou fibra óptica. Cabe ressaltar que os dois primeiros enlaces supracitados não são ideais para filosofias de proteção que necessitem de tempos de resposta da ordem de microssegundos (μ s).

Inicialmente foi utilizado um acesso discado, via um par metálico da concessionária de telefonia, interligando dois equipamentos de comunicação de dados (ECDs, *modem*), num ritmo de transmissão assíncrono e velocidade de 9600 bps (Figura 109).

Figura 109 – Enlace para acesso remoto em linha discada

Os ECDs conectaram via interface digital, recomendação EIA-232, um microcomputador simulando o centro de operação do sistema elétrico, COS, e um processador de comunicação cujo papel é agregar os diversos equipamentos com possibilidade de comunicação serial, existentes na instalação do *bay* em estudo.

Cabe destacar que a topologia física utilizada no ensaio é inerente a infra-estrutura de comunicação de dados e redes descrita no Capítulo VI.

Como o uso da central telefônica, que pode ser caracterizada no ambiente laboratorial por um PABX, impõe um maior número de conexões físicas e seu manuseio constante por parte das equipes técnicas dentro do distribuidor geral (DG) da concessionária de telecomunicações, pode ocorrer com maior frequência a desconexão do sistema.

Visando minimizar estes problemas o enlace de dados discado foi substituído por uma LPCD. Apesar da utilização de armários, caixas de distribuição e DGs, como na linha discada, esta não transpassa pela central telefônica, além de utilizar identificações distintas que informam às equipes técnicas sobre a existência de um serviço especial, tornando-a menos susceptível aos problemas descritos anteriormente.

A configuração dos ECDs é similar, com a interligação de um ou dois pares metálicos, ritmo de transmissão assíncrono e velocidade de 9600 bps (Figura 110). O ritmo de transmissão, velocidade e interface digital podem ser alterados de acordo com os equipamentos disponíveis.

Figura 110 – Enlace para acesso remoto em linha dedicada

De acordo com as novas tecnologias de informação, a família *Ethernet* pode ser aplicada nas subestações como mídia capaz de interligar dispositivos eletrônicos, seja na transmissão de dados, voz ou imagem.

Tabela 33 – Manobras realizadas na IHM local e via enlaces de comunicação

Tipo de manobra	Recepção do comando	Resultado via IHM local	Resultado via linha discada	Resultado via LPCD	Resultado via rede local
Comando CS-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Comando CS-2	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Comando DJ-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Comando CST-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Intertravamento CST-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Intertravamento CS-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Intertravamento CS-2	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Intertravamento DJ-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Energização total	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Desenergização total	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito

Cada enlace mencionado possui características próprias em relação a desempenho (transmitir informações à taxa especificada), segurança (garantia de proteção contra acesso não autorizado ou falsificação) e confiabilidade (sem perdas ou atrasos no serviço). Contudo os aspectos mencionados estão além do escopo previsto para este trabalho.

Através dos resultados obtidos (Tabela 33), percebe-se a estabilidade e eficiência das lógicas implementadas, que refletiram no ambiente do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica demandas solicitadas por um *bay* real, seja no quesito de controle, supervisão ou comunicação, conforme ilustra a Figura 112.

Figura 112 – Implementação do controle de *bay* no LSSE (EESC/USP), 2006

Levando em conta a seqüência de manobras proposta e a composição do *bay*, seja no uso da IHM do relé ou através dos enlaces de comunicação de dados, garante-se a eficácia e segurança das lógicas desenvolvidas.

Cabe ressaltar que o resultado obtido é portátil, ou seja, pode ser usado em qualquer relé digital comercial que possua uma interface de comunicação de dados e os elementos dos

sistemas digitais mencionados. O custo de desenvolvimento da solução torna-se atraente, pois as concessionárias já possuem os equipamentos e *softwares* instalados e material humano capacitado para desenvolver a solução.

7.1.6 Controle de *Bay* no Contexto do Padrão IEC-61850

A metodologia proposta para especificar a automação da lógica discreta para o controle de *bay* mediante emprego do padrão IEC-61850, está em concordância com os procedimentos delineados por Chemin Netto [1], Cardoso *et al* [35] e diversos passos adicionais que buscam caracterizar os conceitos descritos no Capítulo V, conforme as seguintes etapas:

- Especificação funcional do *bay* segundo o padrão IEC-61850;
- Definição da topologia física e lógica para a rede de comunicação de dados;
- Verificação dos requisitos para adaptação física dos equipamentos;
- Avaliação da necessidade de adaptação das lógicas propostas;
- Mapeamento das informações que serão enviadas e recebidas;
- Definição do tipo de nó lógico (LN) utilizado, padrão IEC-61850 parte 5;
- Descrição do Serviço de Interface de Comunicação Abstrata (ASCI), padrão IEC-61850 parte 7.2;
- Descrição da Classe Comum de Dados (CDC), padrão IEC-61850 parte 7.3;
- Identificação da anatomia do LN escolhido, padrão IEC-61850 parte 7.4;
- Identificação do tipo de mensagem enviada e recebida, padrão IEC-61850 parte 8.1;
- Configuração do *DataSet*;
- Configuração do serviço de mensagens GOOSE;
- Atribuição da estrutura de dados de cada LN aos pontos pertinentes dentro das lógicas preestabelecidas;
- Avaliação das ações de controle, intertravamentos e supervisões desenvolvidas;
- Análise do atraso de propagação de mensagens.

7.1.6.1 Especificação funcional do *bay* segundo o padrão IEC-61850

Esta descrição encarrega-se especialmente de delinear as funções de proteção e controle da subestação segundo os objetos definidos pelo padrão IEC-61850. Neste ínterim, os diagramas funcionais do padrão IEC-61850 são análogos aos diagramas tradicionais que utilizam a padronização C37.2-1996 IEEE/ANSI, expondo as funcionalidades de proteção e controle do sistema como uma interação entre LNs [35], conforme ilustra a Figura 113.

Figura 113 – Descrição funcional do controle de *bay* conforme o padrão IEC-61850

A especificação funcional supracitada mostra a interação entre o LN pertencente ao IED (relé digital) designado para o controle, intertravamento e supervisão necessárias ao *bay* e, aquele encarregado de simular os equipamentos de pátio (simulador de *bay*). No simulador de *bay* o LN recebe o estado do disjuntor e chaves seccionadoras. Esta conjuntura é repassada para o LN do IED subsequente via rede *Ethernet*, para que a lógica digital de intertravamento possa atuar caso se faça necessária.

Como os IEDs utilizados necessitam exclusivamente dos elementos da lógica digital e da interface de comunicação de dados, não empregando funções de proteção conforme as descritas na Tabela 2, subseção 1.1.4, estas foram omitidas da descrição.

7.1.6.2 Topologia física e lógica para a rede de comunicação de dados

Para o caso em estudo foi proposta a topologia física e lógica descrita na Figura 114, conforme aplicação original (subseção 7.1.3), com o acréscimo de um microcomputador tipo IBM PC servindo como console de configuração e retirada da caixa de teste. “Neste caso, existe a adição qualitativa do comportamento de uma MU (*Merging Unit*) ao simulador de *bay*” [1]. Entre os relés digitais todos os comandos e estados de supervisão dos equipamentos de pátio trafegam utilizando mensagens GOOSE.

Figura 114 – Topologia física e lógica estabelecida

7.1.6.3 Requisitos para adaptação física dos equipamentos

A implementação do controle de *bay* valeu-se, inicialmente, do esquema de instalação convencional, cujas conexões para comunicação dos comandos e estados exigem uma instalação ponto a ponto, via cabo metálico rígido, conforme Figura 115, representativa da instalação real do ensaio adotado na subseção 7.1.3.

Figura 115 – Comunicação entre IEDs através de fiação rígida, LSEE (Controle de *bay*), 2006

A topologia adotada na subseção 7.1.6.2 busca atingir um dos objetivos do padrão IEC-61850, que refere-se a redução dos cabos de controle que transportam os sinais de estado, alarmes e comandos pertinentes ao circuito funcional, transferindo esta função para a rede de comunicação.

Como requisito para adaptação física dos equipamentos executou-se a retirada do cabeamento rígido de cobre entre os IEDs e utilização dos cabos UTP Cat. 5e.

7.1.6.4 Necessidade de adaptação das lógicas propostas

Embora as entradas e saídas digitais em *hardware* sejam substituídas por pontos virtuais, descritos posteriormente, não houve mudança nas condições de intertravamento, nas seqüências de manobra e nas lógicas desenvolvidas.

7.1.6.5 Mapeamento das informações enviadas e recebidas

Além do diagrama funcional é necessário apresentar uma lista dos estados e comandos que serão enviados ou recebidos, identificando qual IED deverá disponibilizar um determinado tipo de informação e aquele responsável por utilizá-la. A Tabela 34 explicita tais informações.

Tabela 34 – Informações a serem enviadas ou recebidas

Tipo de Informação	Comando ou Estado	IED Transmissor	IED Receptor
DJ-1 Aberto	Estado	Relé digital simulando os equipamentos de pátio	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>
DJ-1 Fechado	Estado	Relé digital simulando os equipamentos de pátio	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>
CS-1 Aberta	Estado	Relé digital simulando os equipamentos de pátio	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>
CS-1 Fechada	Estado	Relé digital simulando os equipamentos de pátio	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>
CS-2 Aberta	Estado	Relé digital simulando os equipamentos de pátio	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>
CS-2 Fechada	Estado	Relé digital simulando os equipamentos de pátio	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>
CST-1 Aberta	Estado	Relé digital simulando os equipamentos de pátio	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>
CST-1 Fechada	Estado	Relé digital simulando os equipamentos de pátio	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>
Acionar BF DJ-1	Comando	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>	Relé digital simulando os equipamentos de pátio
Acionar BA DJ-1	Comando	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>	Relé digital simulando os equipamentos de pátio
Acionar BF CS-1	Comando	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>	Relé digital simulando os equipamentos de pátio
Acionar BA CS-1	Comando	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>	Relé digital simulando os equipamentos de pátio
Acionar BF CS-2	Comando	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>	Relé digital simulando os equipamentos de pátio
Acionar BA CS-2	Comando	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>	Relé digital simulando os equipamentos de pátio
Acionar BF CST-1	Comando	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>	Relé digital simulando os equipamentos de pátio
Acionar BA CST-1	Comando	Relé digital responsável pelo controle e supervisão do <i>bay</i>	Relé digital simulando os equipamentos de pátio

7.1.6.6 Tipo de nó lógico (LN) utilizado

Por tratar-se de uma aplicação laboratorial, com a simulação dos equipamentos de pátio através do uso exclusivo de sinais discretos (atributo booleano) é possível utilizar um LN genérico tal como o GGIO.

Conforme descreve o padrão IEC-61850 parte 5 [90] o nó lógico genérico GIO (*Generic process I/O*), faz parte do grupo indicador G (*Generic Function References*) e pode representar equipamentos primários ou dispositivos auxiliares ao nível de processo, como, por exemplo, disjuntor e chave seccionadora (grupo indicador X), transformador de potência (grupo indicador Y) e equipamentos adicionais do SEP (grupo indicador Z) [91].

Na aplicação do controle de *bay* o nó lógico GGIO utiliza dados de indicação geral (*Ind*) referente ao estado do disjuntor (DJ-1) e chaves seccionadoras (CS-1, CS-2 e CST-1), com atributos do tipo booleano e funcionalidade construtiva de estado (ST, *status*), segundo pode ser observado na Figura 116.

Figura 116 – Nó lógico GGIO: dado de indicação geral e atributos booleanos

Sendo:

- *stVal*: valor de estado do dado *Ind*, responsável por transportar o valor discreto, 0 ou 1 binário;
- *q*: qualidade do valor explícito para *stVal*.

7.1.6.7 Descrição do serviço de interface de comunicação abstrata (ASCI)

A parte 7.2 do padrão IEC-61850 define o Serviço de Interface de Comunicação Abstrata (ASCI) como um modelo de classe hierárquica de todas as informações que podem ser acessadas via a rede de comunicação.

Dentre os modelos descritos na subseção 5.7.1, o controle de *bay* utilizará o modelo *Data-Set*, que permite o agrupamento de dados e atributos utilizados para acesso direto entre IEDs.

7.1.6.8 Descrição da classe de dados comum (CDC)

Conforme já exposto, os atributos do LN GGIO são do tipo booleano com funcionalidade construtiva de estado (ST). Na subseção 5.7.2, Tabela 20, é possível abstrair a CDC em que o nó lógico está associado: SPS (*Single Point Status*). A Tabela 35 evidencia o trecho da classe de dados comum SPS que identifica os atributos do dado *Ind*, conforme descreve a parte 7.3 do padrão IEC-61850.

Tabela 35 – Definição da classe de dados comum SPS

Classe SPS						
Nome do Atributo	Tipo do Atributo	FC	TrgOp	Valor/Faixa de Valores		M/O/C
Nome do Dado	Herdado da classe de dados (ver IEC-61850-7-2)					
Atributo do Dado						
Estado						
<i>stVal</i>	Booleano	ST	Dchg	Verdadeiro Falso		M
<i>q</i>	Qualidade	ST	Qchg			M
<i>T</i>	Estampa de tempo	ST				M

Fonte: [96]

7.1.6.9 Identificação da anatomia do nó lógico GGIO

A parte 7.4 do padrão IEC-61850 [91] explicita que o LN GGIO deve ser utilizado para modelar de uma forma genérica dispositivos do nível de processo, que não são previamente definidos pelos grupos indicadores S, T, X, Y ou Z (Tabela 18). A Tabela 36 detalha um trecho da anatomia do LN GGIO, ratificando a função de informação de estado e pertencimento a classe de dados comum SPS.

Tabela 36 – Trecho da anatomia do LN GGIO

Classe GGIO				
Nome do Atributo	Tipo do Atributo	Esclarecimento	T	M/O
Nome do LN	Deve ser herdado da classe de nós lógicos (ver IEC-61850-7-2)			
Dado				
Informações comuns do nó lógico				
		LN deve herdar todos os dados obrigatórios da classe de nó lógico comum (ver IEC-61850-7-4)		M
EEHealth	INS	Saúde do equipamento externo (sensor externo)		O
EEName	DPL	Nome da placa do equipamento externo		O
Valores Medidos				
AnIn	MV	Entrada analógica		O
Controles				
SPCSO	SPC	Estado de saída – posição única controlável		O
Informação de Estado				
Alm	SPS	Alarme geral único		O
Ind	SPS	Indicação Geral (entrada binária)		O

Fonte: [91]

7.1.6.10 Tipo de mensagem

As mensagens permutadas entre os IEDs no controle de *bay* têm restrição quanto a atrasos, pois são indicativas do estado dos equipamentos de pátio, com influência direta nas lógicas de controle e intertravamentos. O padrão IEC-61850 parte 8.1 descreve que estas mensagens são do tipo 1 (mensagens rápidas) e 1A (*trip*), classificadas como mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*).

7.1.6.11 *DataSet* e anatomia geral do objeto

Os valores de entrada dos sinais de estado (neste caso, booleanos) referente aos equipamentos de pátio do *bay* podem ser modelados como atributos, que servem de alicerce para formação de um dado. Um grupo de dados compõe um *DataSet* e são transmitidos para outros dispositivos utilizando, como, por exemplo, mensagens GOOSE ou armazenados para posterior consulta ou emissão de relatórios (Figura 117).

Figura 117 – Modelo de um IED

Utilizando o modelo delineado pela Figura 117 é possível obter a anatomia geral dos objetos do padrão IEC-61850 para a aplicação do controle de *bay*:

- $IED_x.LD_y.GGIO_m.ST.Ind_n.q$

Este ajuste indica um atributo de qualidade (*q*, *quality*) para o dado de indicação geral (*Ind*), que especifica uma entrada binária com funcionalidade construtiva de estado (ST), pertencente ao nó lógico GGIO. Este nó lógico está acoplado a um dado dispositivo lógico (LD) que, por sua vez, está inserido em um dispositivo físico (IED).

- $IED_x.LD_y.GGIO_n.ST.Ind_n.stVal$

Ajuste que indica um atributo com valor booleano de estado (*stVal*), relativo aos pontos de entrada e saída nas lógicas de controle, supervisão e simulação, para o dado de indicação geral (*Ind*). A funcionalidade construtiva deste dado é de estado (ST) e pertencente ao nó lógico GGIO. Este nó lógico está acoplado a um dado dispositivo lógico (LD) que, por sua vez, está inserido em um dispositivo físico (IED).

Onde: $x, y, m, n \in \mathbb{N}$.

Estas informações configuram o *DataSet* de transmissão com atributos de qualidade e valores de estado (nível lógico 0 ou 1). O *DataSet* no IED receptor deverá conter a estrutura de configuração do *DataSet* pertinente ao IED transmissor [106].

7.1.6.12 Configuração do serviço de mensagens GOOSE

As mensagens GOOSE suportam a troca de uma ampla gama de possíveis dados comuns organizados por um *DataSet*. Características essenciais do serviço de mensagens GOOSE são: a entrega simultânea destes dados para mais de um dispositivo físico através da utilização do serviço *multicast*, a possibilidade de configuração dos IEDs em VLANs e a utilização de prioridade (QoS) para informações fundamentais, como, por exemplo, o estado dos equipamentos de pátio do controle de *bay*.

Neste ínterim, alguns pontos vitais devem ser observados e configurados para o adequado desempenho do serviço de mensagens GOOSE nos IEDs:

1. Habilitar o serviço de mensagens GOOSE;
2. Atribuir um nome para o serviço de mensagens GOOSE. Recomenda-se utilizar um nome auto-descritivo;
3. Ajustar um endereço de *multicast*;
4. Configurar o identificador da VLAN (o *switch* deve reconhecer este parâmetro);
5. Configurar um valor de prioridade para as mensagens enviadas (o *switch* deve reconhecer este parâmetro);
6. Ajustar o atributo *ConfRev*, representativo do número de vezes que a configuração do *DataSet* foi alterada. Este ajuste é explicado em detalhes na parte 7.2 do padrão IEC-61850.

A Tabela 37 determina a configuração inicial para os pontos descritos anteriormente, no caso do controle de *bay*.

Tabela 37 – Configuração do serviço de mensagens GOOSE

Pontos Vitais	IED ₁	IED ₂
1	Habilitado	Habilitado
2	GOOSE_IED_1	GOOSE_IED_2
3	01-0C-CD-01-00-04	01-0C-CD-01-00-04
4	VLAN ID 1	VLAN ID 1
5	4	4
6	1	1

7.1.6.13 Atribuição da estrutura de dados as lógicas desenvolvidas

Conforme subseção 7.1.6.4 as entradas e saídas digitais em *hardware*, descritas pelas conexões elétricas (Figura 108) são substituídas por pontos virtuais, via *software* do relé digital, não ocorrendo mudanças nas condições de intertravamento, nas seqüências de manobra ou nas lógicas desenvolvidas. A Figura 118 exemplifica para o caso do disjuntor DJ-1 a lógica com os pontos virtuais demarcados.

Figura 118 – Atribuição dos pontos virtuais a lógica do disjuntor DJ-1

Com base nas condições operacionais e seções precedentes é possível atribuir a estrutura de dados de cada LN GGIO aos pontos virtuais de entrada e saída, nas lógicas preestabelecidas. A Figura 119 exemplifica a pertinência da estrutura de dados (*Ind*) do LN GGIO, atributo *stVal*, para os pontos virtuais da lógica para o DJ-1.

Figura 119 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica do disjuntor DJ-1

Como exemplo, a saída da porta *and-2* (Figura 118) tem conexão via *software* com a saída virtual 01. Quando esta saída é acionada, conforme um comando advindo da IHM local (PB1) ou comando remoto (via um dos enlaces de comunicação de dados), um sinal booleano, *bit 1*, é vinculado ao atributo *stVal* do dado *Ind₁*, pertencente ao nó lógico GGIO₁. Este nó lógico está acoplado ao dispositivo lógico, LD₁, pertinente ao dispositivo físico, IED₁ (Figura 119). Compete lembrar que esta vinculação será executada caso sejam observadas as devidas permissões do intertravamento.

O objeto composto, IED₁.LD₁.GGIO₁.ST.Ind₁.stVal, será enviado como uma mensagem GOOSE para o IED₂ que está simulando o DJ-1, assinalando nível lógico 1 na entrada virtual 01. Este sinal ocasionará a simulação de fechamento de um disjuntor de alta tensão, conforme ilustra a Figura 120.

Figura 120 – Atribuição da estrutura do LN GGIO₁ a entrada virtual 01 (simulação do DJ-1)

Com base nas informações enviadas e recebidas, subseção 7.1.6.5 Tabela 34, e no exemplo descrito de atribuição da estrutura de dados a lógica do DJ-1, torna-se possível um mapeamento para as demais lógicas (CS-1, CS-2 e CST-1), conforme Tabela 38 e Tabela 39.

Tabela 38 – Mapeamento das atribuições de dados do nó lógico GGIO aos pontos virtuais no IED₁

Tipo de informação IED ₁	Local de referência na lógica IED ₁	Ponto virtual IED ₁	Estrutura de dados do nó lógico GGIO, originada no IED _x
Acionar BF DJ-1	BF DJ-1	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
Acionar BA DJ-1	BA DJ-1	Saída Virtual 02	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
Acionar BF CS-1	BF CS-1	Saída Virtual 03	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
Acionar BA CS-1	BA CS-1	Saída Virtual 04	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
Acionar BF CS-2	BF CS-2	Saída Virtual 05	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
Acionar BA CS-2	BA CS-2	Saída Virtual 06	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal
Acionar BF CST-1	BF CST-1	Saída Virtual 07	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₇ .stVal
Acionar BA CST-1	BA CST-1	Saída Virtual 08	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₈ .stVal
DJ-1 Aberto	Estado Atual DJ-1 Intertravamentos CS-1 Intertravamentos CS-2 Intertravamentos CST-1	Entrada Virtual 01	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
DJ-1 Fechado	Estado Atual DJ-1	Entrada Virtual 02	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
CS-1 Aberta	Estado Atual CS-1 Intertravamentos CST-1	Entrada Virtual 03	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
CS-1 Fechada	Estado Atual DJ-1 Estado Atual CS-1	Entrada Virtual 04	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
CS-2 Aberta	Estado Atual CS-2 Intertravamentos CST-1	Entrada Virtual 05	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
CS-2 Fechada	Intertravamentos DJ-1 Estado Atual CS-2	Entrada Virtual 06	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal
CST-1 Aberta	Intertravamentos CS-1 Intertravamentos CS-2 Estado Atual CST-1	Entrada Virtual 07	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₇ .stVal
CST-1 Fechada	Estado Atual CST-1	Entrada Virtual 08	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₈ .stVal

Tabela 39 – Mapeamento das atribuições de dados do nó lógico GGIO aos pontos virtuais no IED₂

Tipo de informação IED ₂	Local de referência na lógica IED ₂	Ponto virtual IED ₂	Estrutura de dados do nó lógico GGIO, originada no IED _x
DJ-1 Aberto	Contato 52b DJ-1	Saída Virtual 01	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
DJ-1 Fechado	Contato 52a DJ-1	Saída Virtual 02	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
CS-1 Aberta	Contato 52b CS-1	Saída Virtual 03	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
CS-1 Fechada	Contato 52a CS-1	Saída Virtual 04	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
CS-2 Aberta	Contato 52b CS-2	Saída Virtual 05	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
CS-2 Fechada	Contato 52a CS-2	Saída Virtual 06	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal

CST-1 Aberta	Contato 52b CST-1	Saída Virtual 07	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₇ .stVal
CST-1 Fechada	Contato 52a CST-1	Saída Virtual 08	IED ₂ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₈ .stVal
Acionar BF DJ-1	Set (S) Flip-Flop DJ-1	Entrada Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
Acionar BA DJ-1	Reset (R) Flip-Flop DJ-1	Entrada Virtual 02	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
Acionar BF CS-1	Set (S) Flip-Flop CS-1	Entrada Virtual 03	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
Acionar BA CS-1	Reset (R) Flip-Flop CS-1	Entrada Virtual 04	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
Acionar BF CS-2	Set (S) Flip-Flop CS-2	Entrada Virtual 05	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
Acionar BA CS-2	Reset (R) Flip-Flop CS-2	Entrada Virtual 06	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal
Acionar BF CST-1	Set (S) Flip-Flop CST-1	Entrada Virtual 07	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₇ .stVal
Acionar BA CST-1	Reset (R) Flip-Flop CST-1	Entrada Virtual 08	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₈ .stVal

O comportamento global das lógicas de controle, supervisão e intertravamento para as chaves CS-1 (Figura 121), CS-2 (Figura 122) e CST-1 (Figura 123) é similar àquele desenvolvido para o controle e supervisão do disjuntor DJ-1. A sensibilidade da mudança está restrita à forma de modelagem das informações utilizando o padrão IEC-61850, e à troca de comandos e estados através de mensagens GOOSE.

Cabe ressaltar que nas lógicas desenvolvidas o comando remoto, bloco de telecomando, pode utilizar qualquer tipo de protocolo aprovado pelo IED para dar início a sua atuação, via nível lógico 1.

Figura 121 – Atribuição da estrutura do LN GGIO₁ às entradas virtuais, lógica da CS-1

Figura 122 – Atribuição da estrutura do LN GGIO₁ as entradas virtuais, lógica da CS-2

Figura 123 – Atribuição da estrutura do nó lógico GGIO₁ as entradas virtuais, lógica da CST-1

7.1.6.1 Testes realizados no contexto do padrão IEC-61850

O objetivo dos testes realizados foi o de verificar a eficácia das ações de controle através da IHM local do IED₁ e via os enlaces de comunicação de dados já referidos, intertravamentos e supervisões desenvolvidas, agora no contexto do padrão IEC-61850. Para

isso foram executadas as manobras apresentadas na Tabela 40, em conformidade com o exemplo descrito para o comando do DJ-1 na subseção 7.1.2.

Tabela 40 – Manobras realizadas via IHM local e enlaces de comunicação

Tipo de manobra	Recepção do comando via mensagem GOSSE	Resultado via IHM local	Resultado via linha discada	Resultado via LPCD	Resultado via rede local
Comando CS-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Comando CS-2	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Comando DJ-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Comando CST-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Intertravamento CST-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Intertravamento CS-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Intertravamento CS-2	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Intertravamento DJ-1	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Energização total	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito
Desenergização total	RECEBIDO	Êxito	Êxito	Êxito	Êxito

Via IHM local e os enlaces de comunicação de dados, houve em 100% dos casos evidenciados (Tabela 40), correta recepção dos comandos via mensagem GOOSE, conseqüente execução das lógicas e obediência aos intertravamentos.

Através dos resultados obtidos, percebe-se a estabilidade e eficiência das lógicas implementadas e da metodologia posta em prática para migração da automação do controle de *bay*, adotando o padrão IEC-61850 como protocolo de comunicação e a rede *Ethernet* em substituição à fiação paralela, utilizada para transmissão de comandos e estados entre os níveis de processo e *bay*.

De modo reiterado, os resultados obtidos refletiram no ambiente do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica demandas solicitadas por um *bay* real, agora utilizando o padrão IEC-61850, conforme ilustra a Figura 124.

Figura 124 – Comunicação entre IEDs com o padrão IEC-61850, LSEE (Controle de *bay*), 2007

7.1.6.2 Análise do atraso de propagação de mensagens

Como característica de desempenho da rede de comunicação, o tempo de atraso na propagação de mensagens foi monitorado durante a seqüência de manobras para energização e desenergização total do *bay* proposto. Considerou-se o tempo que uma mensagem de comando, por exemplo, abrir o DJ-1, precisa para propagar-se do IED₁ para o IED₂.

Inicialmente, valeu-se do arranjo de ensaio e esquema de instalação convencional (subseção 7.1.3), cujas conexões para comunicação dos comandos e estados exigem uma instalação ponto a ponto, via cabo metálico de cobre com classe de isolamento para baixa tensão. Podem-se resumir as particularidades dos elementos constituintes da referida estrutura, como:

- Tensão aplicada pela caixa de teste: ± 125 Vdc;
- Condutor metálico de cobre: 2,5 mm;
- Comprimento dos condutores metálicos de cobre entre os IEDs: 30 m;
- Tempo necessário para sensibilização das saídas utilizadas pelo IED₁: 6 ms;
- Velocidade de atualização das saídas utilizadas pelo IED₁: 1/8 ciclo;
- Velocidade de atualização das entradas utilizadas pelo IED₂: 1/16 ciclo;
- Carga típica suportada pelas entradas utilizadas pelo IED₂: 0,24 W @ 125 Vdc.

Os tempos entre a sensibilização das saídas digitais do IED₁ e as entradas digitais do IED₂ foram coletados através do registro seqüencial de eventos dos referidos IEDs, conforme mostra a Tabela 41.

Tabela 41 – Tempos entre a sensibilização das saídas e entradas digitais, via fiação paralela

Tipo de Manobra	Comando	IED ₁		IED ₂	
		Estampa de Tempo da Saída Digital (h:m:s)	Saída Digital (vide Figura 108)	Estampa de Tempo da Entrada Digital (h:m:s)	Entrada Digital (vide Figura 108)
Energização	Abrir CST-1	19:00:19.486	[08]	19:00:19.494	(08)
Energização	Fechar CS-2	19:06:23.824	[05]	19:06:23.832	(05)
Energização	Fechar CS-1	19:12:28.161	[03]	19:12:28.169	(03)
Energização	Fechar DJ-1	19:18:32.499	[01]	19:18:32.507	(01)
Desenergização	Abrir DJ-1	19:24:36.836	[02]	19:24:36.844	(02)
Desenergização	Abrir CS-1	19:30:41.174	[04]	19:30:41.182	(04)
Desenergização	Abrir CS-2	19:36:45.511	[06]	19:36:45.519	(06)
Desenergização	Fechar CST-1	19:42:49.849	[07]	19:42:49.857	(07)

Considerando o comando para abertura do DJ-1 na desenergização, pode-se descrever:

- Com a chave seccionadora de terra, CST-1, aberta e as chaves seccionadoras de linha, CS-1 e CS-2, fechadas, um comando para abertura do DJ-1 sensibilizou a saída digital do IED₁, saída digital 01, na estampa de tempo: 19:24:36.836 (h:m:s);
- Após 8 ms a entrada digital 01, IED₂, conectada via condutor metálico de 2,5 mm e 30 m de comprimento ao IED₁, saída digital 01, foi sensibilizada com a seguinte estampa de tempo: 19:24:36.844 (h:m:s).

Observando a Tabela 41, percebe-se que todas as medidas executadas, considerando os parâmetros dos elementos constituintes da referida estrutura, obtiveram como resultado 8 ms de atraso na propagação dos comandos.

Já no contexto do padrão IEC-61850 utilizou-se a topologia física e lógica da rede de comunicação de dados descrita na subseção 7.1.6.2. Podem-se sintetizar as características dos elementos constituintes da referida topologia, como:

- Os IEDs foram conectados via um *switch* não-gerenciável;
- Portas com velocidade de 100 Mbps;
- Cabeamento UTP Cat. 5e com 5 m de extensão;
- Configuração do serviço de mensagens GOOSE conforme subseção 7.1.6.12;
- O mapeamento das atribuições de dados do nó lógico GGIO aos pontos virtuais nos IEDs obedece a subseção 7.1.6.13.

Os tempos entre a sensibilização das saídas virtuais do IED₁ e as entradas virtuais do IED₂ foram coletados através do registro sequencial de eventos dos referidos IEDs, conforme explicita a Tabela 42.

Tabela 42 – Tempos entre a sensibilização das saídas e entradas virtuais, via mensagens GOOSE

Tipo de Manobra	Comando	IED ₁		IED ₂	
		Estampa de Tempo da Saída Virtual (h:m:s)	Saída Virtual (vide Tabela 38)	Estampa de Tempo da Entrada Virtual (h:m:s)	Entrada Virtual (vide Tabela 39)
Energização	Abrir CST-1	19:47:54.186	08	19:47:54.190	08
Energização	Fechar CS-2	19:53:58.524	05	19:53:58.530	05
Energização	Fechar CS-1	19:58:02.861	03	19:58:02.865	03
Energização	Fechar DJ-1	20:04:07.199	01	20:04:07.205	01
Desenergização	Abrir DJ-1	20:09:11.536	02	20:09:11.542	02
Desenergização	Abrir CS-1	20:14:15.874	04	20:14:15.878	04
Desenergização	Abrir CS-2	20:19:20.211	06	20:19:20.215	06
Desenergização	Fechar CST-1	20:24:24.549	07	20:24:24.555	07

Reconsiderando o comando para abertura do DJ-1 na deserneização, no contexto do padrão IEC-61850 pode-se descrever:

- Com a chave seccionadora de terra, CST-1, aberta e as chaves seccionadoras de linha, CS-1 e CS-2, fechadas, um comando para abertura do DJ-1 sensibilizou a saída virtual do IED₁, saída virtual 01, na estampa de tempo: 20:09:11.536 (h:m:s);
- Após 6 ms a entrada virtual 01, IED₂ foi sensibilizada através da recepção de uma mensagem GOOSE, via rede *Ethernet*, com a seguinte estampa de tempo: 20:09:11.542 (h:m:s).

Na Tabela 42, percebe-se que o atraso médio de propagação entre transmissão e recepção de mensagens GOOSE, considerando a sequência de manobras para energização e deserneização total do *bay* foi de 5 ms.

A Figura 125 mostra que a admissão do padrão IEC-61850 como protocolo de comunicação e a rede *Ethernet* em substituição a fiação paralela, possibilitou a diminuição do atraso de propagação de comandos entre os níveis de processo e *bay* em 3 ms (valor médio).

Figura 125 – Atraso de propagação entre fiação paralela e mensagens GOOSE, controle de *bay*

Como exemplo, a primeira barra vertical em azul exprime o atraso de propagação para o comando de abertura da CST-1 (8 ms), utilizando fiação paralela. A primeira barra vertical em vermelho revela o atraso de propagação para o mesmo comando, porém utilizando mensagem GOOSE (4 ms) entre o IED₁ e IED₂. Cabe mencionar que estes tempos consideram o momento de sensibilização das saídas e entradas, digitais ou virtuais, absorvendo o tempo de processamento gasto pelo *switch* (quando do envio de mensagens GOOSE) e desconsiderando os tempos de processamento dos IEDs.

7.2 Comutação Automática entre Fontes de Alta Tensão

A qualidade da energia elétrica tornou-se tópico fundamental de discussão para seus produtores e consumidores, com foco no estudo e emprego de meios para extirpar ou minimizar problemas em dispositivos alimentados por fontes de energia. Dugan *et al.* (*apud* Oleskovicz [4]) definem qualidade de energia “(...) como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulta em falha ou má operação de equipamentos dos consumidores”. Neste contexto, as variações de tensão de longa duração (VTLD) são eventos que afetam a amplitude da tensão eficaz por um período superior a 1 minuto e, ocorrem na faixa de frequência nominal (60 Hz). A Tabela 43 classifica os eventos mencionados, explicita a duração do fenômeno e magnitude da tensão.

Tabela 43 – Conjunto de fenômenos relacionados (VTLD)

Varição de tensão de longa duração	Duração	Magnitude da tensão
Interrupção sustentada	> 1 minuto	0,0 pu ¹⁹
Subtensão	> 1 minuto	0,8 – 0,9 pu
Sobretensão	> 1 minuto	1,1 – 1,2 pu

Fonte: [3]

Os procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) em seu módulo 8, qualidade de energia elétrica [107], conceituam interrupção como a “descontinuidade do neutro ou da tensão disponível em qualquer uma das fases de um circuito elétrico que atende a unidade consumidora ou ponto de conexão”. Quando o fornecimento de tensão permanece em zero por um período de tempo que excede 1 minuto, a VTLD é considerada como uma interrupção sustentada e, geralmente, requer intervenção humana para reparar e retornar o sistema à operação normal no provimento de energia [108].

A subtensão é a diminuição no valor eficaz da tensão CA *rms* (*alternating current, root mean square*) para menos de 90% do valor nominal, com duração superior a 1 minuto e origem no incorreto dimensionamento de uma instalação elétrica, *taps* incorretos de transformadores, reguladores de tensão desajustados ou sobrecarga na rede elétrica. Já a sobretensão é o incremento na tensão CA *rms* superior a 110% do valor nominal, com duração superior a 1 minuto, resultante, por exemplo, do desligamento de grandes cargas, energização de bancos de capacitores ou *taps* de transformadores incorretamente conectados [3] [4] [108].

¹⁹ Por unidade (pu): é a porcentagem formada pela divisão entre o valor indicado pelo valor nominal. Por exemplo, uma interrupção de 0,1 pu em 120 V representa 12 V.

Ambas as variações são tipicamente ilustradas com gráficos de tensão (*rms*) versus tempo, em conformidade com a Figura 126.

Figura 126 – Características da interrupção sustentada, subtensão e sobretensão
Fonte: [109]

Pode-se observar na Figura 126 que numa interrupção, a tensão cai excessivamente abaixo do valor nominal. Nos sistemas trifásicos, por exemplo, uma interrupção começa quando a tensão em todas as fases está abaixo do limiar e termina quando uma fase está igual ou acima do limiar de interrupção e histerese²⁰. As condições de disparo para interrupções são limiar e histerese. As interrupções são caracterizadas por duração, magnitude e tempo de ocorrência [109].

Utilizando o mesmo sistema, a subtensão começa quando a tensão em uma ou mais fases cai abaixo do limiar de redução e termina quando todas as fases estão iguais ou acima do limiar de redução e histerese. As condições de disparo para subtensões e sobretensões são limiar e histerese. Subtensões e sobretensões são caracterizados por duração, magnitude e tempo de ocorrência [109].

²⁰ Fenômeno que consiste em a resposta de um sistema a uma solicitação externa se atrasar em relação ao incremento ou à atenuação dessa solicitação [118]. Valor de tensão que deve ser ultrapassado para induzir a mudança do estado lógico [3].

“A consequência de uma interrupção sustentada é o desligamento dos equipamentos, exceto para aquelas cargas protegidas por sistemas *no-breaks* ou por outras formas de armazenamento de energia” [4]. Subtensão e sobretensão podem resultar em operação imprevisível, baixo desempenho ou falha na atuação de dispositivos eletrônicos.

Para processos produtivos complexos e sensíveis é de suma importância construir e operar o SEP associado de forma a garantir o fornecimento contínuo de energia dentro de padrões aceitáveis. Dentre os equipamentos e áreas que sofrem com problemas causados por distúrbios de energia, vale ressaltar, por exemplo:

- Computadores em redes de comunicação distribuída;
- Dispositivos de telecomunicações;
- Controle de procedimentos baseados em processadores;
- Atuadores de velocidade variável (elevadores, bombas, impressoras, reguladores de velocidade e linhas de montagem);
- Sistemas de imagem;
- Eletrônica biomédica, dentre outros.

“A continuidade corresponde ao grau de disponibilidade de energia elétrica ao consumidor. O ideal é que não haja interrupção no fornecimento de energia elétrica, ou, se houver que seja a mínima possível” [4]. Como estratégia para atingir esse objetivo esta aplicação tem como alvo o desenvolvimento e implementação em ambiente laboratorial de uma lógica de monitoramento e comutação automática entre fontes de alta tensão em uma subestação industrial para minimizar os efeitos das subtensões e interrupções sobre um ambiente fabril. Do ponto de vista de infra-estrutura é sugerida a construção de uma subestação de entrada em alta tensão provida por duas linhas de transmissão (LT-1 e LT-2), vindas de barramentos distintos da concessionária de energia elétrica local. Para a parte lógica desse arranjo serão usados relés digitais comerciais como ferramenta para o desenvolvimento e implementação da função 27 (subtensão, padrão C37.2-1996 IEEE/ANSI), controle e monitoramento de ambas as LTs.

7.2.1 Topologia Física e Operação da Subestação

A topologia física constitui-se de uma subestação de alta tensão composta por dois vãos idênticos, conforme ilustra a Figura 127. Cada vão possui um conjunto de pára-raios (PR-n.vão), transformadores de potencial (TP-n.vão), chave seccionadora de aterramento (CST-n.vão), chaves seccionadoras de linha (CS-n.vão), e disjuntor de alta tensão (DJ-n.vão).

Sendo:

- $n=[1,2]; n \in \mathbb{N};$
- $v\tilde{a}o=[1,2]; v\tilde{a}o \in \mathbb{N}.$

Figura 127 – Estrutura funcional proposta para a subestação industrial

A série de mnemônicos já referidos segue a seguinte formatação, conforme exemplo empregado para as chaves seccionadoras pertinentes ao vão 1:

- CS-1.1

$n=1; v\tilde{a}o=1.$

Logo: CS-1.1 = chave seccionadora 1, pertencente ao vão 1.

- CS-2.1

$n=2; v\tilde{a}o=1.$

Logo: CS-2.1 = chave seccionadora 2, pertencente ao vão 1.

Os ajustes de subtensão e interrupção (função 27), declarados nos relés digitais, serão esclarecidos posteriormente.

A Figura 127 apresenta apenas a parcela de controle para a solução proposta, com os vãos de entrada da subestação industrial de alta tensão. Os demais disjuntores, chaves seccionadoras, ramais alimentadores e subestações unitárias foram omitidos.

O vão número 1 é definido como principal, sendo responsável, em condição normal de tensão, por suprir as cargas da instalação. O vão número 2 é definido como secundário ou retaguarda, sendo responsável por suprir as cargas da instalação caso exista um problema de subtensão ou interrupção referente à LT-1.

O comportamento da tensão nas LTs é acompanhado através dos TPs correspondentes (TP-1.1 e TP-1.2). Segundo Chemin Netto [1]:

“Podem ser utilizados enrolamentos de três TPs, ligados, por exemplo, em estrela, ou apenas um enrolamento de um TP para prover a tensão de monitoramento à função de subtensão, pois a mesma é segregada por fase. Contudo, recomenda-se o uso de três TPs. Dessa forma a cobertura da linha para os problemas em foco é aumentada” (Figura 128).

Figura 128 – Ligação dos TPs em estrela
Fonte: [5]

Sendo:

- H_1 e H_2 são os terminais primários do TP;
- X_1 e X_2 são os terminais secundários do TP.

As chaves seccionadoras de linha (CS-1.1 e CS-2.1) e o disjuntor de alta tensão (DJ-1.1) em condições normais de operação estarão fechados. A chave seccionadora de aterramento (CST-1.1) só é fechada durante a preparação para serviços de manutenção e após ser configurada ausência de tensão na LT-1.

Para o vão 2 as chaves seccionadoras de linha (CS-1.2 e CS-2.2) estarão fechadas, a chave seccionadora de aterramento (CST-1.2) estará aberta e, será fechada caso ocorram as mesmas condições da CST-1.1. O disjuntor de alta tensão (DJ-1.2) estará aberto, sendo seu fechamento determinado por comando manual de um operador ou pela lógica de transferência entre fontes de alta tensão, quando caracterizado um evento de subtensão ou interrupção na LT-1.

7.2.2 Programação de Controle e Supervisão Desenvolvida

O funcionamento da lógica desenvolvida está dividido em quatro partes fundamentais: função de proteção 27, 1º ciclo de comutação, 2º ciclo de comutação e sinalizações.

7.2.2.1 Ajuste e lógica da função de proteção 27

O relé digital multifunção contém várias funções incorporadas, inclusive a de subtensão, função 27. Neste caso, o relé opera quando a tensão elétrica diminui além de um valor ajustado. Para o padrão IEC-60617²¹ este valor de ajuste é representado pelo símbolo: "U<" [9]. Para distinguir se há um problema de subtensão ou interrupção na LT1 e LT2 será utilizada a característica de atuação deste ajuste com deferência à tensão e à temporização, conforme ilustra a Figura 129.

Figura 129 – Curva de atuação para a função 27, subtensão e interrupção

Onde:

- $U<^{22}$, valor de referência para subtensão;
- $U<<$, valor de referência para interrupção;
- $T<$, tempo de atuação para $U<$;
- $T<<$, tempo de atuação para $U<<$;

²¹ O padrão IEC 60617 contém símbolos gráficos para uso em diagramas eletrotécnicos [117];

²² Somente o símbolo "U<" é padronizado pelo padrão IEC-60617.

- **27-U<.vão.tipo de atuação**, estágio de subtensão referente ao vão 1 ou 2; regulado para 0,8 pu da tensão nominal do sistema; tipo de atuação pode indicar área de *pickup* ou *trip*;
- **27-U<<.vão. tipo de atuação**, estágio de subtensão referente ao vão 1 ou 2; regulado para 0,1 pu da tensão nominal do sistema; tipo de atuação pode indicar área de *pickup* ou *trip*.

Ao considerar a Figura 129 e uma tensão nominal (V_N) no primário do TP igual a 115 V, o valor $U<$ é regulado para 0,8 pu da V_N , representando o ajuste para atuação (*pickup*) da função 27, subtensão. Sendo:

$$\text{Ajuste de subtensão } (U <) = 0,8 \text{ pu} * \left(\frac{V_N}{\sqrt{3}} \right) = 0,8 * \left(\frac{115}{\sqrt{3}} \right) = 53 \text{ V}_{\text{secundário do TP}} \quad (1)$$

O valor programado para a temporização associada a este estágio ($T<$) é igual a 1 minuto, ou seja, quando a tensão da fase (ou das fases) em referência decrementar para um valor menor ou igual a 0,8 pu da V_N , haverá a indicação de atuação (*pickup*) da função 27, caso persista este valor, após 1 minuto ocorrerá um sinal de *trip*. O funcionamento da função de subtensão, de forma genérica, está descrita também, com assistência de amplificadores operacionais que desempenham o papel de comparadores do tipo inversor (Figura 130).

Figura 130 – Descrição genérica para a função de subtensão, estágio $U<$

Cada comparador possui na sua entrada inversora (-) um sinal analógico de fase (A, B ou C), e na outra entrada, o sinal de referência fornecido ($U<$). A checagem desses sinais

resultará na saída de cada comparador, um sinal de nível “baixo”, designado saturação negativa ($-V_{sat}$) quando $U <$ for menor que a tensão de entrada, ou sinal de nível “alto”, denominado saturação positiva ($+V_{sat}$), quando $U <$ for maior que a tensão de entrada [110].

Cabe citar que “esta função de proteção é segregada por fase, ou seja, as fases A, B, C, detectam e decidem se existe um problema de subtensão no SEP ao qual o relé digital e a função descrita estão conectados, de forma independente uma da outra” [1].

A Figura 131 representa o estágio $U <$, regulado para 0,1 pu da V_N (7 V), ajuste de interrupção. Sendo:

$$\text{Ajuste de subtensão } (U <) = 0,1 \text{ pu} * \left(\frac{V_N}{\sqrt{3}}\right) = 0,1 * \left(\frac{115}{\sqrt{3}}\right) = 7 \text{ V}_{\text{secundário do TP}} \quad (2)$$

O valor programado para a temporização associada a este estágio ($T <$) é igual a 1 segundo, ou seja, quando a tensão da fase (ou das fases) em referência diminuir para um valor menor ou igual a 0,1 pu da V_N , haverá a indicação de atuação (*pickup*), caso persista este valor, após 1 segundo ocorrerá um sinal de *trip*.

Figura 131 – Descrição genérica para a função de subtensão, estágio $U <$

De forma idêntica ao estágio anterior, cada comparador possui na sua entrada inversora (-) um sinal analógico de fase (A, B ou C), e na outra entrada, o sinal de referência fornecido ($U <$). A checagem desses sinais resultará na saída de cada comparador, nível “baixo”, quando $U <$ for menor que a tensão de entrada. Quando $U <$ for maior que a tensão de entrada, na saída do comparador haverá nível “alto”.

Nos dois estágios citados, subtensão ($U<$) e interrupção ($U<<$), os comparadores são inerentes aos relés digitais que fornecem a função de proteção 27. Neste ínterim, a Figura 132 mostra a lógica descrevendo os estágios mencionados para LT-1, implementada no relé digital 1.1. Não existem alterações na lógica pertinente ao relé digital 1.2, LT-2, como pode ser visto na Figura 133.

Relé Digital 1.1

Figura 132 – Lógica de ajuste para detecção de subtensão e interrupção na LT-1

Relé Digital 1.2

Figura 133 – Lógica de ajuste para detecção de subtensão e interrupção na LT-2

7.2.2.2 1º ciclo de comutação

A Figura 134 mostra a lógica responsável pelo primeiro ciclo de comutação, que responde pela passagem da alimentação das cargas industriais da LT-1 para a LT-2.

Figura 134 – Lógica referente ao 1º ciclo de comutação

O início deste ciclo se dá quando o estágio de subtensão $27-U<.1.Trip$ e/ou de interrupção $27-U<<.1.Trip$ é acionado no relé digital 1.1, o que implica em abertura imediata do disjuntor DJ-1.1, via porta *or*. Simultaneamente, esta informação (abrir DJ-1.1) é enviada para o relé digital 1.2.

Para que o comando de fechamento do disjuntor DJ-1.2 seja gerado é necessário que não exista nenhum evento de subtensão $27-U<.2.Pickup$ ou de interrupção $27-U<<.2.Pickup$ em curso para LT-2. Além disso, o sinal adivindo da porta *or*, relé digital 1.1, deve estar presente, conjuntamente à indicação que o DJ-1.1 está aberto (como critério adicional de estabilidade). Satisfeitas estas condições, na entrada da porta *and* relé digital 1.2, será aguardado um tempo de segurança de 0,1 s (PU, *pickup timer*, do *Timer 3*), para que então o disjuntor DJ-1.2 seja fechado. Este tempo é necessário para garantir que duas fontes de alimentação em alta tensão não sejam colocadas em paralelo. “Uma justificativa para essa restrição de operação deve-se ao fato de que o fechamento de um anel em 69 kV pode aumentar o valor da potência de curto-circuito em pontos do sistema, o que pode implicar em superação da capacidade de interrupção de certos disjuntores” [1].

O valor de ajuste para o *Timer 3* não é aleatório, ele é composto pelo tempo de abertura do disjuntor acrescido de uma margem de segurança. Para este estudo está sendo considerado um disjuntor de 69 kV com acionamento por mola, o que implica em dizer que o tempo de abertura está em torno de 40 ms e o tempo de fechamento em 70 ms [111].

7.2.2.3 2º ciclo de comutação

A Figura 135 mostra a lógica para o segundo ciclo de comutação, responsável pelo retorno da alimentação das cargas industriais via LT-2, para a LT-1.

Figura 135 – Lógica referente ao 2º ciclo de comutação

Este ciclo é iniciado quando as condições de subtensão ou interrupção na LT-1 desaparecem no relé digital 1.1 (entradas da porta *and-1*). Contudo, a comutação das LTs não ocorre imediatamente. É preciso que a tensão se mantenha estável, ou seja, acima de 0,8 pu da V_N , por um intervalo de tempo de 60 s, alocado ao *Timer 3* (relé digital 1.1) e *Timer 4* (relé digital 1.2). Este é um tempo de estabilização necessária para a geração do comando de abertura do DJ-1.2 e, fechamento do DJ-1.1. Serve para precaver o sistema contra falso restabelecimento da tensão na LT-1.

Outros critérios de segurança quanto à geração do comando de abertura do disjuntor DJ-1.2 são:

- O estado aberto do disjuntor DJ-1.1 na porta *and-2*, relé digital 1.2, que pode bloquear a origem do comando de abertura do DJ-1.2, caso DJ-1.1 esteja fechado;
- Caso as entradas da porta *or-1*, 27-U<.2.Trip e/ou 27-U<<.2.Trip estejam ativas, no relé digital 1.2, este sinal somente deverá propagar-se com o objetivo de abrir o disjuntor DJ-1.2, caso o estado fechado do disjuntor DJ-1.2 esteja ativo (nível lógico 1).

Decorrido o tempo de estabilização do *Timer 4*, relé digital 1.2, é gerado um sinal promovendo a abertura do disjuntor DJ-1.2. Este sinal, saída da porta *or-2*, é enviado para o relé digital 1.1 e, em conjunto com os sinais advindos do *Timer 3*, relé digital 1.1, e do estado aberto do disjuntor DJ-1.2, irá comandar o fechamento do disjuntor DJ-1.1.

O fechamento do disjuntor DJ-1.1 é retardado em 0,1 segundo pelo *Timer 4*, relé digital 1.1, para, como no primeiro ciclo de comutação, garantir que apenas uma fonte de alimentação seja acoplada à carga.

7.2.2.4 Sinalizações para os vãos

Para auxiliar a equipe de manutenção elétrica, quando da ocorrência de um evento, foram estabelecidas várias sinalizações indicativas, que podem ser vistas na Figura 136.

Figura 136 – Sinalizações do vão 1

As sinalizações dos *Leds* L3 e L6 tratam de eventos de subtensão e interrupção, respectivamente, ocorridos concomitantemente em ambas as LTs. As demais sinalizações referem-se a eventos ocorridos na LT-1, ou dispositivos do vão 1.

Por uma questão de simplicidade serão apresentadas apenas as sinalizações referentes ao relé digital 1.1 (LT-1, vão 1), ressaltando que as sinalizações para o relé digital 1.2 (LT-2, vão 2), tratam dos mesmos fenômenos.

7.2.3 Arranjo do Ensaio

Para o caso em estudo foi proposta a montagem ilustrada na Figura 137, composta por um simulador de sistemas de potência, com a função primordial de representar as duas fontes de alimentação em alta tensão (LT-1 e LT-2) e três relés digitais. Um relé será responsável

pelo 1º ciclo de comutação (Relé Digital 1.1), outro pelo 2º ciclo de comutação (Relé Digital 1.2) e o terceiro será empregado para o papel de simulador dos equipamentos de pátio, neste caso, os disjuntores DJ-1.1 e DJ-1.2.

Figura 137 – Arranjo do ensaio realizado – comutação de linhas de transmissão

Conforme aplicação precedente, seção 7.1, esta aplicação foi desenvolvida em um ambiente laboratorial, os disjuntores não estavam disponíveis para receber os comandos de abertura e fechamento, fornecendo informações sobre seus estados (aberto ou fechado). Do mesmo modo, a solução encontrada foi utilizar um relé digital para simular os equipamentos a serem manobrados, demandando capacidade de comunicação e programação.

Com o conhecimento sobre o comportamento biestável e da forma pelas quais os equipamentos a serem manobrados (disjuntores DJ-1.1 e DJ-1.2) fornecem indicação a respeito do seu estado atual, foi possível compor a programação de simulação destes equipamentos, a qual está exemplificada para o disjuntor DJ-1.1 (Figura 138).

Figura 138 – Programação para o simulador de equipamentos biestáveis (DJ-1.1)

Caso o disjuntor DJ-1.1, receba comando para fechar, a Entrada-1 do *flip-flop* recebe nível lógico 1, levando a saída Q também para 1, e conseqüentemente acendendo os *Leds*, L2 (DJ-1.1, fechado) e L4 (contato 52a, concordante).

Desta etapa, o foco passou a ser as conexões para a troca de informações entre o simulador de equipamentos de pátio e os relés digitais que possui as instruções de controle e supervisão, tornando toda a implementação verossímil. A Figura 139 ilustra as conexões elétricas realizadas via condutores metálicos de cobre (classe de isolamento para baixa tensão).

Figura 139 – Conexões elétricas realizadas, sendo [] Saída Digital e () Entrada Digital

Como exemplo, a saída da porta *or*, pertencente à lógica do 1º ciclo de comutação, comando de abertura do disjuntor, DJ-1.1 (Figura 134), tem conexão via *software* com uma saída em *hardware*, saída digital “[01]” (primeira linha de conexão da Figura 139). Quando esta é fechada (de acordo com um sinal de *trip*, subtensão ou interrupção), a tensão nos bornes da caixa de teste (± 125 Vdc) é percebida pelos terminais da entrada digital “(02)”, referente ao simulador, o que causa a indicação de abertura do disjuntor de alta tensão (DJ-1.1).

7.2.4 Resultados Encontrados

Uma série abrangente de testes foi realizada. Tal conjunto de verificação foi composto por subtensões e interrupções trifásicas e monofásicas, geradas pela caixa de teste e aplicadas em cada uma das LTs (relés digitais 1.1 e 1.2) em diversas combinações, vindo a caracterizar uma gama de situações representativas de defeito e operação pelas quais o sistema em estudo poderia passar. Os resultados dos testes podem ser observados na Tabela 44 e Tabela 45.

O Teste 01 será utilizado como exemplo de condução dos ensaios realizados:

- Inicialmente aplica-se via caixa de teste, um valor de tensão contínua de ± 125 Vdc sobre as conexões elétricas para troca de informação, simulando o circuito funcional de uma subestação real;
- Na seqüência, são aplicadas tensões trifásicas nominais aos relés digitais 1.1 e 1.2, simulando as fontes de alimentação em alta tensão, LT-1 e LT-2, provenientes de subestações distintas;
- Tais valores correspondem a 66,4 V aplicados a 60 Hz e em seqüência positiva. Este valor é mantido por 1 minuto;
- Para o valor da relação de transformação de potencial (RTP) utilizado nos relés digitais 1.1 e 1.2, 69.000:115 V, o valor aplicado corresponderá a 69 kV;
- A conexão dos canais de tensão entre a caixa de teste e os relés é feita em estrela;
- Cria-se então, um evento de subtensão trifásica (conforme subseção 7.2.2.1) na LT-1, enquanto a LT-2 é mantida em seu valor nominal. Este evento é mantido por 3 minutos;
- Transcorrido o primeiro minuto é iniciado o 1º ciclo de comutação, implicando em abertura do disjuntor, DJ-1.1, e fechamento do disjuntor, DJ-1.2;
- O evento de subtensão é sustentado nos 2 minutos restantes. Decorrido esse tempo, vê-se que não houve nenhuma mudança no estado atual dos disjuntores. Então, o valor de tensão trifásica da LT-1 é restabelecido ao seu valor nominal, e sustentado por 3 minutos;
- Decorrido o primeiro minuto é iniciado o 2º ciclo de comutação, implicando em abertura do disjuntor DJ-1.2 e fechamento do disjuntor DJ-1.1;
- Após a recomposição os valores de tensão, para ambas as LTs, são mantidos nos 2 minutos restantes. Decorrido esse tempo, observa-se que não houve nenhuma mudança no estado atual dos disjuntores;
- Pode-se constatar êxito na realização do teste.

Tabela 44 – Série de testes relativos ao 1º ciclo de comutação

Teste nº	Evento gerado pela caixa de teste		Ações nos vãos		Resultado
	LT-1	LT-2	Vão 1	Vão 2	
01	Subtensão 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
02	Subtensão 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
03	Subtensão 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
04	Subtensão 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
05	Subtensão 3Ø	Subtensão 3Ø	Abertura do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
06	Tensão Normal 3Ø	Subtensão 3Ø	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
07	Tensão Normal 3Ø	Subtensão 1ØA	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
08	Tensão Normal 3Ø	Subtensão 1ØB	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
09	Tensão Normal 3Ø	Subtensão 1ØC	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
10	Subtensão 3Ø	Subtensão 3Ø, com atraso	Abertura do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
11	Subtensão 3Ø, com atraso	Subtensão 3Ø	Abertura do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
12	Subtensão 3Ø, seguida de interrupção 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
13	Subtensão 1ØA, seguida de interrupção 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
14	Subtensão 1ØB, seguida de interrupção 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
15	Subtensão 1ØC, seguida de interrupção 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
16	Interrupção 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
17	Interrupção 3Ø	Interrupção 3Ø	Abertura do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
18	Interrupção 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
19	Interrupção 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
20	Interrupção 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
21	Tensão Normal 3Ø	Interrupção 3Ø	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
22	Tensão Normal 3Ø	Interrupção 1ØA	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
23	Tensão Normal 3Ø	Interrupção 1ØB	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
24	Tensão Normal 3Ø	Interrupção 1ØC	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito

Tabela 45 – Série de testes relativos ao 2º ciclo de comutação

Teste nº	Evento gerado pela caixa de teste		Ações nos vãos		Resultado
	LT-1	LT-2	Vão 1	Vão 2	
01	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
02	Tensão Normal 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
03	Tensão Normal 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
04	Tensão Normal 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
05	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
06	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
07	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØA	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
08	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØB	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
09	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØC	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
10	Tensão Normal 3Ø (com atraso)	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2; Abertura do DJ-1.2	Êxito
11	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø (com atraso)	Fechamento do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
12	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
13	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
14	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
15	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
16	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
17	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
18	Tensão Normal 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
19	Tensão Normal 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
20	Tensão Normal 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
21	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
22	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØA	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
23	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØB	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
24	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØC	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito

Em ambientes industriais que possuam processos produtivos complexos e sensíveis é de suma importância construir e operar o SEP desta instalação de forma a garantir um fornecimento contínuo de energia dentro de padrões aceitáveis, minimizando, portanto, qualquer interferência por VTLDs.

Neste contexto, a aplicação desenvolvida utilizando a infra-estrutura de comunicação do LSEE (Figura 140), se mostrou estável, eficaz e com elevada confiabilidade para atender o objetivo inicial, sendo que, para todo o conjunto de ensaio os resultados foram os esperados.

Destaca-se, conforme aplicação anterior (subseção 7.1.5), a portabilidade da lógica desenvolvida, que faculta sua utilização em qualquer relé digital comercial que possua elementos dos sistemas digitais, como portas *and*, *or*, *not*, *flip-flops* e temporizadores. Além de um custo atraente, pois as empresas em sua grande maioria já possuem os equipamentos e *softwares* instalados, bem como recurso humano capacitado para desenvolver tal solução.

Figura 140 – Implementação da comutação de LTs no LSSE (EESC/USP), 2007

7.2.5 Comutação de LTs no Contexto do Padrão IEC-61850

A metodologia adotada para especificar a automação da lógica discreta para comutação automática entre fontes de alta tensão mediante emprego do padrão IEC-61850, acompanha os passos apresentados para o controle de *bay*, subseção 7.1.6.

7.2.5.1 Especificação funcional dos vãos segundo o padrão IEC-61850

Esta descrição encarrega-se de delinear as funções de proteção e controle da subestação industrial, neste caso, função 27 e seus estágios (subtensão e interrupção) e a interação entre os LNs, pertinentes a cada IED, conforme ilustra a Figura 141.

Figura 141 – Descrição funcional dos vãos segundo o padrão IEC-61850

A especificação funcional supracitada mostra a interação entre os LNs pertencentes aos IEDs (relés digitais) designados para a proteção, controle e supervisão dos vãos, e aquele encarregado de simular os equipamentos de pátio. No simulador de equipamentos o LN recebe o estado dos disjuntores, DJ-1.1 e DJ-1.2. Esta conjuntura é repassada para o LN do IED correspondente via rede *Ethernet*, para que em conjunto com a função 27, a lógica digital de comutação automática das LTs possa atuar caso se faça necessária.

Como os IEDs utilizados necessitam exclusivamente dos elementos da lógica digital, da interface de comunicação de dados e da função de proteção 27, demais funções de proteção inerentes a cada IED, conforme as descritas na Tabela 2, subseção 1.1.4, foram omitidas da descrição.

7.2.5.2 Topologia física e lógica para a rede de comunicação de dados

Para o caso em estudo foi proposta a topologia física e lógica descrita na Figura 142, conforme aplicação original (subseção 7.2.3), com o acréscimo de um microcomputador tipo IBM PC servindo como console de configuração e retirada de um IED, sendo que o mesmo não proporcionava suporte ao padrão IEC-61850. Neste caso, a função de simulação dos equipamentos de pátio foi transferida para o IED 1.2, sem acrescentar nenhum tipo de prejuízo ao sistema.

Figura 142 – Topologia física e lógica estabelecida

Entre os relés digitais todos os comandos e estados de supervisão dos equipamentos de pátio trafegam utilizando mensagens GOOSE.

7.2.5.3 Requisitos para adaptação física dos equipamentos

A implementação da comutação automática entre fontes de alta tensão valeu-se, inicialmente, do esquema de instalação convencional, cujas conexões para comunicação dos comandos e estados exigem uma instalação ponto a ponto, via cabo metálico rígido, conforme Figura 143, representativa da instalação real do ensaio adotado na subseção 7.2.3.

Figura 143 – Comunicação entre IEDs através de fiação rígida, LSEE (Comutação de LTs), 2007

A topologia adotada na subseção 7.2.5.2 busca atingir um dos objetivos do padrão IEC-61850, que refere-se a redução dos cabos de controle que transportam os sinais de estado, alarmes e comandos pertinentes ao circuito funcional, transferindo esta função para a rede de comunicação.

Como requisito para adaptação física dos equipamentos executou-se a retirada do cabeamento rígido de cobre entre os IEDs e utilização dos cabos UTP Cat. 5e.

7.2.5.4 Necessidade de adaptação das lógicas propostas

Embora as entradas e saídas digitais em *hardware* sejam substituídas por pontos virtuais, descritos posteriormente, não houve mudança nas condições de controle, supervisões ou nas lógicas desenvolvidas.

7.2.5.5 Mapeamento das informações enviadas e recebidas

Além do diagrama funcional é necessário apresentar uma lista dos estados e comandos que serão enviados ou recebidos, para identificar qual IED deverá disponibilizar um determinado tipo de informação e aquele responsável por utilizá-la, conforme a Tabela 46.

Cabe recordar, de acordo com a topologia física e lógica descrita na subseção 7.2.5.2, que a função de simulação dos equipamentos de pátio foi transferida para o IED 1.2, minimizando a quantidade de sinais a serem trocados.

Tabela 46 – Informações a serem enviadas ou recebidas

Tipo de Informação	Comando ou Estado	Dispositivo Transmissor	Dispositivo Receptor
27-U<.1.Trip	Estado	IED 1.1: lógica referente ao ajuste e detecção de subtensão	IED 1.2: entrada da porta <i>and</i> referente a sinalização do <i>led</i> L3
27-U<<.1.Trip	Estado	IED 1.1: lógica referente ao ajuste e detecção de interrupção	IED 1.2: entrada da porta <i>and</i> referente a sinalização do <i>led</i> L6
Acionar BA DJ-1.1	Comando	IED 1.1: lógica referente ao 1º ciclo de comutação, saída da porta <i>and</i>	IED 1.2: lógica referente ao simulador de equipamentos e 1º ciclo de comutação (entrada da porta <i>and</i>)
Ausência de sinais indicativos de subtensão e interrupção	Estado	IED 1.1: lógica referente ao 2º ciclo de comutação (saída da porta <i>and-1</i>)	IED 1.2: lógica referente ao 2º ciclo de comutação (entrada da porta <i>and-2</i>)
Acionar BF DJ-1.1	Comando	IED 1.1: lógica referente ao 2º ciclo de comutação (saída do <i>Timer 4</i>)	IED 1.2: lógica referente ao simulador de equipamentos
27-U<.2.Trip	Estado	IED 1.2: lógica referente ao ajuste e detecção de subtensão	IED 1.1: entrada da porta <i>and</i> referente a sinalização do <i>led</i> L3
27-U<<.2.Trip	Estado	IED 1.2: lógica referente ao ajuste e detecção de interrupção	IED 1.1: entrada da porta <i>and</i> referente a sinalização do <i>led</i> L6
Acionar BA DJ-1.2	Comando	IED 1.2: lógica referente ao 2º ciclo de comutação (saída da porta <i>or-2</i>)	IED 1.1: lógica referente ao 2º ciclo de comutação (entrada da porta <i>and-2</i>)
DJ-1.2 Aberto	Estado	IED 1.2: lógica referente ao simulador de equipamentos	IED 1.1: lógica referente ao 2º ciclo de comutação (entrada da porta <i>and-2</i>)
DJ-1.1 Aberto	Estado	IED 1.2: lógica referente ao simulador de equipamentos	IED 1.1: sinalização do <i>led</i> L7
DJ-1.1 Fechado	Estado	IED 1.2: lógica referente ao simulador de equipamentos	IED 1.1: sinalização do <i>led</i> L8

7.2.5.6 Tipo de nó lógico (LN) utilizado

Por tratar-se de uma aplicação laboratorial, com a simulação dos equipamentos de pátio através do uso exclusivo de sinais discretos (atributo booleano) é possível utilizar o LN genérico GGIO. Uma exposição circunstanciada do LN GGIO foi descrita na subseção 7.1.6.6.

Na aplicação em menção, o nó lógico GGIO utiliza dados de indicação geral (*Ind*) referentes ao estado dos disjuntores (DJ-1.1 e DJ-1.2), estágios de subtensão (U<, *Trip*) e interrupção (U<<, *Trip*), e comandos de acionamento das bobinas de abertura e fechamento (BA e BF).

7.2.5.7 Descrição do serviço de interface de comunicação abstrata (ASCI)

Dentre os modelos descritos na subseção 5.7.1, a comutação automática entre fontes de alta tensão utilizará o modelo *Data-Set*, que permite o agrupamento de dados e atributos utilizados para acesso direto entre IEDs.

7.2.5.8 Descrição da classe de dados comum (CDC)

Conforme já exposto, os atributos do LN GGIO são do tipo booleano com funcionalidade construtiva de estado (ST). Na subseção 5.7.2, Tabela 20, é possível abstrair a CDC em que o nó lógico está associado: SPS (*Single Point Status*). A Tabela 35 evidencia o trecho da classe de dados comum SPS que identifica os atributos do dado *Ind*, conforme descreve a parte 7.3 do padrão IEC-61850.

7.2.5.9 Identificação da anatomia do nó lógico GGIO

A Tabela 36 detalha a anatomia do LN GGIO, e corrobora a função de informação de estado e pertencimento a classe de dados comum SPS.

7.2.5.10 Tipo de mensagem

As mensagens trocadas entre os IEDs na aplicação que está em ato têm restrição quanto a atrasos, pois são indicativas de estado e ações a serem realizadas pelos equipamentos de pátio (DJ-1.1 e DJ-1.1), com influência direta nas lógicas de controle e supervisão das LTs. O padrão IEC-61850 parte 8.1 descreve que estas mensagens são do tipo 1 (mensagens rápidas) e 1A (*trip*), classificadas como mensagens GOOSE.

7.2.5.11 *DataSet* e anatomia geral do objeto

A anatomia geral dos objetos do padrão IEC-61850 para a aplicação de comutação entre LTs segue a lógica do controle de *bay*:

- $IED_{x.vão} \cdot LD_{y.vão} \cdot GGIO_m \cdot ST \cdot Ind_n \cdot q$

Este ajuste indica um atributo de qualidade (q , *quality*) para o dado de indicação geral (*Ind*), que especifica uma entrada binária com funcionalidade construtiva de estado (ST), pertencente ao nó lógico GGIO. Este nó lógico está acoplado a um dado dispositivo lógico (LD) que, por sua vez, está inserido em um dispositivo físico (IED).

- $IED_{x.v\grave{a}o}.LD_{y.v\grave{a}o}.GGIO_m.ST.Ind_n.stVal$

Ajuste que indica um atributo com valor booleano de estado (*stVal*), relativo aos pontos de entrada e saída nas lógicas de controle, supervisão e simulação, para o dado de indicação geral (*Ind*). A funcionalidade construtiva deste dado é de estado (ST) e pertencente ao nó lógico GGIO. Este nó lógico está acoplado a um dado dispositivo lógico (LD) que, por sua vez, está inserido em um dispositivo físico (IED).

Onde: $x, y, v\grave{a}o, m, n \in \mathbb{N}$.

Cabe rememorar que estas informações configuram o *DataSet* de transmissão com atributos de qualidade e valores de estado (nível lógico 0 ou 1) e, o *DataSet* no IED receptor deverá conter a estrutura de configuração do *DataSet* pertinente ao IED transmissor [106].

7.2.5.12 Configuração do serviço de mensagens GOOSE

A Tabela 47 determina a configuração inicial de pontos necessários ao adequado desempenho do serviço de mensagens GOOSE nos IEDs.

Tabela 47 – Configuração do serviço de mensagens GOOSE

Pontos Vitais	IED 1.1	IED 1.2
1	Habilitado	Habilitado
2	GOOSE_IED_1	GOOSE_IED_2
3	01-0C-CD-01-00-04	01-0C-CD-01-00-04
4	VLAN ID 1	VLAN ID 1
5	4	4
6	1	1

Sendo:

1. Habilitar o serviço de mensagens GOOSE;
2. Atribuir um nome para o serviço de mensagens GOOSE. Recomenda-se utilizar um nome auto-descritivo;
3. Ajustar um endereço de *multicast*;
4. Configurar o identificador da VLAN (o *switch* deve reconhecer este parâmetro);
5. Configurar um valor de prioridade para as mensagens enviadas (o *switch* deve reconhecer este parâmetro);
6. Ajustar o atributo *ConfRev*, representativo do número de vezes que a configuração do *DataSet* foi alterada. Este ajuste é explicado em detalhes na parte 7.2 do padrão IEC-61850.

7.2.5.13 Atribuição da estrutura de dados às lógicas desenvolvidas

Conforme subseção 7.2.5.4 as entradas e saídas digitais em *hardware*, descritas pelas conexões elétricas (Figura 143) são substituídas por pontos virtuais, via *software* do relé digital, não ocorrendo mudanças nas condições de proteção, controle, sinalização ou nas lógicas desenvolvidas.

Com base nas condições operacionais e seções anteriores, torna-se possível atribuir a estrutura de dados de cada LN GGIO aos pontos virtuais de entrada e saída, conforme Tabela 48 e Tabela 49.

Tabela 48 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais do IED 1.1

Tipo de informação IED 1.1	Local de referência na lógica IED 1.1	Ponto virtual IED 1.1	Estrutura de dados do nó lógico GGIO, originada no IED _{x,vão}
27-U<.1.Trip	Lógica referente ao ajuste e detecção de subtensão	Saída Virtual 01	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
27-U<<.1.Trip	Lógica referente ao ajuste e detecção de interrupção	Saída Virtual 02	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
Acionar BA DJ-1.1	Lógica referente ao 1º ciclo de comutação, saída da porta <i>or</i>	Saída Virtual 03	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
Acionar BA DJ-1.1	Lógica referente ao 1º ciclo de comutação, saída da porta <i>or</i>	Saída Virtual 04	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
Ausência de sinais indicativos de subtensão e interrupção	Lógica referente ao 2º ciclo de comutação (saída da porta <i>and-1</i>)	Saída Virtual 05	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
Acionar BF DJ-1.1	Lógica referente ao 2º ciclo de comutação (saída do <i>Timer 4</i>)	Saída Virtual 06	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal
Indicação que o DJ-1.2 está aberto	Lógica referente ao 2º ciclo de comutação (entrada da porta <i>and-2</i>)	Entrada Virtual 01	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
Acionamento da BA DJ-1.2	Lógica referente ao 2º ciclo de comutação (entrada da porta <i>and-2</i>)	Entrada Virtual 02	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
27-U<.2.Trip	Entrada da porta <i>and</i> referente a sinalização do <i>led</i> L3	Entrada Virtual 03	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
27-U<<.2.Trip	Entrada da porta <i>and</i> referente a sinalização do <i>led</i> L6	Entrada Virtual 04	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
DJ-1.1 Aberto	Sinalização <i>Led</i> L7	Entrada Virtual 05	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
DJ-1.1 Fechado	Sinalização <i>Led</i> L8	Entrada Virtual 06	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal

Tabela 49 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais do IED 1.2

Tipo de informação IED 1.2	Local de referência na lógica IED 1.2	Ponto virtual IED 1.2	Estrutura de dados do nó lógico GGIO, originada no IED _{x,vão}
DJ-1.2 Aberto	Lógica referente ao simulador de equipamentos de pátio (DJ-1.2)	Saída Virtual 01	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
Acionar BA DJ-1.2	Lógica referente ao 2º ciclo de comutação (saída da porta <i>or-2</i>)	Saída Virtual 02	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
27-U<.2. <i>Trip</i>	Lógica referente ao ajuste e detecção de subtensão	Saída Virtual 03	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
27-U<<.2. <i>Trip</i>	Lógica referente ao ajuste e detecção de interrupção	Saída Virtual 04	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
DJ-1.1 Aberto	Lógica referente ao simulador de equipamentos de pátio (DJ-1.1)	Saída Virtual 05	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
DJ-1.1 Fechado	Lógica referente ao simulador de equipamentos de pátio (DJ-1.1)	Saída Virtual 06	IED _{1.2} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal
27-U<.1. <i>Trip</i>	Entrada da porta <i>and</i> referente a sinalização do <i>led</i> L3	Entrada Virtual 01	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
27-U<<.1. <i>Trip</i>	Entrada da porta <i>and</i> referente a sinalização do <i>led</i> L6	Entrada Virtual 02	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
Acionar BA DJ-1.1	Lógica referente ao 1º ciclo de comutação, entrada da porta <i>and</i>	Entrada Virtual 03	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
Acionar BA DJ-1.1	Lógica referente ao simulador de equipamentos de pátio: <i>Reset (R) Flip-Flop</i> DJ-1.1	Entrada Virtual 04	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
Ausência de sinais indicativos de subtensão e interrupção	Lógica referente ao 2º ciclo de comutação (entrada da porta <i>and-2</i>)	Entrada Virtual 05	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
Acionar BF DJ-1.1	Lógica referente ao simulador de equipamentos de pátio: <i>Set (S) Flip-Flop</i> DJ-1.1	Entrada Virtual 06	IED _{1.1} .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal

Com base nas informações enviadas e recebidas, e a descrição de atribuição da estrutura de dados, Tabela 48 e Tabela 49, torna-se possível um mapeamento para as lógicas desenvolvidas, como, por exemplo, a função de proteção 27 (Figura 144) e 1º ciclo de comutação (Figura 145).

Figura 144 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica: função de proteção 27

Figura 145 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica: 1º ciclo de comutação

Como exemplo, a saída da porta *or* (Figura 145) tem conexão via *software* com a saída virtual 03 e 04. Quando a saída virtual 03 é acionada (*Trip* por subtensão ou interrupção),

um sinal booleano, *bit* 1, é vinculado ao atributo *stVal* do dado Ind_3 , pertencente ao nó lógico GGIO₁. Este nó lógico está acoplado ao dispositivo lógico, LD₁, pertinente ao dispositivo físico, IED_{1.1}. Embora tenham sido utilizadas duas saídas virtuais após a porta *or*, com a intenção de facilitar esta análise, seria possível a existência de apenas um ponto virtual, que atribuído ao dado Ind_n , seria enviado para alvos distintos, simultaneamente.

O objeto composto, IED_{1.1}.LD₁.GGIO₁.ST.Ind₃.stVal, será enviado como uma mensagem GOOSE para o IED_{1.2}, assinalando nível lógico 1 na entrada virtual 03. Este sinal é um dos quesitos para operação do *Timer 3* (IED 1.2), que controla o 1º ciclo de comutação referente ao vão 2.

O comportamento global de atribuição dos dados para as lógicas do 2º ciclo de comutação (Figura 146), sinalizações (Figura 147) e simulador de equipamentos de pátio (Figura 148) é similar ao desenvolvido para a lógica da função 27 e 1º ciclo de comutação.

Figura 146 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica: 2º ciclo de comutação

Por uma questão de simplicidade foram apresentadas na Figura 147 apenas as sinalizações referentes ao IED 1.1 (LT-1, vão 1), ressalta-se que as sinalizações para o relé IED 1.2 (LT-2, vão 2), tratam dos mesmos fenômenos. Compete lembrar que as sinalizações dos *Leds* L3 e L6 tratam de eventos de subtensão e interrupção, respectivamente, ocorridos

concomitantemente em ambas as LTs. As demais sinalizações referem-se a eventos ocorridos na LT, ou dispositivos do vão local.

Figura 147 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para a lógica: sinalização

Figura 148 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO: simulador (DJ-1.1 e DJ-1.2)

7.2.5.14 Testes realizados no contexto do padrão IEC-61850

Uma série abrangente de testes foi realizada, agora no contexto do padrão IEC-61850. Tal conjunto de verificação foi composto por subtensões e interrupções trifásicas e

monofásicas, geradas pela caixa de teste e aplicadas em cada uma das LTs em diversas combinações, vindo a caracterizar uma gama de situações representativas de defeito e operação pelas quais o sistema em estudo poderia passar. Os resultados dos testes podem ser observados na Tabela 50 e Tabela 51.

O Teste 01 será utilizado como exemplo de condução dos ensaios realizados:

- Inicialmente aplica-se via caixa de teste, tensões trifásicas nominais aos IEDs 1.1 e 1.2, simulando as fontes de alimentação em alta tensão, LT-1 e LT-2, provenientes de subestações distintas;
- Tais valores correspondem a 66,4 V aplicados a 60 Hz e em sequência positiva. Este valor é mantido por 1 minuto;
- Para o valor da relação de transformação de potencial utilizado nos IEDs 1.1 e 1.2, 69.000:115 V, o valor aplicado corresponderá a 69 kV;
- A conexão dos canais de tensão entre a caixa de teste e os IEDs é feita em estrela;
- Cria-se então, um evento de subtensão trifásica (conforme subseção 7.2.2.1) na LT-1, enquanto a LT-2 é mantida em seu valor nominal. Este evento é mantido por 3 minutos;
- Transcorrido o primeiro minuto é iniciado o 1º ciclo de comutação, o que implica na abertura do disjuntor, DJ-1.1, e fechamento do disjuntor, DJ-1.2, com transmissão e recepção de mensagens GOOSE entre os IEDs;
- O evento de subtensão é sustentado nos 2 minutos restantes. Decorrido esse tempo, vê-se que não houve nenhuma mudança no estado atual dos disjuntores. Então, o valor de tensão trifásica da LT-1 é restabelecido ao seu valor nominal, e sustentado por 3 minutos;
- Decorrido o primeiro minuto é iniciado o 2º ciclo de comutação, o que implica em abertura do disjuntor DJ-1.2 e fechamento do disjuntor DJ-1.1;
- Após a recomposição, os valores de tensão, para ambas as LTs, são mantidos nos 2 minutos restantes. Decorrido esse tempo, observa-se que não houve nenhuma mudança no estado atual dos disjuntores;
- Pode-se constatar êxito na realização do teste.

Tabela 50 – Série de testes relativos ao 1º ciclo de comutação, via mensagens GOOSE

Teste nº	Evento gerado pela caixa de teste		Ações nos vãos		Resultado
	LT-1	LT-2	Vão 1	Vão 2	
01	Subtensão 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
02	Subtensão 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
03	Subtensão 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
04	Subtensão 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
05	Subtensão 3Ø	Subtensão 3Ø	Abertura do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
06	Tensão Normal 3Ø	Subtensão 3Ø	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
07	Tensão Normal 3Ø	Subtensão 1ØA	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
08	Tensão Normal 3Ø	Subtensão 1ØB	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
09	Tensão Normal 3Ø	Subtensão 1ØC	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
10	Subtensão 3Ø	Subtensão 3Ø, com atraso	Abertura do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
11	Subtensão 3Ø, com atraso	Subtensão 3Ø	Abertura do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
12	Subtensão 3Ø, seguida de interrupção 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
13	Subtensão 1ØA, seguida de interrupção 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
14	Subtensão 1ØB, seguida de interrupção 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
15	Subtensão 1ØC, seguida de interrupção 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
16	Interrupção 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
17	Interrupção 3Ø	Interrupção 3Ø	Abertura do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
18	Interrupção 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
19	Interrupção 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
20	Interrupção 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Abertura do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2	Êxito
21	Tensão Normal 3Ø	Interrupção 3Ø	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
22	Tensão Normal 3Ø	Interrupção 1ØA	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
23	Tensão Normal 3Ø	Interrupção 1ØB	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
24	Tensão Normal 3Ø	Interrupção 1ØC	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito

Tabela 51 – Série de testes relativos ao 2º ciclo de comutação, via mensagens GOOSE

Teste nº	Evento gerado pela caixa de teste		Ações nos vãos		Resultado
	LT-1	LT-2	Vão 1	Vão 2	
01	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
02	Tensão Normal 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
03	Tensão Normal 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
04	Tensão Normal 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
05	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
06	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
07	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØA	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
08	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØB	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
09	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØC	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
10	Tensão Normal 3Ø (com atraso)	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Fechamento do DJ-1.2; Abertura do DJ-1.2	Êxito
11	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø (com atraso)	Fechamento do DJ-1.1	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
12	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
13	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
14	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
15	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
16	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
17	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
18	Tensão Normal 1ØA	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
19	Tensão Normal 1ØB	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
20	Tensão Normal 1ØC	Tensão Normal 3Ø	Fechamento do DJ-1.1	Abertura do DJ-1.2	Êxito
21	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 3Ø	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
22	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØA	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
23	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØB	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito
24	Tensão Normal 3Ø	Tensão Normal 1ØC	DJ-1.1 continuou fechado	DJ-1.2 continuou aberto	Êxito

É adequado rememorar que as subtensões e interrupções trifásicas e monofásicas, geradas pela caixa de teste e aplicadas em cada uma das LTs (IED 1.1 e IED 1.2) em diversas combinações, vêm a caracterizar uma gama de situações representativas de defeito e operação pelas quais o sistema em estudo poderia passar.

Houve em 100% dos casos evidenciados, correta recepção dos comandos via mensagem GOOSE, conseqüente execução das lógicas e obediência às ações de comutação automática entre fontes de alta tensão entre os vãos 1 e 2.

Através dos resultados obtidos, percebe-se a estabilidade e eficiência das lógicas implementadas e da metodologia posta em prática para migração adotando o padrão IEC-61850 como protocolo de comunicação e a rede *Ethernet* em substituição à fiação paralela, utilizada para transmissão de comandos e estados entre os níveis de processo e *bay*.

Os resultados obtidos refletiram no ambiente do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica demandas solicitadas por subestações reais, agora utilizando o padrão IEC-61850, conforme ilustra a Figura 149.

Figura 149 – Comunicação entre IEDs com o padrão IEC-61850, LSEE (Comutação LTs), 2008

7.2.5.15 Análise do atraso de propagação de mensagens

Como característica de desempenho da rede de comunicação, o tempo de atraso na propagação de mensagens foi monitorado durante a série de testes relativos ao 1º e 2º ciclos de comutação. Consideraram-se os tempos de propagação das mensagens de abertura e fechamento do DJ-1.1 para o simulador de equipamentos de pátio, durante 4 ciclos de comutação.

Inicialmente, valeu-se do arranjo de ensaio e esquema de instalação convencional (subseção 7.2.3), cujas conexões para comunicação dos comandos e estados exigem uma instalação ponto a ponto, via cabo metálico de cobre com classe de isolamento para baixa tensão. Podem-se resumir as particularidades dos elementos constituintes da referida estrutura, como:

- Tensão contínua aplicada pela caixa de teste: ± 125 Vdc;
- Tensão alternada aplicada pela caixa de teste conforme Tabela 50 e Tabela 51;
- Condutor metálico de cobre: 2,5 mm;
- Comprimento dos condutores metálicos de cobre entre os IEDs: 30 m;
- Tempo necessário para sensibilização das saídas utilizadas pelo IED 1.1: 6 ms;
- Velocidade de atualização das saídas utilizadas pelo IED 1.1: 1/8 ciclo;
- Velocidade de atualização das entradas utilizadas pelo simulador de equipamentos de pátio: 1/16 ciclo;
- Carga típica suportada pelas entradas utilizadas pelo simulador de equipamentos de pátio: 0,24 W @ 125 Vdc.

Os tempos entre a sensibilização das saídas digitais do IED 1.1 e as entradas digitais do IED 1.2 foram coletados através do registro seqüencial de eventos dos referidos IEDs, conforme mostra a Tabela 52.

Tabela 52 – Tempos entre a sensibilização das saídas e entradas digitais, via fiação paralela

Ciclo de Comutação	Tipo de Informação	IED 1.1		Simulador dos Equipamentos de Pátio	
		Estampa de Tempo da Saída Digital (h:m:s)	Saída Digital (vide Figura 139)	Estampa de Tempo da Entrada Digital (h:m:s)	Entrada Digital (vide Figura 139)
1 ^o	Abrir DJ-1.1	15:04:33.224	[01]	15:04:33.232	(02)
2 ^o	Fechar DJ-1.1	15:10:37.561	[04]	15:10:37.569	(01)
1 ^o	Abrir DJ-1.1	15:16:41.899	[01]	15:16:41.907	(02)
2 ^o	Fechar DJ-1.1	15:22:46.236	[04]	15:22:46.244	(01)
1 ^o	Abrir DJ-1.1	15:28:50.574	[01]	15:28:50.582	(02)
2 ^o	Fechar DJ-1.1	15:34:54.911	[04]	15:34:54.919	(01)
1 ^o	Abrir DJ-1.1	15:40:59.249	[01]	15:40:59.257	(02)
2 ^o	Fechar DJ-1.1	15:46:03.586	[04]	15:46:03.594	(01)

Considerando o comando para abertura do DJ-1.1 no primeiro ciclo de comutação, pode-se descrever:

- A atuação do estágio de subtensão 27-U<.1.Trip e/ou de interrupção 27-U<<.1.Trip no IED 1.1 implicou em abertura imediata do disjuntor DJ-1.1, e sensibilização da saída digital 01, na estampa de tempo: 15:04:33.224 (h:m:s);
- Após 8 ms a entrada digital 02, IED 1.2, conectada via condutor metálico de 2,5 mm e 30 m de comprimento ao IED 1.1, saída digital 01, foi sensibilizada com a seguinte estampa de tempo: 15:04:33.232 (h:m:s).

Na Tabela 52, percebe-se que todas as medidas executadas, considerando os parâmetros dos elementos constituintes da referida estrutura, obtiveram como resultado 8 ms de atraso na propagação dos comandos, mesmo resultado do controle de *bay*.

Já no contexto do padrão IEC-61850 utilizou-se a topologia física e lógica da rede de comunicação de dados descrita na subseção 7.2.5.2. Podem-se sintetizar as características dos elementos constituintes da referida topologia, como:

- Os IEDs foram conectados via um *switch* não-gerenciável;
- Portas com velocidade de 100 Mbps;
- Cabeamento UTP Cat. 5e com 5 m de extensão;
- Configuração do serviço de mensagens GOOSE conforme subseção 7.2.5.12;
- O mapeamento das atribuições de dados do nó lógico GGIO aos pontos virtuais nos IEDs obedece a subseção 7.2.5.13.

Os tempos entre a sensibilização das saídas virtuais do IED 1.1 e as entradas virtuais do simulador de equipamentos de pátio foram coletados através do registro seqüencial de eventos dos referidos IEDs, conforme explicita a Tabela 53.

Tabela 53 – Tempos entre a sensibilização das saídas e entradas virtuais, via mensagens GOOSE

Ciclo de Comutação	Tipo de Informação	IED 1.1		Simulador dos Equipamentos de Pátio	
		Estampa de Tempo da Saída Virtual (h:m:s)	Saída Virtual (vide Tabela 48)	Estampa de Tempo da Entrada Virtual (h:m:s)	Entrada Virtual (vide Tabela 49)
1 ^o	Abrir DJ-1.1	16:00:12.262	04	16:00:12.265	04
2 ^o	Fechar DJ-1.1	16:06:16.599	06	16:06:16.605	06
1 ^o	Abrir DJ-1.1	16:12:20.937	04	16:12:20.940	04
2 ^o	Fechar DJ-1.1	16:18:25.274	06	16:18:25.280	06
1 ^o	Abrir DJ-1.1	16:24:29.612	04	16:24:29.615	04
2 ^o	Fechar DJ-1.1	16:30:33.949	06	16:30:33.955	06
1 ^o	Abrir DJ-1.1	16:36:38.287	04	16:36:38.290	04
2 ^o	Fechar DJ-1.1	16:42:42.624	06	16:42:42.628	06

Reconsiderando o comando para abertura do DJ-1.1 no primeiro ciclo de comutação, pode-se descrever:

- A atuação do estágio de subtensão 27-U<.1.Trip e/ou de interrupção 27-U<<.1.Trip no IED 1.1 implicou em abertura imediata do disjuntor DJ-1.1, e sensibilização da saída virtual 04, na estampa de tempo: 16:00:12.262 (h:m:s);
- Após 3 ms a entrada virtual 04, simulador de equipamentos de pátio, foi sensibilizada através da recepção de uma mensagem GOOSE, via rede *Ethernet*, com a seguinte estampa de tempo: 16:00:12.265 (h:m:s).

Através da Tabela 53, percebe-se que o atraso médio de propagação entre transmissão e recepção de mensagens GOOSE, considerando os 4 ciclos de comutação foi de 4,25 ms.

A Figura 150 mostra que a admissão do padrão IEC-61850 como protocolo de comunicação e a rede *Ethernet* em substituição a fiação paralela, possibilitou a diminuição do atraso de propagação de comandos entre os níveis de processo e *bay* em 3,75 ms (valor médio).

Figura 150 – Atraso de propagação entre fiação paralela e mensagens GOOSE, controle de *bay*

Como exemplo, a primeira barra vertical em azul exprime o atraso de propagação para o comando de abertura do DJ-1.1 (8 ms), utilizando fiação paralela. A primeira barra vertical em vermelho revela o atraso de propagação para o mesmo comando, porém utilizando mensagem GOOSE (3 ms) entre o IED 1.1 e o simulador de equipamentos de pátio. Cabe lembrar que estes tempos consideram o momento de sensibilização das saídas e entradas, digitais ou virtuais, absorvendo o tempo de processamento gasto pelo *switch* (quando do envio de mensagens GOOSE) e desconsiderando os tempos de processamento dos IEDs.

7.3 Monitoramento Temporal e Extravio de Mensagens GOOSE

A presente seção tem por objetivo avaliar o comportamento no tempo de mensagens do tipo GOOSE em condições distintas de tráfego e de configuração da topologia lógica da rede de comunicação de dados, além de monitorar um possível extravio entre as mensagens geradas por um emissor e aquelas recebidas por um ou mais destinatários. Foram definidos dois cenários de operação (descritos na subseção 7.3.3), sendo que em cada um desses variou-se parâmetros, tais como: tráfego e topologia lógica da rede.

7.3.1 Requisitos da Rede de Comunicação

Um dos principais requisitos das redes de comunicação de dados e módulos processadores é garantir a alta qualidade dos serviços (QoS). Quando se usa esse termo em um sentido amplo o conceito QoS inclui todas as possíveis propriedades da rede e de seus serviços desejáveis. Neste íterim, as características de QoS para os serviços de transporte de dados num ambiente, como, por exemplo, de uma subestação do sistema elétrico, devem possibilitar a transmissão de informações a uma taxa específica (desempenho), sem perdas ou atrasos no serviço (confiabilidade) e garantia contra acessos não autorizados ou falsificações (segurança) [75].

Cada característica mencionada abre um leque de possibilidades para análise da rede de comunicação. Para atingir o objetivo referido no início desta seção, o foco recai sobre as características de atraso dos pacotes, aqui entendidos como mensagens GOOSE, e a característica de perda destas mensagens, ou seja, desempenho e confiabilidade, respectivamente, tópicos elucidados na seção 4.7.

7.3.2 Estrutura Laboratorial

Para o estudo proposto valeu-se da estrutura laboratorial do LSEE, configurada com três IEDs, neste estudo relés digitais comerciais, dois *switches* gerenciáveis, dois conversores de mídia, três microcomputadores do tipo IBM PC, cordões e bobina de fibra óptica, cabos do tipo par trançado e um relógio GPS para sincronismo das estampas de tempo, como mostra a Figura 151.

A referida estrutura simula duas subestações de energia elétrica, conectadas através de um enlace em fibra óptica com 20 km de extensão.

Figura 151 – Configuração da estrutura laboratorial, LSEE

A Tabela 54 sintetiza as peculiaridades dos elementos constituintes da referida estrutura.

Tabela 54 – Principais características dos elementos constituintes da estrutura laboratorial

Equipamento	Descrição	
IED 1	Relé digital de proteção com capacidade de controle, comunicação via porta óptica de rede com velocidade nominal 10 Mbps e suporte ao padrão IEC-61850	
IED 2 e 3	Relé digital de proteção com capacidade de controle, comunicação via porta óptica de rede com velocidade nominal 100 Mbps e suporte ao padrão IEC-61850	
Switches gerenciáveis	Placa <i>Ethernet</i> 10 Mbps	14880 pps (pacotes por segundo)
	Placa <i>Fast Ethernet</i> 100 Mbps	148800 pps
	Conectores de fibra multimodo	Porta de fibra, tipo ST (<i>twist-lock</i>): fibra multimodo, 10 Mbps, 10Base-FL Porta de fibra, tipo ST (<i>twist-lock</i>): fibra multimodo, 100 Mbps, 100Base-FX
	Processamento	Armazenamento e envio com IEEE 802.3x, <i>full-duplex, no-blocking</i>
	Tamanho do <i>buffer</i> de pacotes	240 KB para 10/100 Mbps
	Padrões de rede	<i>Ethernet</i> v1.0/v2.0 IEEE 802.3: <i>10Base-T</i> IEEE 802.3u: <i>100Base-TX</i> , <i>100Base-FX</i> IEEE 802.1p: <i>Priority protocol</i> IEEE 802.1d: <i>Spanning tree protocol</i> IEEE 802.1q: <i>VLAN tagging</i> IEEE 802.3x: <i>Flow control</i>
	Certificado	Em conformidade com a IEC-61850-3 para condições mecânicas, climática e imunidade a EMC (Compatibilidade Eletromagnética) Equipamento classe C em conformidade com a IEC 870-2-2
Conversores de Mídia	Conversor de fibra óptica multimodo para monomodo (taxa de transmissão de 1,25 Gbps; comprimento de onda de saída 1310 nm; potência óptica de saída -3 dBm; sensibilidade -30 dBm)	
Microcomputador	Três microcomputadores do tipo IBM PC com placa de rede <i>Ethernet</i> 100 Mbps com interface RJ-45	
Simulador	Simulador de sistemas de potência hexafásico, com canais de corrente, tensão e placa de rede <i>Ethernet</i> 10 Mbps	
Relógio GPS	Sincronismo de tempo através de sinal IRIG-B	
Cordões em fibra óptica	Cordões entre o IED 1 e o <i>switch</i> 2 em 850 nm; Cordões entre os IEDs 2 e 3 e o <i>switch</i> 1 em 1.310 nm	
Bobina em fibra óptica	Bobina em fibra óptica monomodo (1.310 nm) com 20 km de comprimento	
Cabo Metálico	Cabo do tipo par trançado UTP Cat. 5e	

7.3.3 Cenários Operativos

Sobre a estrutura laboratorial apresentada na subseção 7.3.2 serão estabelecidos dois cenários operativos para avaliar o comportamento no tempo das mensagens GOOSE. Esses cenários são descritos a seguir.

7.3.3.1 Cenário 1

Um passo inicial para o estabelecimento de cada cenário é a definição da configuração lógica realizada sobre a estrutura física apresentada (Figura 151). Neste caso foi instituída uma VLAN que engloba os IEDs 1, 2 e 3, os microcomputadores tipo IBM PC, o simulador de sistemas de potência, além dos *switches* 1 e 2. A Figura 152 apresenta o cenário 1, sendo que a área sombreada em azul representa a VLAN caracterizada.

Os microcomputadores realizam as seguintes funções:

- Console de configuração dos IEDs e *switches*;
- Gerador de tráfego extra, denominado gerador de *bits*;
- Analisador de rede, para monitorar o tráfego de portas específicas do *switch* 1.

Este cenário representa uma situação operativa na qual os IEDs de proteção, o console de configuração e outros microcomputadores de uma rede corporativa fazem parte da mesma VLAN. Através do serviço de mensagem GOOSE o IED 1 gera informações da proteção a serem utilizadas pelos IEDs 2 e 3, desempenhando uma função de interesse qualquer, por exemplo, a transmissão de um sinal de *trip* ou, o estabelecimento dos intertravamentos entre chaves e disjuntores de alta tensão numa subestação do SEP.

Em outra vertente, um tráfego de dados extra na rede de comunicação, pode ter origem em um ataque intruso ou através do comportamento deletério de um programa com funcionamento anômalo presente nos microcomputadores existentes na rede corporativa (com acesso a VLAN). Isso pode afetar a integridade das mensagens GOOSE utilizadas pela proteção. Função esta efetuada pelo gerador de *bits*, com utilização do aplicativo de *software* *WAN Killer*[®] [112], versão 9.2.0.47 (Figura 153).

O tráfego de dados provocado pelo gerador de *bits* foi direcionado somente ao IED 2, sendo que o microcomputador designado como analisador de rede teve a função de monitorar a porta do IED 2 via *switch* 1, como garantia de que o tráfego extra e as mensagens GOOSE estavam sendo recebidas. Função esta efetuada pelo aplicativo de *software* *SNMP Real-Time Graph*[®] [112], versão 9.2.0.47.

Figura 152 – Configuração do cenário operativo 1

Figura 153 – Aplicativo de *software* WAN Killer®, versão 9.2.0.47

No *switch* a porta monitorada tem a funcionalidade denominada *Port Mirror*, e a porta onde o analisador de redes foi conectado, espelho.

Uma vez que esta funcionalidade (*Port Mirror*) for ativada, todo o tráfego oriundo ou destinado à porta monitorada será refletido na porta espelho, sem modificar as características físicas do segmento de rede [113], conforme ilustra a Figura 154 para um tráfego extra de 15 Mbps.

Figura 154 – Tráfego extra, coletado pelo *software* SNMP Real-Time Graph®, versão 9.2.0.47

Compete salientar que a Figura 153 e Figura 154 não detalham o mesmo evento.

O tráfego criado pelo gerador de *bits* utilizou o protocolo da camada de transporte, UDP (*User Datagram Protocol*). A escolha desse protocolo se deve ao fato do mesmo não necessitar do estabelecimento de uma conexão com o destinatário antes do envio das mensagens e conseqüente confirmação de entrega para continuar transmitindo. Cada pacote enviado foi configurado com tamanho igual a 1496 *bytes* (Figura 153). A quantidade de pacotes por segundo gerados foi ajustada de tal forma que representasse certo carregamento percentual da velocidade nominal do enlace, neste caso 100 Mbps.

Posto isto, foram geradas mensagens GOOSE advindas do IED 1 com destino aos IEDs 2 e 3 em distintas condições de tráfego extra na rede. Foi realizado o monitoramento temporal das mensagens enviadas e recebidas por todos os IEDs através do registro seqüencial de eventos produzidos por cada um deles.

Cabe dizer que esses equipamentos estão sincronizados no tempo através de um sinal IRIG-B, do relógio GPS contido na estrutura laboratorial. Esses registros constituirão a base de informações para análise posterior desse cenário, com a intenção de evidenciar a influência do carregamento extra na rede de comunicação quando da atuação do sistema de proteção, sendo que, para determinadas funções da proteção o tempo de entrega da mensagem, o extravio ou descarte da mesma são quesitos que impactam diretamente no seu desempenho.

Uma mudança acentuada no tempo esperado de recebimento da informação, o qual é determinado pelos ajustes da proteção pertinentes para uma dada situação, pode implicar, por exemplo, que um defeito no SEP permaneça por um tempo maior do que o máximo permissível, definido para um elemento que o compõe, resultando, por fim, em dano irreversível ao mesmo. O não recebimento de uma informação da proteção é ainda mais danoso, pois pode desencadear um efeito cascata sobre o SEP, levando-o para uma situação de instabilidade.

O simulador de sistemas de potência foi utilizado apenas para energizar com tensão contínua dois alarmes sonoros. O primeiro deles indica o término de um teste individual, já o segundo marca o final de um conjunto de testes. A geração desses testes será detalhada na subseção 7.3.4. A Tabela 55 apresenta as configurações aplicadas a esse cenário.

Tabela 55 – Configurações gerais para o cenário 1

Elemento	Descrição			
IED 1	Envia duas informações GOOSE através de uma lógica digital implementada neste equipamento			
IEDs 2 e 3	Recebem duas informações GOOSE advindas do IED 1			
<i>Switch 1</i>	VLAN 1	VLAN configurada com a técnica de agrupamento de portas (<i>Port VLAN</i>)	Todas as portas do <i>switch 1</i>	Prioridade do usuário, baixa (ou alta)
<i>Switch 2</i>	VLAN 1	VLAN configurada com a técnica de agrupamento de portas (<i>Port VLAN</i>)	Todas as portas do <i>switch 2</i>	Prioridade do usuário, baixa (ou alta)
Simulador	Tensão contínua configurada para 6 V para suprir a alimentação dos alarmes sonoros.			

7.3.3.2 Cenário 2

Para este cenário foram criadas duas VLANs, conforme ilustra a Figura 155.

Figura 155 – Configuração do cenário de rede 2

A VLAN 1, representada pela área sombreada em azul, engloba o console de configuração, o analisador de rede, o gerador de *bits*, o simulador de sistemas de potência e o enlace de comunicação entre as subestações 1 e 2. Já a VLAN 2, concebida pela área sombreada em vermelho, contém os IEDs 1, 2 e 3, e o enlace de comunicação entre as subestações 1 e 2.

A Tabela 56 apresenta as configurações aplicadas a esse cenário.

Tabela 56 – Configurações gerais para o cenário 2

Elemento	Descrição				
IED 1	Envia duas ou mais informações GOOSE através de uma lógica digital implementada neste equipamento				
IEDs 2 e 3	Recebem duas ou mais informações GOOSE advindas do IED 1				
Switch 1	VLAN 1	VLAN configurada com o padrão IEEE 802.1Q (<i>tag protocol</i>)	Porta 9, 10 e 13 <i>tagged</i> no switch 1, demais como <i>untagged</i>	Todas as portas do switch 1 estão nesta VLAN, exceto 9 e 13	Prioridade dos IEDs 2 e 3, 7
	VLAN 2			Portas 9, 10 e 13	
Switch 2	VLAN 1	VLAN configurada com o padrão IEEE 802.1Q (<i>tag protocol</i>)	Portas 5 e 10 <i>tagged</i> no switch 2, demais como <i>untagged</i>	Todas as portas do switch 2 estão nesta VLAN, exceto a 5	Prioridade do IED 1, 7
	VLAN 2			Portas 5 e 10	
Simulador	Tensão contínua configurada para 6 V para suprir a alimentação dos alarmes sonoros.				

De forma semelhante ao cenário anterior, o cenário 2 representa uma situação operativa na qual o IED 1, através do serviço de mensagens GOOSE, gera informações da proteção a serem utilizadas pelos IEDs 2 e 3, e desempenha uma função de interesse qualquer. A mudança reside nos seguintes aspectos:

- A quantidade de VLANs configuradas: a VLAN 2 foi criada para ser um meio lógico de trânsito exclusivo para as mensagens GOOSE advindas do IED 1 com destino aos

IEDs 2 e 3. Já a VLAN 1 tem o propósito de agrupar os demais dispositivos ativos da rede;

- O método de identificação das VLANs: identificação de quadros (*frame tagging*);
- A restrição de uso das portas destinadas aos IEDs somente a VLAN 2, em ambos os *switches*;
- O alvo do gerador de *bits* passou a ser o console de configuração devido ao isolamento total dos IEDs, com a intenção de manter o tráfego extra na rede que interliga as subestações 1 e 2 (pacote na cor vermelha, conforme ilustra a Figura 155);
- O percentual de tráfego extra aplicado é mantido em um patamar constante (95% da velocidade nominal da rede);
- Avaliação da perda de mensagens GOOSE, caso um número maior de mensagens sejam enviadas.

7.3.4 Lógica Digital para Criação das Mensagens GOOSE

Para avaliar o comportamento das mensagens GOOSE em torno das características de atraso e perda, seção 4.7, foi necessário desenvolver uma forma automática de geração das mesmas, com o intuito de minorar a inserção de erros no momento de criação e na cadência de transmissões consecutivas. A Figura 156 ilustra a lógica digital geradora de pulsos, a qual é base para criação das mensagens GOOSE pelo IED 1.

O funcionamento da lógica é descrita a partir de seus blocos funcionais:

1. Este bloco é responsável por dar início ao conjunto de pulsos que irão gerar as mensagens GOOSE a partir do IED 1. Este processo é introduzido com o pressionar de um botão da IHM desse IED (PB-1). O *Timer 1* tem como função garantir que as entradas da porta *xor 1* fiquem com níveis lógicos distintos por 1 segundo (tempo de *pickup*), e avalize em sua saída nível lógico 1 durante o tempo mencionado para iniciar o bloco funcional 2;
2. Bloco responsável por tornar disponível ou bloquear a geração de um conjunto de pulsos (habilita via entrada *Set* (S) e bloqueia via entrada *Reset* (R) do *flip-flop*). Cada conjunto de pulsos gerado será denominado conjunto de teste (Teste_z).
Onde: $z \in \mathbb{N}$, e indicada o número do conjunto de teste em execução.
3. Geração propriamente dita dos pulsos que representam cada mensagem enviada bem como a cadência temporal dos pulsos, conforme descreverá a Figura 157.

Figura 156 – Lógica digital para geração de mensagens GOOSE, IED 1

Quando a entrada da porta *xor 2* que está conectada a saída Q do *flip-flop* receber nível lógico 1 (com a outra entrada da porta *xor 2* em nível lógico 0), o *Timer 2* será ativado, via a porta *and 1*. Após 3 segundos (tempo de *pickup* do *Timer 2*) a porta *xor 3* receberá nível lógico 1. Como a outra entrada (*xor 3*) está em nível lógico 0, devido ao tempo de *pickup* do *Timer 3*, a saída da porta *xor 3* será ativada. Este pulso gera a mensagem $GOOSE_{x,y,z}$ através da saída do *Timer 4*. Após o tempo de *dropout* do *Timer 4* (1 segundo) todo o processo será reiniciado.

- Mensagem $GOOSE_{x,y,z}$

x =número que identifica a saída do pulso, sendo: $x=[1,2] \in \mathbb{N}$;

- 1=Mensagem GOOSE que indica um pulso do conjunto de teste_z em referência (saída do bloco funcional 3);
- 2=Mensagem GOOSE que indica um intervalo de tempo entre conjuntos de testes consecutivos (saída do bloco funcional 4).

y =número que identifica o pulso (mensagem GOOSE), sendo: $y \in \mathbb{N}$;

z =número do conjunto (ou, último conjunto) de teste em execução.

4. Contador que define a quantidade de pulsos criados em um determinado conjunto de testes. Após o número de pulsos configurados no contador 1 serem atingidos, sua saída será ativada, e via a porta *or 3* o *flip-flop* (bloco funcional 2) será bloqueado (entrada *Reset* (R) do *flip-flop*), finalizando um determinado conjunto de pulsos. O mesmo sinal também será utilizado para:
 - Emitir o alarme sonoro 1, que indica o intervalo entre conjuntos de testes consecutivos (bloco funcional 7);
 - Uma condição de bloqueio do bloco funcional 3, através da porta *and 1*;
 - Reinício de um novo conjunto de pulsos, após 1 minuto, conforme os tempos de *pickup* e *dropout* nos *Timer 6* e *7*;
 - O *reset* na contagem do próprio contador 1 via *Timer 5*;
 - A inserção de um pulso na entrada do contador 2, bloco funcional 5;
 - Geração da mensagem $GOOSE_{2,y,z}$ que indica um intervalo entre conjuntos de testes consecutivos.
5. Contador que define o limite máximo de conjuntos de teste. Sendo que a quantidade de pulsos em cada conjunto de teste foi definida pelo contador 1;

6. Intervalo de tempo entre testes consecutivos. Após 1 minuto de término do primeiro conjunto de testes (*pickup* do *Timer 6*) um pulso de um segundo será emitido ao *Timer 7*, utilizado como garantia de que um novo conjunto de teste será iniciado via porta *or 1* (conectada no *flip-flop*, bloco funcional 2) no primeiro segundo após o tempo de *pickup* do *Timer 6*;
7. Alarme sonoro 1, indicativo do término de cada conjunto de teste;
8. Alarme sonoro 2, indicativo do término de todo o conjunto de testes estabelecido pelo contador 2, bloco funcional 5;
9. *Reset* geral da lógica desenvolvida via um botão da IHM do IED 1 (PB-2).

A Figura 157 apresenta no tempo o comportamento dos pulsos associados à criação das mensagens $GOOSE_{x,y,z}$ (sendo $x=1$). Quando o usuário inicia um conjunto de testes é aguardado um tempo inicial igual a 3 segundos para a geração do primeiro pulso, o qual possui duração de 1 segundo. Decorrido esse tempo um novo intervalo de 3 segundos é inserido, o seu final marca o início de um novo pulso, ou seja, uma nova mensagem a ser transmitida.

Após o número de pulsos determinados no bloco funcional 4, contador 1, serem atingidos é marcado o término do primeiro conjunto de teste ($Teste_1$). Na sequência ocorre um intervalo igual a 1 minuto para que um novo conjunto de pulsos seja gerado, associado à criação da mensagem $GOOSE_{x,y,z}$ (sendo $x=2$). Ressalta-se que a quantidade de pulsos gerados em cada conjunto de teste é igual.

Figura 157 – Comportamento das saídas da lógica para geração de mensagens GOOSE

No âmbito de desenvolvimento desta lógica, uma etapa inicial foi a implementação computacional no aplicativo de *software Matlab/Simulink*[®] para validação do comportamento da mesma. Assegurado o comportamento esperado, a lógica foi implementada no IED 1.

As sinalizações presentes na lógica para geração das mensagens GOOSE (Figura 156), podem ser descritas conforme segue:

- *Led* L1, indica o início de um conjunto de teste;
- *Led* L2, indica a criação de um pulso (mensagem $GOOSE_{1.y.z}$);
- *Led* L3, indica o intervalo entre conjuntos de teste consecutivos;
- *Led* L4, indica o término de todos os conjuntos de teste.

Os IEDs 2 e 3 não possuem uma lógica digital desenvolvida, sendo as mensagens geradas pelo IED 1 enviadas para ambos através do padrão IEC-61850, recebidas via interface de rede e sinalizadas na IHM dos referidos IEDs, conforme ilustra a Figura 158.

Figura 158 – Sinalizações dos IEDs 2 e 3

7.3.5 Geração de Mensagens GOOSE no Contexto do Padrão IEC-61850

De forma sumarizada e considerando a definição da topologia física e lógica para a rede de comunicação descrita nos cenários operativos, esta subseção aprecia algumas etapas da metodologia empregada para automação das lógicas anteriores, inserindo a geração de mensagens GOOSE no contexto do padrão IEC-61850.

7.3.5.1 Mapeamento das informações enviadas e recebidas

A Tabela 57 apresenta uma lista dos tipos de informação que serão enviadas ou recebidas, identificando qual IED deverá disponibilizar um determinado tipo de informação e aquele responsável por utilizá-la.

Tabela 57 – Informações a serem enviadas ou recebidas

Tipo de Informação	Comando ou Estado	Dispositivo Transmissor	Dispositivo Receptor
Mensagem <i>GOOSE</i> _{1,y,z}	Comando	IED 1: lógica referente a geração das mensagens GOOSE	IED 2: referente a sinalização do <i>led</i> L1
Mensagem <i>GOOSE</i> _{1,y,z}	Comando	IED 1: lógica referente a geração das mensagens GOOSE	IED 3: referente a sinalização do <i>led</i> L1
Mensagem <i>GOOSE</i> _{2,y,z}	Estado	IED 1: lógica referente a geração das mensagens GOOSE	IED 2: referente a sinalização do <i>led</i> L2
Mensagem <i>GOOSE</i> _{2,y,z}	Estado	IED 1: lógica referente a geração das mensagens GOOSE	IED 3: referente a sinalização do <i>led</i> L2

7.3.5.2 Tipo de nó lógico (LN) utilizado

Por tratar-se de uma lógica com aplicação exclusiva de sinais discretos (atributo booleano) é possível utilizar o LN genérico GGIO. Na lógica em referência, o nó lógico GGIO utiliza dados de indicação geral (*Ind*) referentes a geração de pulsos (mensagens GOOSE).

7.3.5.3 Descrição do serviço de interface de comunicação abstrata (ASCI)

Dentre os modelos descritos na subseção 5.7.1, a geração de mensagens GOOSE utilizará o modelo *Data-Set*, que permite o agrupamento de dados e atributos utilizados para acesso direto entre IEDs.

7.3.5.4 Descrição da classe de dados comum (CDC)

Conforme já exposto, os atributos do LN GGIO são do tipo booleano com funcionalidade construtiva de estado (ST). Na subseção 5.7.2, Tabela 20, é possível abstrair a CDC em que o nó lógico está associado: SPS (*Single Point Status*).

7.3.5.5 Tipo de mensagem

Para este estudo, considera-se que as mensagens trocadas entre os IEDs na aplicação que está em ato têm restrição quanto a atrasos, por simular uma aplicação qualquer de proteção ao SEP. O padrão IEC-61850 parte 8.1 descreve que estas mensagens são do tipo 1 (mensagens rápidas) e 1A (*trip*), classificadas como mensagens GOOSE.

7.3.5.6 Anatomia geral do objeto

A anatomia geral dos objetos do padrão IEC-61850 para a lógica de geração de mensagens GOOSE segue a seguinte forma:

- $IED_i.LD_j.GGIO_x.ST.Ind_n.q$

Este ajuste indica um atributo de qualidade (q , *quality*) para o dado de indicação geral (Ind), que especifica uma entrada binária com funcionalidade construtiva de estado (ST), pertencente ao nó lógico GGIO. Este nó lógico está acoplado a um dado dispositivo lógico (LD) que, por sua vez, está inserido em um dispositivo físico (IED).

- $IED_i.LD_j.GGIO_x.ST.Ind_n.stVal$

Ajuste que indica um atributo com valor booleano de estado ($stVal$), relativo aos pontos de entrada e saída na lógica de geração e nos pontos de sinalização, para o dado de indicação geral (Ind). A funcionalidade construtiva deste dado é de estado (ST) e pertencente ao nó lógico GGIO. Este nó lógico está acoplado a um dado dispositivo lógico (LD) que, por sua vez, está inserido em um dispositivo físico (IED).

Onde: $i, j, x, n \in \mathbb{N}$.

7.3.5.7 Configuração do serviço de mensagens GOOSE

A Tabela 58 determina a configuração inicial de pontos necessários ao adequado desempenho do serviço de mensagens GOOSE nos IEDs.

Tabela 58 – Configuração do serviço de mensagens GOOSE

Pontos Vitais	IED 1	IED 2	IED 3
1	Habilitado	Habilitado	Habilitado
2	GOOSE_IED_1	GOOSE_IED_2	GOOSE_IED_3
3	01-0C-CD-01-00-04	01-0C-CD-01-00-04	01-0C-CD-01-00-04
4	VLAN ID 2	VLAN ID 2	VLAN ID 2
5	7	7	7
6	1	1	1

Sendo:

1. Habilitar o serviço de mensagens GOOSE;

2. Atribuir um nome para o serviço de mensagens GOOSE. Recomenda-se utilizar um nome auto-descritivo;
3. Ajustar um endereço de *multicast*;
4. Configurar o identificador da VLAN (o *switch* deve reconhecer este parâmetro);
5. Configurar um valor de prioridade para as mensagens enviadas (o *switch* deve reconhecer este parâmetro);
6. Ajustar o atributo *ConfRev*, representativo do número de vezes que a configuração do *DataSet* foi alterada. Este ajuste é explicado em detalhes na parte 7.2 do padrão IEC-61850.

7.3.5.8 Atribuição da estrutura de dados a lógica desenvolvida

Com base nas condições operacionais e seções anteriores, torna-se possível atribuir a estrutura de dados de cada LN GGIO aos pontos virtuais de entrada e saída para os IEDs 1, 2 e 3, conforme a Tabela 59, Tabela 60, Tabela 61, considerando o envio de uma mensagem $GOOSE_{1,y,z}$ referente à saída do bloco funcional 3 (geração do conjunto de pulsos) e, uma mensagem $GOOSE_{2,y,z}$ referente à entrada do bloco funcional 7 (indicação de término de cada conjunto de teste).

Tabela 59 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais no IED 1

Tipo de informação IED 1	Local de referência na lógica IED 1	Ponto virtual IED 1	Estrutura de dados do nó lógico GGIO, originada no IED _x
Mensagem $GOOSE_{1,y,z}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
Mensagem $GOOSE_{2,y,z}$	Entrada do bloco funcional 7 (saída do bloco funcional 4)	Saída Virtual 02	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal

Tabela 60 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais no IED 2

Tipo de informação IED 2	Local de referência no IED 2	Ponto virtual IED 2	Estrutura de dados do nó lógico GGIO, originada no IED _x
Mensagem $GOOSE_{1,y,z}$	IED 2: referente a sinalização do <i>led</i> L1	Entrada Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
Mensagem $GOOSE_{2,y,z}$	IED 2: referente a sinalização do <i>led</i> L2	Entrada Virtual 02	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal

Tabela 61 – Mapeamento das atribuições de dados do LN GGIO aos pontos virtuais no IED 3

Tipo de informação IED 3	Local de referência no IED 3	Ponto virtual IED 3	Estrutura de dados do nó lógico GGIO, originada no IED _x
Mensagem $GOOSE_{1,y,z}$	IED 3: referente a sinalização do <i>led</i> L1	Entrada Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
Mensagem $GOOSE_{2,y,z}$	IED 3: referente a sinalização do <i>led</i> L2	Entrada Virtual 02	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal

Para o cenário operativo 2 o número de mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ será incrementado para cada conjunto de teste, o que possibilita uma análise quanto ao impacto nas características de tempo entre transmissão e recepção, e perda de mensagens. Neste caso, a Tabela 59 adquire a estrutura de dados do LN GGIO sendo referenciada ao mesmo tipo de informação e ponto virtual, a entrada do bloco funcional 3, IED 1, como mostra a Tabela 62, que exemplifica a transmissão paralela (simultânea) de 8 mensagens $GOOSE_{1,1,1}$.

Tabela 62 – Exemplo de mapeamento para transmissão paralela de 8 mensagens $GOOSE_{1,1,1}$

Tipo de informação IED 1	Local de referência na lógica IED 1	Ponto virtual IED 1	Estrutura de dados do nó lógico GGIO, originada no IED _x
Mensagem $GOOSE_{1,1,1}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₁ .stVal
Mensagem $GOOSE_{1,1,1}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₂ .stVal
Mensagem $GOOSE_{1,1,1}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₃ .stVal
Mensagem $GOOSE_{1,1,1}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₄ .stVal
Mensagem $GOOSE_{1,1,1}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₅ .stVal
Mensagem $GOOSE_{1,1,1}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₆ .stVal
Mensagem $GOOSE_{1,1,1}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₇ .stVal
Mensagem $GOOSE_{1,1,1}$	Saída do bloco funcional 3	Saída Saída Virtual 01	IED ₁ .LD ₁ .GGIO ₁ .ST.Ind ₈ .stVal

Nos IEDs 2 e 3, uma porta lógica *and* foi acrescentada para que a sinalização do *Led* L1 somente seja ativada caso todas as mensagens $GOOSE_{1,1,1}$ sejam recebidas, como ilustra a Figura 159. A sinalização do *led* L2, em ambos os IEDs, se mantém a mesma.

IED 2

IED 3

Figura 159 – Alteração na lógica de sinalização dos IEDs 2 e 3

Com base nas informações enviadas e recebidas, e a descrição de atribuição da estrutura de dados, torna-se possível um mapeamento para a lógica desenvolvida e sinalizações pertinentes, como, por exemplo, o envio de uma mensagem $GOOSE_{1.y.z}$ referente a saída do bloco funcional 3 e uma mensagem $GOOSE_{2.y.z}$ referente a entrada do bloco funcional 7, IED 1, Figura 160 e Figura 161, respectivamente.

Como exemplo, a saída do *Timer 4* (Figura 160) tem conexão via *software* com a saída virtual 01. Quando a saída virtual 01 é acionada, um sinal booleano, *bit 1*, é vinculado ao atributo *stVal* do dado Ind_1 , pertencente ao nó lógico $GGIO_1$. Este nó lógico está acoplado ao dispositivo lógico, LD_1 , pertinente ao dispositivo físico, IED 1.

O objeto composto, $IED_1.LD_1.GGIO_1.ST.Ind_1.stVal$, será enviado como uma mensagem $GOOSE_{1.1.1}$ para os IEDs 2 e 3, assinalando nível lógico 1 na entrada virtual 01 e ativando o *led* L1, de ambos os IEDs (Figura 161).

Após o término de cada conjunto de teste será enviada uma mensagem $GOOSE_{2.y.z}$, objeto composto $IED_1.LD_1.GGIO_1.ST.Ind_2.stVal$, referente a entrada do bloco funcional 7, IED 1, para os IEDs 2 e 3, ativando o *led* L2 em ambos os IEDs.

Figura 160 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO, lógica de geração das mensagens

Figura 161 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para as sinalizações, IEDs 2 e 3

O comportamento global de atribuição dos dados para lógica de geração das mensagens GOOSE, e sinalizações pertinentes são similares para os casos em que existem várias mensagens GOOSE paralelas. A Figura 162 exemplifica um trecho da lógica, para elucidar a Tabela 62. Na mesma figura estão descritas as atribuições da estrutura de dados do LN GGIO para as sinalizações, IEDs 2 e 3, de acordo com a referida tabela.

Figura 162 – Atribuição da estrutura de dados do LN GGIO para o envio de mensagens paralelas

7.3.6 Desempenho e Confiabilidade dos Cenários Propostos

Para atingir o objetivo proposto para esta aplicação²³ o foco de análise da qualidade de serviço recai sobre as características de atraso de mensagens GOOSE, e a característica de perda destas mensagens, ou seja, desempenho e confiabilidade.

A representação compacta de tais características exige a utilização de métodos estatísticos que permitam inferir as propriedades dos fenômenos mencionados. Em consequente, as tendências do comportamento da rede só podem ser reveladas quando se faz o rastreamento de muitas transmissões consecutivas, sendo que nas redes modernas o tempo de transmissão de uma única informação está na faixa de microssegundos da escala de tempo [75].

7.3.6.1 Coleta de dados para o cenário 1

A primeira etapa realizada para o cenário 1, foi a coleta de dados, que corresponde aos tempos entre envios e recepções de mensagens GOOSE_{1,y,z} e uma provável perda destas transmissões.

Para este cenário, foram estabelecidos 11 conjuntos de teste, com o envio serial de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z} em cada conjunto, e uma mensagem GOOSE_{2,y,z} entre os conjuntos, totalizando 494 transmissões, sendo: 484 mensagens GOOSE_{1,y,z} e 10 mensagens GOOSE_{2,y,z}.

Cada conjunto de teste foi caracterizado pela geração de uma taxa de tráfego extra em relação à velocidade nominal da rede, via o gerador de *bits*, nos termos da Tabela 63.

Tabela 63 – Taxa de tráfego extra para cada conjunto de Teste_z

Nº do conjunto de Teste _z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Taxa de tráfego extra (%)	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95

O limite de transmissões foi estabelecido entre os IEDs 1, 2 e 3, utilizando o número máximo de linhas no *log* de eventos do IED com o menor número de linhas permitidas, neste caso 1000 linhas, evitando assim, que eventos deixassem de ser registrados em qualquer um dos IEDs durante a coleta de dados.

Cada pulso (mensagem) gera nos IEDs dois estados, *asserted (on)* e *deasserted (off)*, conforme trecho do *log* de eventos no IED 1, descrito na Tabela 64 e ilustrado na Figura 163.

²³ Avaliar o comportamento no tempo de mensagens GOOSE em condições distintas de tráfego e de configuração da topologia lógica da rede de comunicação de dados. Além de monitorar um possível extravio entre as mensagens geradas por um emissor e aquelas recebidas por um ou mais destinatários.

Tabela 64 – Trecho do *log* de eventos, IED 1 (cenário 1), *asserte* (*on*) e *deasserted* (*off*)

Nº da Linha	Data	Estampa de Tempo (h:m:s)	Saída Virtual (GOOSE _{x,y,z})	Estado
83	12/12/2008	06:14:29.745338	01 (GOOSE _{1,42,1})	<i>asserted</i> (<i>on</i>)
84	12/12/2008	06:14:30.747379	01 (GOOSE _{1,42,1})	<i>deasserted</i> (<i>off</i>)
85	12/12/2008	06:14:33.749344	01 (GOOSE _{1,43,1})	<i>asserted</i> (<i>on</i>)
86	12/12/2008	06:14:34.751387	01 (GOOSE _{1,43,1})	<i>deasserted</i> (<i>off</i>)
87	12/12/2008	06:14:37.753350	01 (GOOSE _{1,44,1})	<i>asserted</i> (<i>on</i>)
88	12/12/2008	06:14:38.755395	01 (GOOSE _{1,44,1})	<i>deasserted</i> (<i>off</i>)
89	12/12/2008	06:14:39.755355	02 (GOOSE _{2,1,1})	<i>asserted</i> (<i>on</i>)
90	12/12/2008	06:15:37.759295	02 (GOOSE _{2,1,1})	<i>deasserted</i> (<i>off</i>)
91	12/12/2008	06:15:41.759137	01 (GOOSE _{1,1,2})	<i>asserted</i> (<i>on</i>)
92	12/12/2008	06:15:42.761180	01 (GOOSE _{1,1,2})	<i>deasserted</i> (<i>off</i>)
93	12/12/2008	06:15:45.763144	01 (GOOSE _{1,2,2})	<i>asserted</i> (<i>on</i>)
94	12/12/2008	06:15:46.765188	01 (GOOSE _{1,2,2})	<i>deasserted</i> (<i>off</i>)

Figura 163 – Trecho do *log* de eventos, IED 1 (cenário 1)

A Tabela 64 e a Figura 163 apresentam inicialmente o estado de *asserted* do pulso associado à criação da mensagem GOOSE_{1,42,1} (x=1, saída do bloco funcional 3; y=42, pulso (mensagem) 42; z=1, conjunto de teste 1), o qual possui duração de 1 segundo. Decorrido esse tempo um intervalo de 3 segundos é inserido, o seu final marca o início de um novo pulso (uma nova mensagem). Após o número de pulsos determinados no bloco funcional 4,

contador 1, ser atingido é marcado o término do primeiro conjunto de teste com a mensagem $GOOSE_{1.44.1}$.

Na seqüência ocorre um intervalo igual a 1 minuto para que um novo conjunto de pulsos seja gerado, associado à criação da mensagem $GOOSE_{2.1.1}$ (x=2, entrada do bloco funcional 7; y=1, intervalo entre testes 1; z=1, conjunto de teste 1).

Para o cenário 1 são 494 pulsos (mensagens) vezes os 2 estados, atingindo o total de 968 linhas após o 11º conjunto de teste.

Foram executadas duas rodadas com 11 conjuntos de teste. Na primeira rodada, os *switches* 1 e 2 estavam configurados para um agrupamento do tipo *port* VLAN, prioridade baixa. Na rodada seguinte foi mantido o tipo de agrupamento e alterada a prioridade de usuário para alta.

7.3.6.2 Coleta de dados para o cenário 2

Para o cenário 2, foram estabelecidos 4 conjuntos de teste, com o envio paralelo de mensagens $GOOSE_{1.y.z}$, conforme exemplo descrito pela Figura 162.

Em cada conjunto de teste foi alterado o número de mensagens GOOSE enviadas de forma simultânea (paralela), com o intuito de verificar o impacto nas seguintes características: atraso no tempo de envio, recebimento e perda de mensagens (Tabela 65).

Tabela 65 – Número de mensagens GOOSE simultâneas por conjunto de Teste_z

Nº do conjunto de Teste _z	1	2	3	4
Nº de mensagens GOOSE simultâneas	1	10	20	30

Para o cenário 2, a geração de tráfego extra manteve-se fixa no patamar de 95% da velocidade nominal da rede. Como os IEDs foram isolados através da VLAN 2, a intenção foi manter alto o tráfego de dados entre os *switches* através da geração de tráfego extra entre dois dispositivos quaisquer da rede, neste caso o alvo do gerador de *bits* passou a ser o console de configuração.

Seguindo os parâmetros do cenário 1 no que tange ao limite de transmissões entre os IEDs 1, 2 e 3, o número de linhas permitidas no *log* de eventos manteve o valor de 1000 linhas. Para esta condição e no intuito de manter uniformidade entre os quatro conjuntos de teste, o número de pulsos emitidos pelo IED 1 foi reduzido para 16. A Tabela 66 detalha um trecho do *log* de eventos no IED 1, para a transmissão de 10 mensagens simultâneas.

Tabela 66 – Trecho do *log* de eventos, IED 1 (cenário 2): envio de 10 mensagens simultâneas

Nº da Linha	Data	Estampa de Tempo (h:m:s)	Saída Virtual (GOOSE _{x,y,z})	Estado
1	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
2	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
3	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
4	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
5	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
6	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
7	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
8	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
9	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
10	14/12/2008	11:29:00.851883	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>asserted (on)</i>
11	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
12	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
13	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
14	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
15	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
16	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
17	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
18	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
19	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>
20	14/12/2008	11:29:01.853927	01 (GOOSE _{1,1,1})	<i>deasserted (off)</i>

Como o envio de todas as mensagens ocorre de forma paralela (a cada pulso), os tempos de *asserted (on)* são os mesmos nas primeiras 10 linhas do *log* de eventos do IED 1 (Tabela 66). Situação idêntica acontece com os valores do estado de *deasserted (off)*.

No que tange à configuração da lógica de geração dos pulsos, o contador 2 foi ajustado com valor 1, ou seja, quando o contador 1 atingir seu valor máximo (neste caso, 16) o teste é finalizado, com ativação do alarme sonoro 2.

Em todos os conjuntos de teste os *switches* 1 e 2 estavam configurados com o método para identificação da VLAN, *frame tagging*, prioridade de usuário 7.

7.3.6.3 Tratamento dos dados para o cenário 1

Em busca de explorar o conjunto de dados do cenário 1, o passo seguinte à coleta de dados foi comparar as estampas de tempo utilizando os *logs* de evento dos IEDs 1, 2 e 3, com o propósito de verificar quando um determinado pulso emitido pelo IED 1, não era percebido pelo IED 2 (considerando que o tráfego extra estava sendo gerado em sua direção). A detecção deste erro foi computada como uma perda, conforme esboça a célula na cor preta,

Tabela 67, descritiva de um trecho do relatório gerado, com taxa de tráfego extra de 35% do valor nominal da rede (100 Mbps) e prioridade baixa.

Tabela 67 – Trecho do relatório gerado e a detecção da perda de uma mensagem

Estampa de Tempo (h:m:s)	Estampa de Tempo (h:m:s)	Estampa de Tempo (h:m:s)
IED 1	IED 2	IED 3
6:27:30,2950	6:27:30,3020	6:27:30,3010
6:27:34,2990	6:27:34,3060	6:27:34,3030
6:27:38,3030	6:27:38,3080	6:27:38,3070
6:27:42,3070	6:27:42,3120	6:27:42,3120
6:27:46,3110	Perda 1	6:27:46,3160
6:27:50,3150	6:27:50,9160	6:27:50,3200

Além de identificar uma perda de mensagem, faz-se necessária a retirada da linha no *log* de eventos do IED 1 e 3, linha com texto em vermelho na Tabela 67, para que a falta desta estampa de tempo não influencie no tratamento dos dados.

A partir dos novos *logs* de evento gerados, foi utilizado o aplicativo de *software Input Analyser/Arena*[®] [114], versão 11, para o tratamento das informações de modo a extrair medidas de posição e dispersão dos atrasos de pacotes, como ilustra a Figura 164.

Figura 164 – Aplicativo de *software Input Analyser/Arena*[®], versão 11

Através do aplicativo de *software* mencionado, a Tabela 68 pretende tornar acessível às informações contidas nos dados coletados entre os IEDs, com relação ao atraso médio (D) de propagação (envio e recebimento) das mensagens GOOSE_{1,y,z} de cada grupo de teste para a 1ª rodada do cenário 1, além da possível perda de mensagens, conforme variação do tráfego extra em relação à velocidade nominal da rede.

Tabela 68 – Atraso médio (D) da 1ª rodada, cenário 1, prioridade baixa

Tráfego Extra (%)	Atraso Médio - D (h:m:s)			Nº Mensagens Perdidas	Perda (%)
	IED 2 – IED 1	IED 3 – IED 1	IED 2 – IED 3		
0	0:0:00,0049	0:0:00,0050	0:0:-00,0001	0	0,00
5	0:0:00,0045	0:0:00,0044	0:0:00,0001	0	0,00
15	0:0:00,0047	0:0:00,0047	0:0:00,0000	0	0,00
25	0:0:00,0053	0:0:00,0048	0:0:00,0005	0	0,00
35	0:0:00,0461	0:0:00,0050	0:0:00,0411	3	6,82
45	0:0:00,0505	0:0:00,0046	0:0:00,0459	5	11,36
55	0:0:00,0543	0:0:00,0048	0:0:00,0495	9	20,45
65	0:0:00,0629	0:0:00,0052	0:0:00,0577	15	34,09
75	0:0:00,0451	0:0:00,0048	0:0:00,0403	18	40,91
85	0:0:00,0380	0:0:00,0045	0:0:00,0335	20	45,45
95	0:0:00,0945	0:0:00,0047	0:0:00,0898	18	40,91

Neste momento cabe um explanar do significado de cada coluna para melhor elucidação dos dados pertinentes a Tabela 68:

- 1ª coluna: explicita o percentual de tráfego extra para cada conjunto de teste da primeira rodada;
 - 1ª linha: geração de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z}, conjunto de teste 1, com 0% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 2ª linha: geração de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z}, conjunto de teste 2, com 5% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 3ª linha: geração de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z}, conjunto de teste 3, com 15% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 4ª linha: geração de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z}, conjunto de teste 4, com 25% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 5ª linha: geração de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z}, conjunto de teste 5, com 35% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 6ª linha: geração de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z}, conjunto de teste 6, com 45% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 7ª linha: geração de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z}, conjunto de teste 7, com 55% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 8ª linha: geração de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z}, conjunto de teste 8, com 65% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;

- 9ª linha: geração de 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$, conjunto de teste 9, com 75% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 10ª linha: geração de 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$, conjunto de teste 10, com 85% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2;
 - 11ª linha: geração de 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$, conjunto de teste 11, com 95% de tráfego extra enviado pelo gerador de *bits* ao IED 2.
- 2ª coluna: diferença média entre os atrasos de propagação das 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ do IED 1 (transmissor) para o IED 2 (receptor), em cada conjunto de teste. Cabe lembrar que o IED 2 é o receptor das mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ e $GOOSE_{2,y,z}$, além do tráfego extra emitido pelo gerador de *bits*. A média é expressa no formato: hora, minuto e segundo (h:m:s);
 - 3ª coluna: diferença média entre os atrasos de propagação das 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ do IED 1 (transmissor) para o IED 3 (receptor), em cada conjunto de teste. O IED 3 recebe apenas as mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ e $GOOSE_{2,y,z}$. A média é expressa no formato: hora, minuto e segundo (h:m:s);
 - 4ª coluna: diferença entre os atrasos de propagação da 2ª e 3ª colunas (diferença média entre os IEDs 2 e 3), para cada conjunto de teste;
 - 5ª coluna: número de mensagens perdidas pelo IED 2 para cada percentual de tráfego extra;
 - 6ª coluna: percentual de mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ perdidas em cada conjunto de 44 mensagens enviadas.

Como exemplo, a diferença média entre os atrasos de propagação das 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ do IED 1 (transmissor) para o IED 2 (receptor), no quinto conjunto de testes, 35% de tráfego extra, foi de 46,1 ms. Para o mesmo conjunto de teste, a diferença média entre os atrasos de propagação das 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ do IED 1 (transmissor) para o IED 3 (receptor) foi de 5 ms. Neste ínterim, 3 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ foram perdidas entre o IED 1 e o IED 2, totalizando 6,82% das 44 mensagens enviadas.

Na mesma vertente, a Tabela 69 pretende tornar compreensível as informações contidas nos dados coletados entre os IEDs, com relação ao atraso médio (D) de propagação e a possível perda de mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ de cada grupo de teste para a 2ª rodada do cenário 1, conforme variação do tráfego extra em relação à velocidade nominal da rede.

Tabela 69 – Atraso médio (D) da 2ª rodada, cenário 1, prioridade alta

Tráfego Extra (%)	Atraso Médio - D (h:m:s)			Nº Mensagens Perdidas	Perda (%)
	IED 2 – IED 1	IED 3 – IED 1	IED 2 – IED 3		
0	0:0:00,0045	0:0:00,0044	0:0:00,0001	0	0,00
5	0:0:00,0043	0:0:00,0043	0:0:00,0000	0	0,00
15	0:0:00,0046	0:0:00,0042	0:0:00,0004	0	0,00
25	0:0:00,0054	0:0:00,0049	0:0:00,0005	0	0,00
35	0:0:00,0225	0:0:00,0049	0:0:00,0176	1	2,27
45	0:0:00,0314	0:0:00,0048	0:0:00,0266	5	11,36
55	0:0:00,0539	0:0:00,0046	0:0:00,0493	11	25,00
65	0:0:00,0401	0:0:00,0047	0:0:00,0354	14	31,82
75	0:0:00,0681	0:0:00,0042	0:0:00,0639	18	40,91
85	0:0:00,0423	0:0:00,0046	0:0:00,0377	23	52,27
95	0:0:00,0963	0:0:00,0050	0:0:00,0913	20	45,45

7.3.6.4 Tratamento dos dados para o cenário 2

O conjunto de atividades anteriores determinou as mesmas medidas para o cenário 3, conforme apresenta a Tabela 70. Foram estabelecidos 4 conjuntos de teste com 1, 10, 20 e 30 mensagens GOOSE_{1,y,z} enviadas simultaneamente, com o intuito de verificar o impacto no atraso médio de propagação e perda de mensagens.

Tabela 70 – Atraso médio (D), cenário 2; prioridade alta; taxa de tráfego extra em 95%

Nº de Mensagens GOOSE (simultâneas)	Atraso Médio - D (h:m:s)			Nº Mensagens Perdidas
	IED 2 – IED 1	IED 3 – IED 1	IED 2 – IED 3	
1	0:0:00,0052	0:0:00,0051	0:0:00,0001	0
10	0:0:00,0087	0:0:00,0089	0:0:-00,0002	0
20	0:0:00,0142	0:0:00,0141	0:0:00,0001	0
30	0:0:00,0203	0:0:00,0200	0:0:00,0003	0

Como exemplo, a diferença média entre os atrasos de propagação das 16 transmissões do IED 1 (transmissor) para o IED 2 (receptor), no caso da geração de 10 mensagens GOOSE_{1,y,z} simultâneas, com 95% de tráfego extra na rede, foi de 8,7 ms. Para o mesmo conjunto de teste, a diferença média entre os atrasos de propagação das 16 transmissões do IED 1 (transmissor) para o IED 3 (receptor) foi de 8,9 ms. Nenhuma mensagem GOOSE_{1,y,z} foi perdida entre transmissor e receptor, para quaisquer dos conjuntos de teste.

7.3.6.5 Inferência para o cenário 1

Construída a amostra e executado o tratamento dos dados, deve-se inferir qual o comportamento do cenário em operação. A partir dos dados contidos na Tabela 68 foram traçados os gráficos ilustrados pela Figura 165 e Figura 166, os quais descrevem o comportamento temporal e as perdas de mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ para a 1ª rodada do cenário evidenciado.

Figura 165 – Tempos médios entre IEDs para 1ª rodada; baixa prioridade; cenário 1

Na Figura 165 os pontos em vermelho explicitam as diferenças médias entre os atrasos de propagação das 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ do IED 1 (transmissor) para o IED 2 (receptor), conforme coluna 2 da Tabela 68. Os pontos azuis, assinalam as diferenças médias entre os atrasos de propagação das 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ do IED 1 (transmissor) para o IED 3 (receptor), e os pontos verdes as diferenças médias entre os atrasos de propagação dos IEDs 2 e 3, para cada conjunto de teste, conforme colunas 3 e 4 da Tabela 68.

A observação dos resultados anunciados permite explicitar que a partir de 35% de tráfego extra na rede de comunicação, ou nos patamares próximos a este, a média dos tempos das mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ recebidas pelo IED 2 sofre um incremento expressivo em seu valor, em comparação com aquelas recebidas pelo IED 3. Com 35% de tráfego extra, o atraso médio das mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ é de 46,1 ms para o IED 2, e 5 ms para o IED 3. A

diferença de 41,1 ms no tempo esperado de recebimento de uma dada informação da proteção, pode implicar, por exemplo, que um defeito no SEP permaneça por um tempo maior do que o máximo permissível, definido para um elemento que o compõe, resultando em dano irreversível ao mesmo. Na pior média de atraso, esta diferença sobe para 89,8 ms (95% de tráfego extra).

Para o IED 3 o tempo médio das mensagens, em toda a faixa de variação de carregamento se manteve praticamente constante, 4,77 ms. Cabe lembrar que o IED 3 não recebia o tráfego espúrio.

A Figura 166 registra a perda de pacotes, para a 1ª rodada, sendo que a partir do mesmo valor percentual de carregamento da rede (35%, ou em patamares próximos) algumas mensagens enviadas, do total gerado, não foram entregues ao IED 2. Os piores momentos estão registrados entre 75% e 95% de tráfego extra, quando o IED 2 deixou de receber 20 das 44 mensagens GOOSE_{1,y,z} enviadas, ou seja, 45,45% de perda.

Figura 166 – Perda de pacotes para 1ª rodada; baixa prioridade; cenário 1

O não recebimento de uma informação da proteção é ainda mais danoso ao SEP, pois pode desencadear um efeito cascata, levando-o para uma situação de instabilidade.

Com base nos dados contidos na Tabela 68, foram traçados os gráficos elucidados pela Figura 167 e Figura 168, os quais descrevem o comportamento temporal e as perdas de mensagens GOOSE_{1,y,z} para a 2ª rodada do cenário evidenciado, ou seja, agrupamento do tipo *port* VLAN e prioridade de usuário alta.

Figura 167 – Tempos médios entre IEDs para 2ª rodada; alta prioridade; cenário 1

A observação dos resultados apregoados permite dizer que a partir da mesma taxa de tráfego extra, 35% do valor nominal da rede, ou nos patamares próximos a este, a média dos tempos das mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ recebidas pelo IED 2 volta a sofrer um incremento significativo, em comparação com aquelas recebidas pelo IED 3. Com 35% de tráfego extra, o atraso médio das mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ é de 22,5 ms para o IED 2, e 4,9 ms para o IED 3. A diferença de 17,6 ms no tempo esperado de recebimento de uma dada informação da proteção, volta a implicar, por exemplo, que um defeito no SEP pode permanecer por um tempo maior do que o máximo permissível. Na pior média de atraso, esta diferença sobe para 91,3 ms (95% de tráfego extra).

Para o IED 3 o tempo médio das mensagens, em toda a faixa de variação de carregamento se manteve praticamente constante, 4,6 ms. Compete recordar que o IED 3 não recebia o tráfego espúrio.

A Figura 168 registra a perda de pacotes, para a 2ª rodada, sendo que a partir do mesmo valor percentual de carregamento da rede (35%, ou em patamares próximos) algumas mensagens enviadas, do total gerado, não foram entregues ao IED 2. Os piores momentos foram novamente registrados entre 75% e 95% de tráfego extra, quando o IED 2 deixou de receber 23 das 44 mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ enviadas, ou seja, 52,27% de perda.

Figura 168 – Perda de pacotes para 2ª rodada; alta prioridade; cenário 1

Quanto à prioridade de usuário, vislumbra-se que numa faixa menor ou igual a 65% de tráfego extra, a média dos tempos das mensagens $GOOSE_{1,y,z}$, recebidas pelo IED 2, são menores quando a prioridade é estabelecida como alta, conforme ilustra a Figura 169.

Figura 169 – Diferença média entre os atrasos no que tange a configuração de prioridade

Acima deste valor, o parâmetro de prioridade deixou de atuar para o cenário 1. Segundo Lingyan [115], um volume intenso de pacotes com baixa prioridade, como, por exemplo, os originados pelo gerador de *bits*, pode ocasionar a perda de pacotes demarcados com alta prioridade (como as mensagens GOOSE_{1,y,z} geradas pelo IED 1) devido a problemas, como, a sobrecarga no *buffer* dos *switches* ou algoritmos que não conseguem tratar o volume intenso de pacotes com baixa prioridade.

Pode-se dizer, portanto, que existe uma influência direta do tráfego acentuado e a configuração dos equipamentos ativos da rede sobre o desempenho e a confiabilidade da troca de mensagens GOOSE pelo sistema de proteção, considerando o cenário operativo 1.

7.3.6.6 Inferência para o cenário 2

A Tabela 70 é base para o gráfico descrito pela Figura 170, que delinea o comportamento temporal das mensagens GOOSE_{1,y,z}, após o estabelecimento das amostras e executado o tratamento dos dados para o cenário 2.

Figura 170 – Tempos médios entre IEDs para o cenário 2

Na Figura 170 os pontos em vermelho explicitam as diferenças médias entre os atrasos de propagação da(s) mensagem(s) GOOSE_{1,y,z} do IED 1 (transmissor) para o IED 2 (receptor), conforme coluna 2 da Tabela 70. Os pontos azuis, assinalam as diferenças médias entre os atrasos de propagação da(s) mensagem(s) GOOSE_{1,y,z} do IED 1 (transmissor) para o IED 3

(receptor), e os pontos verdes as diferenças médias entre os atrasos de propagação dos IEDs 2 e 3, para cada conjunto de teste, conforme colunas 3 e 4 da Tabela 70.

Através dos resultados divulgados é possível abstrair que entre os conjuntos de teste utilizados pelo cenário 2, ocorreu um incremento linear nos atrasos de propagação das mensagens GOOSE_{1,y,z}.

Ao executar 16 transmissões seriais com 1 mensagem GOOSE_{1,y,z} incluída, o atraso médio de propagação entre o IED 1 e o IED 2 ficou em 5,2 ms. Repetindo as 16 transmissões, com 30 mensagens GOOSE_{1,y,z} simultâneas, o atraso médio esteve demarcado com 20,3 ms, o que estabelece uma diferença de 15,1 ms. Quando se vislumbra que o tráfego extra gerado no cenário 2 é fixo em 95% da velocidade nominal da rede, torna-se interessante a comparação com o cenário 1, quando o atraso médio de 44 transmissões com 1 mensagem GOOSE_{1,y,z} e 35% de tráfego extra gerado em direção ao IED 2, foi detectada com 17,6 ms.

Cabe exaltar que para o cenário vigente não ocorreram perdas de mensagens GOOSE, em nenhum dos conjuntos de teste.

Pode-se dizer, portanto, que a criação de um meio lógico de trânsito exclusivo para as mensagens GOOSE e, a restrição de uso das portas dos *switches* destinadas à proteção do SEP, características evidenciadas no cenário 2, são fatores primordiais de uso do padrão IEC-61850 e das redes de comunicação de dados, para a eficiência da proteção no que tange a eliminação de condições anormais do sistema elétrico.

7.3.6.7 Impacto no atraso médio (D) entre *port* VLAN e *frame tagging*

Cada cenário operativo utilizou um método para identificação da VLAN, o cenário 1 empregou *port* VLAN e o cenário 2, *frame tagging*. Para vislumbrar a hipótese de acréscimo nos tempos de propagação das mensagens GOOSE_{1,y,z} quando de utilização do segundo método, *frame tagging*, a VLAN 2 passou a englobar simultaneamente o console de configuração, o analisador de rede, o gerador de *bits*, o simulador de sistemas de potência, os IEDs 1, 2 e 3, e o enlace de comunicação entre as subestações 1 e 2.

Foram estabelecidos 11 conjuntos de teste, com o envio serial de 44 mensagens GOOSE_{1,y,z} em cada conjunto, e uma mensagem GOOSE_{2,y,z} entre os conjuntos, totalizando 494 transmissões. Cada conjunto de teste foi caracterizado pela geração de uma taxa de tráfego extra em relação à velocidade nominal da rede, com destino ao IED 2, conforme cenário 1 (Tabela 63).

Executou-se uma sequência de forma similar a caracterização da 2^a rodada pelo cenário 1, porém com a identificação da VLAN como *frame tagging*, prioridade de usuário 7 (alta).

A Tabela 71 torna acessível as informações contidas nos dados coletados entre os IEDs, com relação ao atraso médio (D) de propagação, conforme variação do tráfego extra.

Tabela 71 – Atraso médio (D) do cenário 2 alterado: *frame tagging*, prioridade 7 (alta)

Tráfego Extra (%)	Atraso Médio - D (h:m:s)		
	IED 2 – IED 1	IED 3 – IED 1	IED 2 – IED 3
0	0:0:00,0046	0:0:00,0047	0:0: -00,0001
5	0:0:00,0049	0:0:00,0049	0:0:00,0000
15	0:0:00,0051	0:0:00,0047	0:0:00,0004
25	0:0:00,0760	0:0:00,0040	0:0:00,0720
35	0:0:00,1392	0:0:00,0049	0:0:00,1343
45	0:0:00,1516	0:0:00,0042	0:0:00,1474
55	0:0:00,1447	0:0:00,0051	0:0:00,1396
65	0:0:00,1270	0:0:00,0043	0:0:00,1227
75	0:0:00,1715	0:0:00,0051	0:0:00,1664
85	0:0:00,0917	0:0:00,0043	0:0:00,0874
95	0:0:00,2368	0:0:00,0051	0:0:00,2317

A partir dos dados contidos na Tabela 71 foi traçado o gráfico ilustrado pela Figura 171, o qual descreve o comportamento temporal de mensagens $GOOSE_{1,y,z}$ para o cenário evidenciado.

Figura 171 – Tempos médios entre IEDs, cenário 2 alterado: *frame tagging*, prioridade 7 (alta)

Ao observar os resultados divulgados com o método de identificação da VLAN, *frame tagging*, é possível dizer que a partir de 25% de tráfego extra na rede de comunicação, ou nos patamares próximos a este, a média dos tempos das mensagens GOOSE_{1,y,z} recebidas pelo IED 2 sofre um incremento expressivo em seu valor, em comparação com os valores da 2ª, e também, da 1ª rodada do cenário 1. Com 25% de tráfego extra, por exemplo, o atraso médio das mensagens GOOSE_{1,y,z} foi de 76 ms para o IED 2 (cenário 2 alterado), enquanto a 1ª rodada do cenário 1 demarcou 53 ms, e a 2ª rodada 54 ms. Nos demais patamares de tráfego extra a tendência de alta se manteve.

Dentre as possíveis razões para este acréscimo nos atrasos médios, deve-se lembrar que a identificação de quadros (*frame tagging*) se baseia num processo de adição de informação ao quadro *Ethernet*. Quando um quadro viaja entre os *switches*, um cabeçalho extra é adicionado ao quadro MAC para definir a VLAN de destino. É importante ressaltar que o termo adição se refere à tarefa de alteração do quadro *Ethernet*. Conforme explicita Olifer [75] o quadro de dados do quadro *Ethernet* diminui em dois *bytes* quando se adiciona o cabeçalho IEEE 802.1Q/p (seção 4.6). Como consequência do alto volume de tráfego na rede, com destino ao IED 2, a realização desta tarefa implica num adicional de tempo ao processo de propagação das mensagens.

Vale advertir que para o IED 3 o tempo médio das mensagens, em toda a faixa de variação de carregamento se manteve praticamente constante, 4,66 ms. Valores próximos do cenário 1 com utilização de *port* VLAN (4,77 ms e 4,6 ms, respectivamente), sendo que em sua direção estavam apenas mensagens relativas a proteção.

A perda de mensagens não esteve em foco nesta subseção, e necessita de estudos aprofundados, como, por exemplo, os algoritmos de fila e a sobrecarga no(s) *buffer(s)* dos *switches* utilizados.

7.3.7 Interoperabilidade e Intercambialidade

A metodologia adotada para especificar a automação das lógicas discretas para o controle de *bay*, a comutação entre fontes de alta tensão e a geração de mensagens GOOSE, mediante contextualização do padrão IEC-61850, oportunizaram a troca de informações entre dispositivos de inteligência similar, em que o receptor não somente entendeu a estrutura de dados, mas também o seu significado, com base nos atributos de dados recebidos no processo de comunicação.

O compartilhamento de informações entre IEDs do mesmo fabricante adveio nas duas primeiras aplicações mencionadas, enquanto a partilha entre fabricantes distintos, sem o uso

de *gateways* e com aplicação do padrão IEC-61850 como protocolo em redes de comunicação e sistemas em subestações, ocorreu precisamente na seção 7.3, monitoramento temporal e extravio de mensagens GOOSE, sendo que o IED 1, fabricante A, compartilhava informações da proteção com os IEDs 2 e 3, fabricante B (Figura 172).

As características mencionadas nos parágrafos anteriores estão pautadas num dos principais pilares do padrão IEC-61850, a interoperabilidade.

Figura 172 – Interoperabilidade entre fabricantes distintos, seção 7.3, monitoramento temporal

Uma desvantagem aprendida no processo de implantação dos casos em estudo é a necessidade de aquisição de aplicativos de *software* proprietários para geração do arquivo ICD, responsável por descrever as capacidades e pré-configurações dos IEDs de fabricantes distintos, processo que impacta nos custos da automação.

A seção 7.1, controle de *bay* típico de saída de linha, dispendo de meios de comunicação de dados, e a seção 7.2, comutação entre fontes de alta tensão em uma subestação industrial, favoreceram a adoção da rede *Ethernet* em substituição à fiação paralela, freqüentemente utilizada como canal de comunicação, além da substituição de todos os equipamentos de um fabricante por outro, sem a necessidade de alterações nos demais equipamentos constituintes do sistema, conforme ilustra a Figura 173.

Figura 173 – Intercambialidade dos IEDs de fabricantes distintos nas seções 7.1 e 7.2

Como exemplos, foram executados os testes descritos nas seções 7.1 e 7.2 para verificar a eficácia das ações de controle nas aplicações mencionadas, utilizando IEDs do fabricante A. Após constatar que houve em 100% dos casos evidenciados, correta recepção dos comandos via fiação paralela e mensagens GOOSE, além da conseqüente execução das lógicas, os IEDs foram substituídos por modelos do fabricante B, e todos os testes refeitos. Do mesmo modo, houve correta recepção dos comandos e conseqüente execução das lógicas.

Embora não seja um objetivo explícito pelo padrão IEC-61850, adicionalmente, as concessionárias do sistema de energia elétrica também requerem intercambialidade de IEDs. Porém, as funções de proteção no caso dos relés digitais, por exemplo, permanecem particulares de cada modelo e fabricante.

A percepção de sucesso na avaliação da interoperabilidade de mensagens e intercambialidade entre IEDs, com utilização do padrão IEC-61850, restringe-se às parametrizações dos casos desenvolvidos e sob a infra-estrutura de comunicação de dados do LSEE, mas possibilita vislumbrar uma rede de comunicação integrada, robusta e um possível ciclo de vida independente dos fornecedores.

VIII. Conclusões

Avaliando o desenvolvimento do trabalho proposto, manifestado no objetivo fundamental de implementar no Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) uma infra-estrutura de comunicação de dados e redes de computadores, *Intranet*, que possibilite experimentação, medição, análise e avaliação da interoperabilidade de informações, e intercambialidade de equipamentos com supervisão, controle e proteção, essencialmente, relés digitais comerciais, é preciso perceber a dimensão de construção do conhecimento necessária ao desvendar conteúdos de tamanha complexidade, como os pertencentes à proteção do sistema elétrico de potência, às redes de comunicação de dados e computadores, e às regras que coordenam e asseguram a condução de informações via o padrão IEC-61850.

Pode-se dizer que os teores desta construção elucidados nos Capítulos I, III, IV e V, são adequados e convenientes, pois embasam princípios aplicáveis às concessionárias de energia elétrica. Cumpre-se desta forma alguns dos objetivos específicos deste trabalho: distinguir os sistemas de comunicação de dados utilizados na automação do SEP; caracterizar os conceitos essenciais de comunicação de dados e redes de computadores; e conhecer o estado da arte do padrão IEC-61850. Estas são tendências modernas na automação de subestações.

No Capítulo VI, destaca-se o projeto e a implementação física e lógica da infra-estrutura de comunicação de dados e redes de computadores do LSEE, visando à interligação de relés digitais de proteção, simuladores do sistema de potência (caixa de teste), microcomputadores padrão IBM PC, conversores de mídia, relógio GPS e demais dispositivos do SEP com capacidade de comunicação. Os resultados caracterizam-se por um ambiente estruturado, que fornece à comunidade científica e empresarial, uma plataforma de comunicação em torno da qual é possível implementar funções de supervisão, controle e proteção, sejam estas locais ou simulando duas subestações interligadas por fibra óptica, distantes 20 km. A réplica do

sistema de comunicação de uma subestação típica torna mais ágil os testes e a validação de diferentes esquemas lógicos, antecedendo o comissionamento de campo.

Com o intuito de compor aplicações focadas ao estudo da automação de subestações entre os níveis de processo e *bay*, o Capítulo VII apresentou um controle de *bay* típico de saída de linha, dispondo de meios de comunicação de dados para telecomando (linha discada, linha dedicada e rede *Ethernet*), e uma lógica para comutação entre fontes de alta tensão em uma subestação industrial. As aplicações foram avaliadas em duas vertentes: implementação tradicional, com utilização de condutores metálicos em cobre, classe de isolamento para baixa tensão; e a realização de testes no que se refere à troca de informações adotando o padrão IEC-61850 como protocolo de comunicação, e a rede *Ethernet* em substituição à fiação paralela.

Inicialmente as aplicações permitem exaltar o relé de proteção digital como o novo paradigma na composição de esquemas de supervisão e controle de estado para equipamentos manobráveis, devido ao seu caráter multifuncional, sua elevada confiabilidade, o grande potencial para resolver problemas do SEP e a capacidade de simplificar a arquitetura construtiva dos painéis de proteção. Cabe enaltecer também, os enlaces de comunicação de dados, que apresentam-se como uma tendência a operação distribuída dos sistemas de potência, endereçando pontos de acesso fora do ambiente local de uma subestação, otimizando equipamentos e compartilhando recursos.

De forma subsequente, observa-se que as lógicas desenvolvidas no ambiente tradicional são portáteis e possuem suas vidas úteis significativamente aumentadas, visto que podem ser utilizadas em qualquer relé de proteção digital que possua elementos dos sistemas digitais, como portas *and*, *or*, *not*, *flip-flops* e temporizadores. O custo de desenvolvimento das soluções torna-se atraente, pois as empresas em sua grande maioria já possuem os equipamentos e *softwares* instalados, bem como recurso humano capacitado para desenvolver tais soluções.

Avaliando os ensaios realizados nas subseções 7.1.5 e 7.2.4, percebe-se que via IHM ou os enlaces de comunicação de dados (restritos ao controle de *bay*) houve em 100% dos casos evidenciados correta recepção dos comandos e conseqüente execução das lógicas, ratificando características como, estabilidade e eficiência, e refletindo no ambiente laboratorial as mesmas demandas solicitadas em ambientes reais.

Aspecto relevante deste trabalho, a metodologia proposta para especificar a automação das lógicas discretas mediante emprego do padrão IEC-61850, mostrou-se adequada na descrição de diversos conceitos do Capítulo V, como, por exemplo, a especificação funcional das aplicações segundo o padrão IEC-61850, a definição da topologia física e lógica para a

rede de comunicação de dados, os requisitos para adaptação física dos equipamentos, o mapeamento das informações enviadas e recebidas, a definição do tipo de LN utilizado, a descrição do serviço de interface de comunicação abstrata, a classe de dados comum aplicada, a configuração do serviço de mensagens GOOSE e a atribuição da estrutura de dados de cada LN aos pontos pertinentes dentro das lógicas preestabelecidas. Estes tópicos orientaram os processos de automação e configuração dos relés de proteção digital, aqui denominados equipamentos eletrônicos inteligentes (IEDs).

Neste contexto, novos testes foram realizados no tocante à troca de informações adotando o padrão IEC-61850. Houve, em 100% dos casos evidenciados, correta recepção dos comandos via mensagens GOOSE, e conseqüente execução das lógicas.

Como característica de desempenho da rede de comunicação (seções 7.1.6.2 e 7.2.5.15), o tempo de atraso na propagação de mensagens GOOSE foi monitorado durante a seqüência de manobras para energização e desenergização total do *bay*, e durante o 1º e 2º ciclos de comutação. A admissão do padrão IEC-61850 como protocolo de comunicação e a rede *Ethernet* em substituição à fiação paralela, possibilitou a redução dos cabos metálicos necessários a interligação dos IEDs, e a diminuição do atraso de propagação de comandos entre os níveis de processo e *bay* em 3 ms para o controle de *bay* e, 3,75 ms na comutação de linhas (valores médios), sendo que o uso do cabeamento metálico (paralelo) gerou atrasos da ordem de 8 ms. Vale ressaltar que estes tempos consideraram o momento de sensibilização das saídas e entradas, digitais ou virtuais, absorvendo o tempo de processamento gasto pelo *switch* que compôs a estrutura de comunicação (quando do envio de mensagens GOOSE) e desconsiderando os tempos de processamento dos IEDs.

Numa relação meticulosa com os objetivos específicos, buscou-se também, avaliar neste trabalho, o comportamento no tempo de mensagens do tipo GOOSE, em condições distintas de tráfego e de configuração da topologia lógica da rede de comunicação, além de monitorar um possível extravio entre as mensagens geradas por um emissor e aquelas recebidas por um ou mais destinatários, características de desempenho e confiabilidade.

Sobre a estrutura laboratorial do LSEE foram estabelecidos dois cenários representativos de uma situação operativa na qual um determinado IED (1), através do serviço de mensagens GOOSE, gerava informações da proteção a serem utilizadas por outros dois IEDs (2 e 3), desempenhando uma função de interesse qualquer, no tocante à proteção do SEP. Para avaliar o comportamento das mensagens GOOSE em torno das características de atraso e perda, na subseção 7.3.4 desenvolveu-se uma lógica discreta para geração automática destas mensagens, empregando a metodologia de automação mencionada. Construída as amostras e

executado os tratamentos dos dados inferiu-se o comportamento de cada cenário em operação, conforme explana a Tabela 72.

Tabela 72 – Inferência dos cenários operativos

Cenário 1 – VLAN incorporando proteção e outros serviços – Prioridade Baixa – <i>Port VLAN</i>			
Atraso de Propagação		Perda de Mensagens	
A partir de 35% de tráfego extra na rede de comunicação, ou nos patamares próximos a este, a média dos tempos das mensagens GOOSE _{1,y,z} recebidas pelo IED 2 sofre um incremento expressivo em seu valor, em comparação com aquelas recebidas pelo IED 3. Utilizando este valor (35% de tráfego extra) o atraso médio das mensagens GOOSE _{1,y,z} foi de 46,1 ms para o IED 2, e 5 ms para o IED 3. Na pior média de atraso, esta diferença subiu para 89,8 ms (95% de tráfego extra). Demais valores consultar a Tabela 68.		A partir de 35% de tráfego extra na rede de comunicação, ou nos patamares próximos a este, algumas mensagens enviadas, do total gerado (44 mensagens), não foram entregues ao IED 2 (por exemplo, 3 mensagens perdidas com 35% de tráfego). Os piores momentos estão registrados entre 75% e 95% de tráfego extra, quando o IED 2 deixou de receber 20 das 44 mensagens GOOSE _{1,y,z} enviadas, ou seja, 45,45% de perda (Tabela 68).	
Cenário 1 – VLAN incorporando proteção e outros serviços – Prioridade Alta – <i>Port VLAN</i>			
Atraso de Propagação		Perda de Mensagens	
A partir de 35% de tráfego extra, ou nos patamares próximos a este, o atraso médio das mensagens GOOSE _{1,y,z} foi de 22,5 ms para o IED 2, e 4,9 ms para o IED 3. Na pior média de atraso, esta diferença subiu para 91,3 ms (95% de tráfego extra). Demais valores consultar a Tabela 69.		A partir de 35% de tráfego extra na rede de comunicação, ou nos patamares próximos a este, algumas mensagens enviadas, do total gerado (44 mensagens), não foram entregues ao IED 2 (por exemplo, 1 mensagem perdida com 35% de tráfego). Os piores momentos estão registrados entre 75% e 95% de tráfego extra, quando o IED 2 deixou de receber 23 das 44 mensagens GOOSE _{1,y,z} enviadas, ou seja, 52,27% de perda (Tabela 69).	
Cenário 2 – VLAN exclusiva para proteção – Prioridade Alta – <i>Frame Tagging</i>			
Atraso de propagação na Transmissão de 1 mensagem GOOSE _{1,y,z} (IED 1 para IED 2)	Atraso de propagação na Transmissão de 10 mensagem GOOSE _{1,y,z} (IED 1 para IED 2)	Atraso de propagação na Transmissão de 20 mensagem GOOSE _{1,y,z} (IED 1 para IED 2)	Atraso de propagação na Transmissão de 30 mensagem GOOSE _{1,y,z} (IED 1 para IED 2)
5,2 ms	8,7 ms	14,2 ms	20,3 ms
<ul style="list-style-type: none">Através dos resultados divulgados é possível observar que entre os conjuntos de teste utilizados pelo cenário 2, ocorreu um incremento linear nos atrasos de propagação das mensagens GOOSE_{1,y,z};Nenhuma mensagem GOOSE_{1,y,z} foi perdida entre transmissor e receptor, para quaisquer dos conjuntos de teste do cenário 2.			

Pode-se dizer, portanto, que a criação de um meio lógico de trânsito exclusivo para as mensagens GOOSE, a restrição de uso das portas dos *switches* destinadas à proteção do SEP, características evidenciadas no cenário 2, e o monitoramento do tráfego de dados, são fatores primordiais de uso do padrão IEC-61850 e das redes de comunicação de dados, para a

eficiência da proteção no que tange a supervisão de estado de elementos intrínsecos ao SEP, e o envio de comandos para a eliminação de condições anormais, principalmente quando as mensagens são do tipo 1 e 1A (subseção 5.8.1). Neste ínterim, cabe ressaltar que os tempos encontrados nas aplicações, seções 7.1, 7.2 e 7.3, estão dentro dos valores apontados pelo padrão IEC-61850, parte 8.1.

Para vislumbrar a hipótese adicional de acréscimo nos tempos de propagação das mensagens $\text{GOOSE}_{1,y,z}$ quando de utilização do método para identificação de VLANs, *frame tagging*, a VLAN 2 foi alterada, para caracterizar a 2ª rodada no cenário 1. Dentro do espectro de configurações realizadas, com 25% de tráfego extra na rede de comunicação, ou nos patamares próximos a este, a média dos tempos das mensagens $\text{GOOSE}_{1,y,z}$ recebidas pelo IED 2 sofreu um incremento expressivo, em comparação com os valores da 1ª, e também, da 2ª rodada do cenário 1. O alto volume de tráfego na rede, com destino ao IED 2, e a adição de informação ao quadro *Ethernet* para identificação da VLAN de destino, implica num adicional de tempo ao processo de propagação das mensagens, conforme valores ilustrativos na Tabela 71. Vale advertir que ao permitir somente mensagens relativas à proteção o atraso médio manteve-se praticamente constante, 4,66 ms.

Como ato final, a subseção 7.3.7 analisa e avalia a interoperabilidade de mensagens e intercambialidade entre IEDs, com utilização do padrão IEC-61850. Embora se devam restringir os resultados as parametrizações dos casos desenvolvidos e sob a infra-estrutura de comunicação de dados do LSEE, logrou-se sucesso na troca de informações entre dispositivos de inteligência similar, o compartilhamento de informações entre fabricantes distintos, além da substituição de todos os equipamentos de um fabricante por outro, sem a necessidade de alterações nos demais equipamentos constituintes do sistema. A interoperabilidade e intercambialidade são pilares de aplicação do padrão IEC-61850 que possibilitam vislumbrar uma rede de comunicação integrada e robusta.

8.1 Pontos de Continuidade da Pesquisa

Com olhares envoltos no desenvolvimento continuado destas pesquisas, sugerem-se os seguintes pontos de continuidade:

- Executar o monitoramento temporal das mensagens GOOSE considerando o processamento de todos os dispositivos ativos na rede de comunicação de dados;
- Entender como ocorre a perda de mensagens GOOSE com foco no entendimento dos algoritmos de fila e a sobrecarga no(s) *buffer(s)* dos *switches* utilizados em subestações do sistema elétrico;

- Explorar com mais profundidade as medidas de posição e dispersão dos atrasos de propagação e extravios de mensagens GOOSE, na busca por identificar distribuições de probabilidade que representem tais fenômenos;
- Desenvolver *hardware* e aplicativo de *software* que possibilite análise do tráfego de dados em relés de proteção digital que não possuam o protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) de forma nativa;
- Desenvolver MIBs (*Management Information Base*) que possam abranger informações necessárias ao gerenciamento de relés de proteção digital, em ambientes de comunicação de dados;
- Programar e explorar rotinas de redundância utilizando relés de proteção digital em aplicações de controle, operando no modo *fail-over*²⁴ e conectados a *switches* distintos.

²⁴ Processo no qual um dispositivo assume os serviços de outro, quando este último apresenta falha.

Referências Bibliográficas

- [1] **CHEMIN NETTO, Ulisses.** *Aplicações de controle e supervisão distribuídas em subestações de energia elétrica através do uso de relés digitais de proteção.* São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica.
- [2] **AREVA.** *AREVA T&D.* [Online] [Citado em: 11 de ago de 2007.] Disponível em:
<http://www.aveva-td.com/scripts/home_tdmmain/publigen/content/templates/Show.asp?P=57&L=US>.
- [3] **ALDABÓ, Ricardo.** *Qualidade na Energia Elétrica.* São Paulo : Artibler, 2001.
- [4] **OLESKOVICZ, Mário.** *Qualidade da Energia Elétrica.* São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007. Apostila.
- [5] **ARAÚJO, Carlos André S.** *Proteção de Sistemas Elétricos.* Rio de Janeiro : Interciência, 2005.
- [6] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.** *IEC 50: international electrotechnical vocabulary, chapter 441: switchgear, controlgear and fuses.* 1984.
- [7] **MAEZONO, Paulo Koiti.** *Proteção de sistemas elétricos.* São Paulo : Virtus Consultoria e Serviços S/C Ltda., 2003. Apostila.

- [8] **COURY, Denis Vinicius, OLESKOVICZ, Mário e GIOVANINI, Renan.** *Proteção digital de sistema elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessadores inteligentes.* São Carlos : SEL/EESC/USP, 2007.
- [9] **KINDERMANN, Geraldo.** *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.* Florianópolis : Edição do Autor, 2006. Vol. 2.
- [10] **CAMINHA, Amadeu Casal.** *Introdução à proteção dos sistemas Elétricos.* São Paulo : Edgard Blücher, 1977.
- [11] **OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA.** *ONS: Submódulo 2.5 - Requisitos mínimos dos sistemas de proteção, supervisão, controle e de telecomunicações.* 2002.
- [12] **KINDERMAN, Geraldo.** *Proteção de sistemas elétricos de potência.* Florianópolis : Edição do Autor, 2005. Vol. 1.
- [13] **SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES.** *Relé de proteção de sobrecorrente e diferencial de corrente SEL-387A.* Campinas : SEL, 2002. Manual.
- [14] **GUREVICH, Vladimir.** *Electric Relays : principles and applications.* London : Taylor & Francis Group, 2006.
- [15] **PEREIRA, Clever.** *Introdução à proteção digital.* [Online] [Citado em: 2 de 11 de 2007.] Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~clever/>>.
- [16] **GIOVANINI, Renan.** *EPOCHS: Uma plataforma para avaliação de novas tecnologias baseadas em agentes para proteção de sistemas elétricos de potência.* São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica.
- [17] **RODRIGUES, José Roberto Moreira.** *Primeira subestação em funcionamento com IEC 61850.* In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VI SIMPASE, São Paulo, 2005.
- [18] **APOSTOLOV, Alexander e THOLOMIER, Damien.** *Impact of IEC 61850 on power system protection.* IEEE : 1-4244-0178-X/06, 2006.

- [19] **APOSTOLOV, Alexander.** *Disturbance recording in IEC 61850 substation automation systems.* IEEE : 0-7803-9193-4/06, 2006.
- [20] **BASTOS, Mário Roberto e CASTRO, Eduardo.** *A evolução dos sistemas de proteção e controle com a IEC 61850.* São Paulo : Eletricidade Moderna, 2005. pp. 168-177. Vol. 374.
- [21] **SIQUEIRA, Roger Pinto e FONSECA, Keiko Verônica Ono.** *Protocolos abertos em sistemas de automação de energia: uma análise comparativa entre o DNP3.0, o IEC 60870-5-101 e o novo protocolo IEC 61850.* In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VII SIMPASE, Salvador, 2007.
- [22] **SANTOS, Luis Fabiano dos e PEREIRA, Mauricio.** *Uma abordagem prática do IEC 61850 para automação, proteção e controle de subestações.* In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VII SIMPASE, Salvador, 2007.
- [23] **GRANDI, Gilberto.** *Metodologia para especificação de telecontrole em subestações de energia elétrica.* Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2000. Tese de Doutorado, Engenharia de Produção.
- [24] **BEHRENDT, Kenneth C.** *Relay-to-Relay digital logic communication for line protection, monitoring, and control.* Pullman : Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 1998.
- [25] **ZIMMERMAN, Karl e SCHWEITZER, Edmund O.** *Substation communications: when should I use EIA-232, EIA-485, and optical fiber?* In : Western Protective Relay Conference, Spokane, 1996.
- [26] **WOODWARD, Darold.** *The hows and whys of Ethernet networks in substations.* Pullman : Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2001.
- [27] **POZZUOLI, Marzio P. e MOORE, Roger.** *Ethernet in the substation.* IEEE : 1-4244-0493-2/06, 2006.
- [28] UCA;SIEMENS. *IEC 61850 Communication Networks and Systems in Substations.* [Online] [Citado em: 30 de Jan de 2007.] Disponível em: <<http://www.61850.com/>>.

- [29] **MACKIEWICZ, Ralph. E.** *Overview of IEC 61850 and benefits*. IEEE : 0-7803-9193-4/06, 2006.
- [30] **OLIVEIRA, Paulo Roberto Pedroso de, et al.** *Sistemas abertos de supervisão e controle e subestações de energia*. In : Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, II CITENEL, Salvador, 2003.
- [31] **GURJÃO, Edmar Candeia, SOUZA, Benemar Alencar e CARMO, Ubiratan Alves.** *A comunicação entre equipamentos de proteção na norma IEC 61850*. São Paulo : Eletricidade Moderna, 2007. pp. 148-157. Vol. 397.
- [32] **PEREIRA, A. Cascaes, et al.** *Automação de subestações e usinas: estado da arte e tendências utilizando a norma IEC 61850*. In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VII SIMPASE, Salvador, 2007.
- [33] **HOSSENLOPP, Luc.** *Engineering perspectives on IEC 61850*. IEEE : 1540-7977/07, 2007.
- [34] **FAY, Estefano e Eckl, Michael J.** *Subestações integradas: como obter benefícios do protocolo IEC 61850 hoje*. In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, V SIMPASE, Recife, 2003.
- [35] **CARDOSO, Carlos V., et al.** *Experiência na aplicação do IEC 61850 na especificação de um bay de linha*. In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VI SIMPASE, São Paulo, 2005.
- [36] **PAULINO, Marcelo Eduardo de Carvalho.** *Testes de conformidade em relés multifuncionais baseados na IEC 61850*. In : Seminário Técnico de Proteção e Controle, VIII STPC, Rio de Janeiro, 2005.
- [37] —. *Teste de IEDs baseados na IEC 61850*. In : Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE, Campina Grande, 2006.
- [38] **APOSTOLOV, Alexander P. e PAULINO, Marcelo E. de C.** *Testes de sistemas de automação de subestações complexos baseados na IEC 61850*. In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VII SIMPASE, Salvador, 2007.

- [39] **DAWIDCZAK, Henry e OLIVEIRA, Luiz Pereira de.** *A experiência de projetos utilizando a norma IEC 61850 na europa e américa.* In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VII SIMPASE, Salvador, 2007.
- [40] **HOGA, Clemens e SKARE, P.** *IEC 61850 projects in germany and switzerland.* IEEE : 0-7803-9193-04, 2006.
- [41] **FLORES, Victor Manuel, et al.** *Case study: design and implementation of IEC 61850 from multiple vendors at CFE La Venta II.* IEEE : 1-4244-0995-0/07, 2007.
- [42] **FLORES, Gonzalo Humeres, HIGASHI, Silvia S. Simões Costa e ANDRADE, Luis Francisco Borges.** *Experiência da Eletrosul na primeira subestação utilizando protocolo IEC 61850 com SAGEBOX.* In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VII SIMPASE, Salvador, 2007.
- [43] **SILVEIRA, Paulo R. da e SANTOS, Winderson E.** *Automação e controle discreto.* São Paulo : Érica, 1998.
- [44] **SILVA, Lázaro Eduardo da, et al.** *A utilização de ferramentas web para supervisão e controle de equipamentos do sistema elétrico de potência.* In : Congresso Brasileiro de Automática, XVII CBA, Juiz de Fora, 2007.
- [45] **BRASIL, Operador Nacional do Sistema Elétrico.** *Requisito de Telessupervisão para a Operação - Submódulo 10.19.* 2003.
- [46] **BOSCO, Flávio.** *O futuro do controle na transferência de dados.* São Paulo : Controle & Instrumentação, 2005. pp. 49-50. Vol. 102.
- [47] **ALVES, Luiz.** *Comunicação de dados.* São Paulo : Makron Books, 1994.
- [48] **BRASIL, Sistema de Práticas Telebrás.** *Especificações gerais da linha telefônica da rede telefônica pública comutada utilizada para comunicação de dados.* 1981. Prática 225-540-716.
- [49] **DANTAS, Mário.** *Tecnologia de redes de dados e computadores.* Rio de Janeiro : Axcel Books, 2002.

- [50] **OLIVEIRA, Antonio Alves de.** *Comunicação de dados e teleprocessamento.* São Paulo : Atlas, 1993.
- [51] **SILVEIRA, Jorge Luis da.** *Comunicação de dados e sistemas de teleprocessamento.* São Paulo : Makron Books, 1991.
- [52] **SOUSA, Lindeberg Barros de.** *Redes de computadores, dados, voz e imagem.* São Paulo : Érica, 2002.
- [53] **STALLINGS, William.** *Redes e sistemas de comunicação de dados.* Rio de Janeiro : Elsevier, 2005.
- [54] **BEASLEY, Jeffrey S. e MILLER, Gary M.** *Modern electronic communication.* New Jersey : Prentice Hall, 2005.
- [55] **MARÇULA, Marcelo e BENINI FILHO, Pio Armando.** *Informática conceitos e aplicações.* São Paulo : Érica, 2005.
- [56] **SILVA JUNIOR, Denizard Nunes da e TABINI, Richard.** *Fibras ópticas.* São Paulo : Érica, 1990.
- [57] **FERRARI, Antonio Martins.** *Telecomunicações: evolução & revolução.* São Paulo : Érica, 1998.
- [58] **GOMMLICH, Hans.** *Interfaces para sistemas de comunicação de dados.* São Paulo : Wandel & Golterman, 2002. Apóstila.
- [59] **SOARES, Luiz Fernando Gomes, LEMOS, Guido e COLCHER, Sérgio.** *Redes de computadores: das LANs, MANs e WANs às redes ATM.* Rio de Janeiro : Campus, 1995.
- [60] **BELKIN.** *Belkin: Modem.* [Online] [Citado em: 18 de ago de 2007.] Disponível em: <http://catalog.belkin.com/IWCatSectionView.process?Section_Id=15>.
- [61] **HEXSEL, Roberto A.** *Redes de dados: tecnologia e programação.* Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 2001. RT-DINF 005/2001, Apóstila.
- [62] **TANENBAUM, Andrew S.** *Redes de computadores.* Rio de Janeiro : Campus, 1997.

- [63] **CORREIA, Manuel Luís.** *Rede corporativa e integrada.* São Paulo : Érica, 1993.
- [64] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU Publications: Standardization (ITU-T).* [Online] [Citado em: 2007 de 08 de 20.] Disponível em: <<http://www.itu.int/publications/sector.aspx?lang=en§or=2>>.
- [65] **SOUSA, Lindeberg Barros de.** *Redes CISCO CNA - faça certificação.* São Paulo : Érica, 2002.
- [66] **ROSÁRIO, João Maurício.** *Princípios de mecatrônica.* São Paulo : Prentice Hall, 2005.
- [67] **HAMAMATSU, K. et al.** *A new approach to the implementation of intranet-based measurement and monitoring.* IEE : N^o 479, 2001.
- [68] **FOROUZAN, Behrouz A.** *Comunicação de dados e redes de computadores.* Porto Alegre : Bookman, 2005.
- [69] **SOARES NETO, Vicente, SILVA, Adelson de Paula e JÚNIOR, Mário Boscato C.** *Telecomunicações, redes de alta velocidade e cabeamento estruturado.* São Paulo : Érica, 2002.
- [70] **CÉSAR, Paulo e FARIAS, Bento.** *Curso essencial de redes.* São Paulo : Digerati Books, 2006.
- [71] **TORRES, Gabriel.** *Redes de computadores curso completo.* Rio de Janeiro : Axcel Books, 2001.
- [72] **TRONCO, Tania Regina.** *Redes de nova geração.* São Paulo : Érica, 2006.
- [73] WIKIPÉDIA. *Wikipédia, a enciclopédia livre.* [Online] [Citado em: 4 de jan de 2008.] Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.3>.
- [74] **LIMA, Walter.** *Telefonia e cabeamento de dados.* São Paulo : Érica, 2001.
- [75] **OLIFER, Natalia e OLIFER, Victor.** *Redes de computadores: princípios, tecnologias e protocolos para o projeto de redes.* Rio de Janeiro : LTC, 2008.

- [76] **FALBRIARD, Claude.** *Protocolos e aplicações para redes de computadores.* São Paulo : Érica, 2002.
- [77] **KUROSE, James F. e ROSS, Keith W.** *Redes de computadores e a internet, uma abordagem top-down.* São Paulo : Pearson Addilson Wesley, 2006.
- [78] **MARTINS, Ronei Ximenes.** *Introdução a redes de computadores.* Varginha : Edição do Autor, 2002. Apóstila.
- [79] **PALMA, Luciano e PRATES, Rubens.** *TCP/IP.* São Paulo : Novatec, 2000.
- [80] **FARREL, Adrian.** *A internet e seus protocolos.* Rio de Janeiro : Elsevier, 2005.
- [81] **COMER, Douglas E.** *Interligação de redes com TCP/IP.* Rio de Janeiro : Elsevier, 2006. Vols. 1 Princípios, protocolos e arquitetura.
- [82] **INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.** *ANSI/IEEE Std 802.1D, 1998 Edition.* 1998.
- [83] **CHWIF, Leonardo e MEDINA, Afonso C.** *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações.* São Paulo : Edição dos Autores, 2006.
- [84] **FREITAS FILHO, Paulo José de.** *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena.* Florianópolis : Visual Books, 2001.
- [85] **MESMAEKER, Ivan de, BRAND, Klaus-Peter e BRUNNER, Cristoph.** *How to use IEC 61850 in protection and automation.* In : ELECTRA - CIGRE, 2005. ISSN: 1286-1146.
- [86] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.** *IEC-61850, part 1: introduction and overview.* 2003. IEC/TR 61850-1:2003(E).
- [87] —. *IEC-61850, part 3: general requirements.* 2002. CEI/IEC 61850-3:2002.
- [88] **SANTOS, Alexandre Andrade dos, et al.** *Automação elétrica com a IEC-61850.* Rio de Janeiro : Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Universidade Petrobras, 2007. Monografia de Especialização em Automação Industrial.

- [89] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.** *IEC-61850, Part 4: system and project management.* 2002. CEI/IEC 61850-4:2002.
- [90] —. *IEC-61850, part 5: communication requirements for functions and device models.* 2003. IEC 61850-5:2003(E).
- [91] —. *IEC-61850, parte 7.4: basic communication structure for substation and feeder equipment – compatible logical node classes and data classes.* 2003. IEC 61850-7-4:2003(E).
- [92] —. *IEC-61850, part 6: substation automation system configuration description language.* 2004. IEC 61850-6:2004(E).
- [93] **REIN JR., Oswaldo.** *Um modelo de integração entre os padrões IEC-61850 e IEC-61970 (CIM/XML).* São Paulo : Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica.
- [94] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.** *IEC 61850, part 7.1: basic communication structure for substation and feeder equipment - principles and models.* 2003. IEC 61850-7-1:2003(E).
- [95] —. *IEC 61850, part 7.2: basic communication structure for substation and feeder equipment - abstract communication service interface (ACSI).* 2003. IEC 61850-7-2:2003(E).
- [96] —. *IEC-61850, part 7.3: basic communication structure for substation and feeder equipment – common data classes.* 2003. IEC 61850-7-3:2003(E).
- [97] —. *IEC-61850, part 8.1: specific communication service mapping (SCSM) – mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3.* 2004. IEC 61850-8-1:2004(E).
- [98] —. *IEC-61850, part 9.1: specific communication service mapping (SCSM) – sampled values over serial unidirectional multidrop point to point link.* 2003. IEC 61850-9-1:2003(E).
- [99] —. *IEC-61850, part 10: conformance testing.* 2005. IEC 61850-10:2005(E).

- [100] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 14565: procedimento básico para elaboração de projetos de cabeamento de telecomunicações para rede interna estruturada.* 2000.
- [101] **MOURA, Marcus Brandão de.** *Documentação de rede.* São Paulo : PC & CIA, 2006. pp. 62-66. Vol. 63.
- [102] **MEDOE, Pedro A.** *Telecomunicações: cabeamento estruturado.* São Paulo : Saber, 2002.
- [103] **MARIN, Paulo Sérgio.** *Cabeamento estruturado desvendando cada passo:do projeto à instalação.* São Paulo : Érica, 2008.
- [104] **BALTAR, Mário Fernando Krebs.** *Treinamento e operação: subestação 138 kV Ical.* Curitiba : Edição do Autor, 2005. Apostila.
- [105] **MIYAGI, Paulo Eigi.** *Controle programável.* São Paulo : Edgard Blücher, 2001.
- [106] **MIRANDA, Licinio Ribeiro de.** *UR - comunicação IEC 61850.* São Paulo : GE Consumer & Industrial, 2008. Apostila.
- [107] **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL.** *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST.* [Online] [Citado em: 15 de jan de 2009.] Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo_8_r.PDF>.
- [108] **DUGAN, R. C.** *Electrical power systens quality.* New York : McGraw-Hill, 2002.
- [109] **FLUKE.** Fluke 434/435 three phase power quality analyzer. [Online] Fluke. [Citado em: 15 de jan de 2009.] Disponível em: <[http://www.fluke.com.br/brpt/products/ProductManuals.htm?cs_id=35669\(FlukeProducts\)&category=phase3\(flukeproducts\)](http://www.fluke.com.br/brpt/products/ProductManuals.htm?cs_id=35669(FlukeProducts)&category=phase3(flukeproducts))>.
- [110] **PERTENCE JUNIOR, Antonio.** *Amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório.* São Paulo : McGraw-Hill, 1988.
- [111] **COLOMBO, R.** *Disjuntores de alta tensão.* São Paulo : Livraria Nobel, 1986.

- [112] SOLARWINDS. *SolarWinds:Engineer's Toolset Network Traffic Generator: WAN Killer*. [Online] [Citado em: 2009 de 05 de 26.] Disponível em <<http://www.solarwinds.com/products/toolsets/WANKiller.aspx>>.
- [113] WIKIPÉDIA. *Wikipédia, a enciclopédia livre*. [Online] [Citado em: 30 de 01 de 2009.] Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sniffing>>.
- [114] ARENA. *Rockwell Automation - Arena Simulation Software*. [Online] [Citado em: 2009 de 05 de 26.] Disponível em <<http://www.arenasimulation.com>>.
- [115] **LINGYAN, Hu, JIE, Peng e YONG, Xin.** *Experimental research about the impact of IEEE 802.1P on real-time behavior of switched industrial ethernet*. In : International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, ISECS, China, 2008.
- [116] **GERVITZ, Marcelo.** *IEC-61850: impactos na proteção de equipamentos de automação*. In : Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, VI SIMPASE, São Paulo, 2005.
- [117] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.** IEC 60617: graphical symbols for diagrams. [Online] [Citado em: 18 de jan de 2009.] Disponível em: <<http://std.iec.ch/iec60617>>.
- [118] **FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda.** *Novo Dicionário Eletrônico Aurélio*. São Paulo : Positivo Informática, 2004. Versão 5.0.

Apêndice A – Publicações Realizadas

No tempo transcorrido para desenvolvimento deste trabalho ocorreu à divulgação científica relativa ao Capítulo VII, Aplicações Desenvolvidas, com publicações em foros pertinentes e relevantes, possibilitando observações, análises e debates em torno das lógicas para controle de *bay* e comutação entre fontes de alta tensão.

- Congresso Internacional

MIRANDA, Juliano Coelho; NETTO, U. C.; OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V. *Uma lógica para controle de bay dispondo de relés digitais comerciais e meios de comunicação adequados*. In: Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, Seventh CLAGTEE, Viña del Mar – CHILE, 2007

NETTO, U. C.; MIRANDA, Juliano Coelho; COURY, D. V., OLESKOVICZ, M. *Uma lógica de comutação entre fontes de alta tensão em uma subestação industrial pelo uso de relés digitais comerciais*. In: Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, Seventh CLAGTEE, Viña del Mar – CHILE, 2007.

- Congresso Nacional

SILVA, L. E. ; MIRANDA, Juliano Coelho ; NETTO, U. C. ; OLESKOVICZ, M. ; DENIS, V. C. . *A utilização de ferramentas web para a supervisão e controle de equipamentos do sistema elétrico de potência*. In: Congresso Brasileiro de Automática, XVII CBA, Juiz de Fora, 2008.

SILVA, L. E. ; NETTO, U. C. ; MIRANDA, Juliano Coelho ; OLESKOVICZ, M. ; DENIS, V. C. . *O desenvolvimento de um sistema web aplicado ao controle e supervisão de um bay de saída de linha como elemento motivador para a graduação em engenharia elétrica*. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, XXXVI COBENGE, São Paulo, 2008.

MIRANDA, Juliano Coelho; NETTO, U. C.; COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M. *Sistemas digitais e comunicação de dados aplicados a um procedimento laboratorial para ensino de proteção de sistemas elétricos de potência*. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, XXXV COBENGE, Curitiba, 2007.

NETTO, U. C.; MIRANDA, Juliano Coelho; COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M. Desenvolvimento e implementação de uma lógica para comutação entre fontes de Alta tensão baseada em relés digitais comerciais aplicada em uma subestação industrial. In: Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, VII CBQEE, Santos, 2007.