LÁZARO EDUARDO DA SILVA

Tecnologias *Web* Aplicadas aos Sistemas Elétricos de Potência

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 Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

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

São Carlos - SP
2010

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

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

S586t Silva, Lázaro Eduardo da
Tecnologias *Web* aplicadas aos sistemas elétricos de
potência / Lázaro Eduardo da Silva ; orientador Denis
Vinicius Coury . -- São Carlos, 2010.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Tecnologias *Web*.
3. Sistemas de supervisão e controle. 4. Redes neurais
artificiais. 5. Redes de computadores. 6. Relé digital de
proteção. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel LAZARO EDUARDO DA SILVA.

Dissertação defendida e julgada em 09/08/2010 perante a Comissão Julgadora:

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

APROVADO

Prof. Dr. **MARIO OLESKOVICZ**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **PAULO JOSE AMARAL SERNI**
(Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”/UNESP/Campus de Bauru)

APROVADO

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

*Dedico esta dissertação aos meus avós que nos protegem sem descanso em oração,
aos meus pais, Lázaro Silvério e Maria de Fátima,
e minhas irmãs Lidiane, Letícia e Leila
que tanto me apóiam sendo também parte desta conquista.*

Agradecimentos

A Deus por iluminar sempre meus passos, trazendo realizações para minha vida e colocando pessoas tão especiais no decorrer desta caminhada.

A minha família, que tanto me apóia, oferecendo ajuda incondicional, acreditando no meu esforço e estando sempre presente nas batalhas e conquistas da vida.

Ao Professor Tit. Denis Vinicius Coury, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), por acreditar no meu trabalho e me acolher no programa de Mestrado, por todas as facilidades oferecidas, pela liberdade de trabalho e opinião, pelos desafios propostos, pela orientação amiga e competente, sendo muito mais que um orientador, mas um exemplo de vida acadêmica.

Ao meu amigo Ms. Juliano Coêlho Miranda e toda a sua família, por compartilhar das viagens, madrugadas de trabalho e por toda ajuda despendida nas oportunidades profissionais e acadêmicas.

Ao meu amigo Ms. Ulisses Chemin Netto, por compartilhar dos exímios conhecimentos de eletricista formando uma parceria irrestrita.

Ao Professor Dr. Mário Oleskovicz (EESC/USP), pela postura, dedicação e objetividade com que trata os assuntos, promovendo as facilidades de entendimento e pela minuciosa leitura e sugestões oportunas na fase de qualificação e defesa.

Ao Professor Dr. Alexandre Cláudio Botazzo Delbem, do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC/USP), pelas sugestões conferidas na dissertação de qualificação.

Ao Professor Dr. Paulo José Amaral Serni, da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP/ Bauru), pelas sugestões realizadas na defesa desta dissertação.

Ao Professor Dr. Ivan Nunes da Silva (EESC/USP), por propor aulas vivas e condições desafiantes, a construção do conhecimento.

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

Aos colegas de disciplina cursadas no programa de mestrado da EESC/USP e ICMC/USP pelos contatos realizados e compartilhamento de experiências.

Aos colegas do LSEE pelo convívio nos congressos e laboratório.

Ao Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS/MG) que abriu as portas para a minha vida acadêmica e a todos os profissionais que participaram direta e indiretamente desta conquista, em especial aos gestores da educação tecnológica, presencial, a distância e de pós-graduação; coordenadores dos cursos de bacharelado em Ciência da Computação e Sistemas de Informação; professores e colegas do departamento de Tecnologia da Informação.

Ao professor Alex Donisete Rosário pela contribuição na concepção do Abstract e a Joyce Maria Tamehiro por me ajudar em tudo, que em tão pouco tempo, conquistou uma importância muito grande na minha vida.

Aos alunos dos cursos que ministrei, pela troca de experiências e convívio harmonioso, sincero e amigo.

A todas as pessoas que estiveram e estão na minha vida nesses anos de muita dedicação, por fazerem parte deste momento tão importante.

*“A cada ano a vida pede mais de mim, mais de nós, mais além
o eterno aprendizado é o próprio fim”
Jorge Vercilo.*

Resumo

SILVA, Lázaro Eduardo. **Tecnologias Web Aplicadas aos Sistemas Elétricos de Potência**. 2010. 151f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

A utilização de equipamentos digitais e de meios de comunicação de dados, na conexão entre os dispositivos de uma subestação de energia elétrica oportunizam o uso de tecnologias para aprimorar e elevar as potencialidades de controle e supervisão do Sistema Elétrico de Potência. As concessionárias de energia elétrica demandam altos investimentos na construção e implantação de sistemas de supervisão, controle e aquisição de dados. A partir destes sistemas é possível visualizar em um mapa da rede elétrica, os pontos de instalação dos relés e os *status* do seu funcionamento, possibilitando a concretização de um diagnóstico e o controle destes equipamentos. A *World Wide Web* se tornou um meio conveniente para acesso às informações devido ao fato dos *browsers* serem capazes de integrar diferentes serviços de rede em uma única e amigável interface com o usuário. A implementação de um sistema de supervisão e controle utilizando tecnologias *Web* gratuitas pode, com custo competitivo, agregar dados que estejam dispostos geograficamente, em uma plataforma computacional ergonômica, coesa e flexível, provendo acesso aos mesmos a partir de qualquer dispositivo conectado a *Internet*. Como resultado deste trabalho, foi implementado um sistema *Web* de controle e supervisão de um *bay* típico de saída de linha com interface simples, geração de relatórios pertinentes e anúncio de eventos. Foi implementado um segundo sistema *Web* de supervisão de uma lógica de corte e restabelecimento de cargas conhecido como ERAC (Esquema Regional de Alívio de Carga) que, utilizando recursos distribuídos, exibe em uma interface intuitiva as regiões de atuação dos estágios de cortes, anunciando os eventos e gerando relatórios de interesse. Por fim, foi desenvolvido um sistema

de aquisição de dados de frequência e tensão de um medidor de qualidade da energia elétrica, construção de gráficos com os dados variantes no tempo, exportação dos dados de acordo com um período selecionado e implementação de uma rede neural perceptron multicamadas *Time Delay Neural Network* para predição dos valores de frequência futuros. As aplicações de supervisão e controle do sistema elétrico foram desenvolvidas com tecnologias *Web* e testadas em uma rede *Intranet*, de forma a avaliar a pertinência da implementação de aplicações para o sistema elétrico de potência, que podem ser acessadas de um *browser* padrão. Cabe ressaltar que todo sistema desenvolvido foi testado em equipamentos reais que fazem parte de uma estrutura laboratorial disponível, aos alunos de pós-graduação da Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica onde duas subestações com relés digitais comerciais são simuladas em bastidores interligados por um *backbone* de fibra óptica, os quais estão conectados a rede local do laboratório, permitindo o acesso remoto aos equipamentos. Tais sistemas, por estarem em plataforma *Web*, podem agregar recursos, que estão distribuídos, na construção de interfaces amigáveis e intuitivas, além da disponibilidade de acesso a informação de qualquer ponto conectado à *Internet* que uma aplicação *Web* oportuniza.

Palavras-Chave: Sistemas elétricos de potência, Tecnologias *Web*, Sistemas de supervisão e controle, Redes neurais artificiais, Redes de computadores, Relé digital de proteção.

Abstract

SILVA, Lázaro Eduardo. **Web technologies applied to Electrical Power Systems**. 2010. 151f. Master's Degree - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2010.

The use of digital equipment and data communication for the connection of the devices in an electric power substation provides the implementation of new technologies to improve and upgrade the potentialities of control and supervision of an Electrical Power System. The Utilities demand high investments in the establishment and implementation of Supervision, Control and Data Acquisition Systems. Based on these systems, it is possible to visualize a map of the electrical network, the installation points of digital relays and the status of their functions, making it possible the diagnosis and control of such equipment. The World Wide Web started a convenient access to information due to the friendly interface with the user. The implementation of a supervising and control system using free web technologies can, in a competitive cost, join data which are geographically available to an ergonomic computational platform and also provides access to the users from any device connected to the web. As a result of this work, a Supervision Web Control System of a typical bay with a simple interface was set up, as well as the development of reports and announcement of events. A second network supervision system for cutting load and for power reestablishment, known as Regional Load Relief Scheme, was implemented. Finally, a voltage and frequency data acquisition system from a power quality equipment with time varying graphics was developed as well as a implementation of a multiple neural perception net (Time Delay Neural Network) in order to predict future values of the frequency. The Supervision and Control applications were developed with web technologies and tested using an intranet in order assure the application on the Electrical Power System, which can be accessed by a standard

browser. It is relevant to mention that the whole system was tested in actual equipment which belongs to a laboratorial structure available to the post graduation students at the University of São Paulo, School of Engineering of São Carlos, Power Systems Laboratory where two substations with commercial digital relays are simulated and interconnected by a fiber optics backbone and also connected to the local laboratory network which allows remote access to the equipment. Such system as set up in a web platform that can add resources which are distributed in the development of a friendly and intuitive interface in addition to the availability of access to the information from any point connected to the web.

Key-words: Electrical power systems, Web technologies, Supervision and control systems, Artificial neural networks, Computer networks, Digital relay protection.

Sumário

I. Introdução.....	27
1.1 Objetivo Geral	34
1.2 Objetivos Específicos.....	34
1.3 Metodologia Utilizada	35
1.4 Contribuições	36
1.5 Organização do Texto	37
II. Revisão Bibliográfica	39
2.1 Comunicação de Dados em Redes <i>Ethernet</i>	39
2.2 <i>Web</i> Aplicada ao SEP	42
III. Revisão de Conceitos	49
3.1 Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.....	49
3.1.1 Prevenção e Controle de Falhas no SEP	50
3.1.2 Dispositivos que Reagem à Situação de Falta.....	51
3.1.3 Filosofias de Proteção	54
3.1.4 Funções de Proteção	54
3.1.5 Relés de Proteção.....	55
3.1.6 Relés Digitais	56
3.1.7 Características Funcionais dos Relés	58
3.1.8 Interfaces de Comunicação.....	59
3.2 Sistemas SCADA	60
3.2.1 Plataforma de <i>Hardware</i>	62
3.2.2 Estrutura dos Sistemas SCADA.....	63
3.2.3 Interface Homem-Máquina	65
IV. Tecnologias <i>Web</i>	67
4.1 WWW	67

4.2	<i>Browser</i>	68
4.3	HTTP	68
4.4	Servidor <i>Web</i> Apache.....	70
4.5	HTML - <i>HiperText Mark-up Language</i>	71
4.6	PHP - <i>Hypertext Preprocessor</i>	71
4.6.1	<i>Socket</i> em PHP	72
4.6.2	Redes Neurais Artificiais em PHP.....	72
4.7	<i>Asynchronous JavaScript and XML</i>	73
4.8	<i>jQuery</i>	75
4.9	SSL - <i>Secure Sockets Layer</i>	75
4.10	FTP - <i>File Transfer Protocol</i>	76
4.11	Telnet	76
4.12	Mysql.....	77
4.12.1	Diagrama Entidade Relacionamento	77
V.	Aplicações Desenvolvidas	79
5.1	Estrutura Laboratorial.....	79
5.2	Sistema <i>Web</i> de Controle e Supervisão de <i>Bay</i>	81
5.2.1	Segurança e Confiabilidade	92
5.3	Sistema Web de Supervisão do Esquema Regional de Alívio de Carga.....	94
5.3.1	Análise Temporal.....	104
5.3.2	Caracterização dos Testes.....	104
5.3.3	Testes Realizados.....	104
5.3.4	Análise do Tráfego Gerado.....	108
5.3.5	Medições Realizadas.....	108
5.3.6	Segurança e Confiabilidade	111
5.4	Sistema <i>Web</i> para Coleta, Manipulação, Disponibilização e Predição dos Dados Coletados por um Medidor de Qualidade da Energia Elétrica	112
5.4.1	Análise dos Dados de Frequência	113
5.4.2	Análise dos Dados de Tensão	115
5.4.3	Exportação dos Dados.....	117
5.4.4	Desenvolvimento da Aplicação de Predição da Frequência.....	119
VI.	Conclusões	125
6.1	Sugestões para Continuidade da Pesquisa	128
APÊNDICE A		137
ANEXO A		139

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Mapa do sistema de transmissão elétrico brasileiro.....	28
Figura 2 - Níveis hierárquicos de um sistema de automação de subestação.	30
Figura 3 - Principais protocolos de automação de subestações.....	31
Figura 4 - Sistema de supervisão e controle.....	33
Figura 5 - Metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.....	36
Figura 6 - Acesso <i>online</i> ao sistema <i>Web</i> desenvolvido em <i>Java</i>	44
Figura 7 - Modelo de arquitetura do servidor <i>Web</i>	45
Figura 8 - Sistema SCADA com e sem FCML.	46
Figura 9 - Esquema de acesso ao laboratório.....	46
Figura 10 - Tela de controle do motor via acesso remoto ao sistema.	47
Figura 11 - Modelo ilustrativo de um sistema elétrico de potência.	50
Figura 12 - Estados de operação do SP.	52
Figura 13 - Processo de decisão de <i>Trip</i>	53
Figura 14 – Causas de perturbações no sistema elétrico.	54
Figura 15 - Subsistemas de um SP.....	55
Figura 16 - Principais subsistemas de um relé digital.....	57
Figura 17 - Características dos relés de proteção.....	59
Figura 18 - Ligação com a interface RJ-45.	60
Figura 19 - Fibra óptica.	60
Figura 20 - SCADA gráfico composto por janelas.	63
Figura 21 - Painéis mímicos.	64
Figura 22 - Composição estrutural de um sistema SCADA.	64
Figura 23 - Funcionamento de um <i>browser</i>	68
Figura 24 - Comparação de uma requisição HTTP com e sem <i>Ajax</i>	74

Figura 25 - Requisições síncronas modelo clássico e assíncronas com <i>Ajax</i> .	74
Figura 26 - Estrutura laboratorial do LSEE.	80
Figura 27 - <i>Bay</i> em estudo.	81
Figura 28 - Comando, intertravamento e supervisão para o disjuntor DJ1.	82
Figura 29 - Funcionamento da lógica para controle das chaves e disjuntor.	83
Figura 30 - Montagem do ensaio implementado.	84
Figura 31 - Conexão do <i>socket</i> em PHP.	85
Figura 32 - Diagrama entidade relacionamento da aplicação controle de <i>bay</i> .	86
Figura 33 - Enlace para acesso remoto em rede <i>Ethernet</i> .	86
Figura 34 - Sistema implementado.	87
Figura 35 - Interface inicial do sistema.	88
Figura 36 - Menu de cadastro de usuário.	89
Figura 37 - Intertravamentos implementados.	90
Figura 38 - Sequências de manobras para a energização e a deserenergização total do <i>bay</i> .	90
Figura 39 - Histórico de operação dos equipamentos do <i>bay</i> .	91
Figura 40 - Implementação do ERAC.	96
Figura 41 - Montagem do ensaio implementado.	97
Figura 42 - Tela de relatórios do equipamento.	97
Figura 43 - Diagrama entidade relacionamento da aplicação do ERAC.	99
Figura 44 - Enlace para acesso remoto em rede <i>Ethernet</i> .	100
Figura 45 - Sistema implementado.	100
Figura 46 - Interface inicial do sistema.	101
Figura 47 - Tela de cadastro de usuário.	102
Figura 48 - Histórico de atuação do ERAC.	102
Figura 49. Ambiente de teste.	104
Figura 50. Gráfico das requisições HTTP com <i>Ajax</i> em 1,5s.	105
Figura 51. Gráfico da conexão Telnet com <i>Socket</i> em 1,5s.	106
Figura 52. Gráfico das requisições HTTP com <i>Socket</i> em 1,5s.	107
Figura 53. Gráfico das requisições HTTP com <i>Socket</i> em 0,10s.	107
Figura 54 - Esquema para medir o tráfego da rede.	108
Figura 55. Tráfego das requisições HTTP com <i>Ajax</i> .	109
Figura 56. Tráfego da conexão Telnet com <i>Socket</i> .	109
Figura 57. Gráfico das requisições HTTP com <i>Socket</i> .	110
Figura 58 - Ligação das fases e neutro do medidor.	113
Figura 59 - Ligação da porta <i>Ethernet</i> do medidor.	113
Figura 60 - Gráfico da frequência atual do sistema.	114

Figura 61 - Gráfico da variação de frequência no dia.....	114
Figura 62 - Gráfico da variação de frequência na semana.....	115
Figura 63 - Gráfico da variação de frequência no mês.	115
Figura 64 - Gráfico da tensão atual.....	116
Figura 65 - Gráfico da variação de tensão no dia.	116
Figura 66 - Gráfico da variação de tensão na semana.....	117
Figura 67 - Gráfico da variação de tensão no mês.	117
Figura 68 - Gráfico de frequência do período selecionado.	118
Figura 69 - Arquivo de <i>download</i> com os dados de frequência.	118
Figura 70 - Gráfico de tensão do período selecionado.	119
Figura 71 - Arquivo de <i>download</i> com os dados de tensão.	119
Figura 84 - Arquitetura de PMC com entradas atrasadas no tempo.....	121
Figura 72 - Topologia da rede neural.	122
Figura 73 - Resultado da rede neural de predição dos valores de frequência.....	122
Figura 74 - Modelo RM-OSI.....	140
Figura 75 - Comparação modelo RM-OSI e TCP/IP.....	145
Figura 76 - Organização conceitual e protocolos do TCP/IP.....	145
Figura 77 - Tunelamento IPv6 IPv4.....	147
Figura 78 - Estabelecendo conexão TCP.	148
Figura 79 - Finalizando conexão TCP.....	148
Figura 80 - Comunicação utilizando protocolo UDP.....	149

Lista de Tabelas

TABELA 1 - Volume de informações que chegam aos centros de operação.	29
TABELA 2 - Métodos internos de solicitações HTTP.	69
TABELA 3 - Manobras efetuadas através do sistema <i>Web</i>	92
TABELA 4 - Filosofia do ERAC.....	95
TABELA 5 - Testes realizados.....	103
TABELA 6 - Exemplo da formatação dos dados de treinamento.....	121

Lista de Abreviaturas e Siglas

A/D - Analógico Digital.....	57
AC - Autoridade Certificadora	75
Ajax - <i>Asynchronous JavaScript and XML</i>	73
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica	28
API - <i>Application programming interface</i>	45
ARP - <i>Address Resolution Protocol</i>	144
ASCII - <i>American Standard Code for Information Interchange</i>	76
Bth - <i>Butterworth</i>	57
CPU - Unidade Central de Processamento.....	58
CSMA/CD - <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>	140
CSS - <i>Cascading Style Sheets</i>	71
DHCP - <i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>	147
DNS - <i>Domain Name System</i>	147
DOM - <i>Document Object Model</i>	75
DoS - <i>Denial of Service</i>	93
EESC - Escola de Engenharia de São Carlos.....	35
EJB - <i>Enterprise Java Bean</i>	44
EPROM - <i>Erasable Programmable Read-Only Memory</i>	58
ERAC - Esquema Regional de Alívio de Carga.....	44
FANN - <i>Fast Artificial Neural Network Library</i>	73
FCML - <i>Facility Control Markup Language</i>	45
FTP - <i>File Transfer Protocol</i>	76
GOOSE - <i>Generic Object Oriented Substation Event</i>	42
GSSE - <i>Generic Substation Status Event</i>	42

HTML - <i>HyperText Markup Language</i>	33
HTTP - <i>HyperText Transfer Protocol</i>	33
HTTPS - <i>HyperText Transfer Protocol Secure</i>	75
I - Corrente	57
ICMP - <i>Internet Control Message Protocol</i>	144
IEC - <i>International Electrotechnical Commission</i>	30
IED - <i>Intelligent Electronic Device</i>	29
IGMP - <i>Internet Group Message Protocol</i>	144
IHM - Interface Homem-Máquina	65
IP - <i>Internet Protocol</i>	33
ISO - <i>International Organization for Standardization</i>	137
JNI - <i>Java Native Interface</i>	44
LAN - <i>Local Área Network</i>	40
LSEE - Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica	35
MAC - <i>Media Access Control</i>	139
MAN - <i>Metropolitan Area Network</i>	40
MLP - <i>Multilayer Perceptron</i>	73
MMS - <i>Manufacturing Message Specification</i>	41
MUX - Multiplexador	57
ONS - Operador Nacional do Sistema	28
OPGW - <i>Optical Ground Wires</i>	39
PHP - <i>Hypertext Preprocessor</i>	71
PLC - <i>Programmable Logic Controller</i>	29
RAM - <i>Random Access Memory</i>	58
RARP - <i>Reverse Address Resolution Protocol</i>	144
RFC - <i>Request for Comments</i>	143
RMI - <i>Java Remote Method Invocation</i>	44
RM-OSI - <i>Reference Model - Open Systems Interconnection</i>	137
RNA - Redes Neurais Artificiais	73
ROM - <i>Read-Only Memory</i>	58
RSA - <i>Rivest, Shamir e Adleman</i>	93
S/H - <i>Sample and Hold</i>	57
SAS - Sistemas de Automação de Subestações	28
SCADA - Sistemas de Supervisão Controle e Aquisição de Dados	32
SCTP - <i>Stream Control Transmission Protocol</i>	146

SDCD - Sistemas Digitais de Controle Distribuídos.....	62
SDH - <i>Synchronous Digital Hierarchy</i>	40
SEP - Sistema Elétrico de Potência.....	27
SIN - Sistema Interligado Nacional	28
SOAP - <i>Simple Object Access Protocol</i>	45
SONET - <i>Synchronous Optical Network</i>	40
SP - Sistema de Proteção	50
SQL - <i>Structured Query Language</i>	77
SSL - <i>Secure Sockets Layer</i>	75
STP - <i>Shielded Twisted Pair</i>	60
TC - Transformador de Corrente.....	55
TCP - <i>Transmission Control Protocol</i>	33
TP - Transformador de Potencial.....	55
UDDI - <i>Universal Description Discovery Integration</i>	45
UDP - <i>User Datagram Protocol</i>	146
URL - <i>Uniform Resource Locator</i>	68
USP - Universidade de São Paulo	35
UTP - <i>Unshielded Twisted Pair</i>	60
V - Tensão.....	57
VLSI - <i>Very Large Scale Integration</i>	43
VOIP - <i>Voice Over IP</i>	40
WAN - <i>Wide Area Network</i>	40
WSDL - <i>Web Services Definition Language</i>	45
WWW - <i>World Wide Web</i>	34
XML - <i>Extensible Markup Language</i>	45

I.Introdução

A *Internet* com o uso do navegador para acessar conteúdo de diversas mídias teve início em 1993, quando a *Web* teve uma explosão de popularidade. Ela continuou a crescer de maneira vertiginosa durante toda a década de 1990, chegando ao ápice em 2001. Em 2003, havia uma mudança visível no modo como as pessoas e os negócios estavam usando a *Internet* [1]. O crescimento da *Web* pode ser atribuído ao *hardware* que tem se tornando cada vez mais barato e rápido, o que permite o desenvolvimento de aplicações com alta demanda. Ao uso da banda larga que é cada vez mais comum. No Brasil, as tecnologias Wi-Fi¹, ADSL² e 3G³ têm impulsionado esta popularização. A abundância de mídia digital *online* não seria possível sem *Internet* de alta velocidade. A farta disponibilidade de *software* de código aberto que resultou em opções personalizáveis de baixo custo, ou mesmo gratuitas.

O uso de tecnologias *Web* no SEP (Sistema Elétrico de Potência) é comedido. Pesquisas recentes apontam para uma possível expansão, tendo em vista que um ambiente *Web* pode integrar diferentes serviços em uma única e amigável interface. O principal fator motivador de tais pesquisas se refere ao volume de informações no SEP.

O Brasil possui atualmente um total de 2.046 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação, perfazendo um total de 103,14GW de potência. São 1.008 agentes investindo no mercado de energia elétrica brasileiro, em que um agente pode atuar em vários destinos [2]. Cabe dizer, que o caso brasileiro é único em características e tamanho no mundo, sendo um sistema hidrotérmico, com predominância de usinas hidroelétricas e com diversos proprietários [3]. A Figura 1 apresenta um mapa com o sistema de transmissão elétrico brasileiro.

¹ Tecnologia de redes sem fio do padrão IEEE802.11 [75].

² ADSL é uma tecnologia de comunicação assimétrica desenvolvida para usuários residenciais [8].

³ Os sistemas 3G suportam voz e dados, mas com uma ênfase crescente em capacidades de dados e enlaces de acesso via rádio com velocidade maior [66].

Figura 1 - Mapa do sistema de transmissão elétrico brasileiro
Fonte: [3]

Em função das singularidades do sistema elétrico brasileiro, foi criado o SIN (Sistema Interligado Nacional), formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Seu objetivo é garantir a intercambialidade da energia gerada nas várias usinas do sistema para as diversas regiões consumidoras. O SIN está sob o controle de um órgão gerencial chamado ONS (Operador Nacional do Sistema) que, por sua vez está sob fiscalização e regulação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Para que o SIN possa ser operado de forma segura e pertinente, uma série de informações sobre o mesmo são requisitadas pelo ONS. A obtenção de tais informações é feita através de SAS (Sistemas de Automação de Subestações), o qual tem como função maximizar a capacidade operacional do SIN, visando à qualidade do serviço prestado, eficiência e redução de custos. O SAS é formado por um conjunto de técnicas por meio das quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com eficiência no uso de informações recebidas do meio

sobre o qual atuam [4]. A TABELA 1 apresenta, de forma resumida, a quantidade de informações de interesse solicitadas pelo ONS.

TABELA 1 - 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: 34.000 Pontos Analógicos: 7.100
COSR-NE (Nordeste)	Pontos Digitais: 22.964 Pontos Analógicos: 3.977
COSR-N (Norte)	Pontos Digitais: 1.263 Pontos Analógicos: 7.512
COSR-S (Sul)	Pontos Digitais: 20.300 Pontos Analógicos: 7.100
Centro Nacional de Operação do Sistema Elétrico (CNOS)	Pontos Digitais: 26.179 Pontos Analógicos: 13.201

Fonte: [5]

Para que tal volume de informações, visto na TABELA 1, possa ser utilizado de forma produtiva pelo ONS é necessário que estruturas computacionais e de comunicação de dados sejam adequadamente projetadas e implementadas para esse fim.

A utilização de tecnologia digital e a incorporação de interfaces de comunicação nos relés de proteção permitem sua interligação através de redes de comunicação de dados, o que viabiliza o desenvolvimento de SAS cada vez mais robustos e confiáveis. Estes sistemas são amplamente utilizados nas concessionárias de energia elétrica para comunicar os equipamentos inter e intra níveis de automação, automatizando os processos. A necessidade de desempenho, qualidade, satisfação dos clientes e lucro da concessionária de energia elétrica, são elementos motivadores para o desenvolvimento de SAS.

Existem vários equipamentos que podem compor um SAS, como computadores industriais, processadores de comunicação, PLCs (*Programmable Logic Controller*), IEDs (*Intelligent Electronic Device*)[6]. Estes dispositivos são interligados através de uma interface de comunicação de forma a permitir sua integração para a execução de lógicas de controle e intertravamento que irão viabilizar o perfeito funcionamento do SEP. Para facilitar a compreensão, um SAS pode ser dividido em níveis hierárquicos: de estação, de *bay* e de processo.

No nível de processo, disjuntores e chaves seccionadoras recebem comandos e enviam a situação dos seus estados para dispositivos do SEP. Os transformadores de corrente e potencial fazem leituras das grandezas do SEP, convertendo-as em valores plausíveis para uso em níveis acima.

No nível de *bay*, estão as unidades de controle e proteção. Tais unidades são responsáveis por todo o aparato lógico da proteção e controle do SEP. Cabe observar que este processo

muitas vezes é realizado de maneira conjunta entre os dispositivos que estarão trocando informações através de um meio de comunicação.

No nível de estação estão as redes de comunicação interligadas aos meios de comunicação do nível de *bay*, os *softwares* de controle e configuração, e os sistemas supervisórios, importantes na aquisição e processamento de dados do SEP. Os sistemas desenvolvidos no presente trabalho encontram-se situados no nível de estação e acessam os equipamentos que compõem o nível de *bay* (Figura 2).

Figura 2 - Níveis hierárquicos de um sistema de automação de subestação.

O processo de comunicação entre os níveis hierárquicos do SAS carecem de padronização. Diversos fabricantes criam seus protocolos com características próprias de comunicação. O padrão IEC-61850 (IEC - *International Electrotechnical Commission*)[7] tem como premissa estabelecer um modelo de comunicação para dispositivos desta natureza. Este protocolo foi utilizado na implementação da lógica de comunicação entre os relês de proteção da presente pesquisa, descrito mais adiante.

Padrões são essenciais para os fabricantes de equipamentos, pois garantem a interoperabilidade de dados e de tecnologia dos equipamentos de comunicação e processos. Os padrões fornecem diretrizes aos fabricantes, fornecedores, órgão do governo e outros provedores de serviço para garantirem a interconectividade necessária no mercado atual e nas comunicações internacionais. A comunicação entre dois sistemas utiliza um conjunto de regras que define o que é comunicado, como e quando deve ser comunicado [8]. A esse conjunto de regras nomeia-se protocolo. Quando estes protocolos são desenvolvidos ou adaptados para atenderem questões específicas sem obedecerem um padrão, aspectos

importantes da comunicação de dados, que a padronização proporciona, ficam prejudicados podendo acarretar problemas futuros no processo de comunicação.

Nas últimas décadas, muitos protocolos de comunicação têm sido utilizados em subestações. A Figura 3 mostra alguns desses protocolos.

Figura 3 - Principais protocolos de automação de subestações.
Fonte [6] *apud* Gervitz

Alguns protocolos são concebidos para situações específicas ou de instalações únicas das subestações, outros são estruturados utilizando padrões e normas internacionais, mas também são ajustados às necessidades locais. Como é improvável que o SAS seja composto por equipamentos de um único fabricante, conversões onerosas de protocolos tornam-se necessárias para permitir a comunicação entre os equipamentos de automação da subestação. Tal situação aumenta os custos de implantação, manutenção e treinamento da equipe de trabalho, além de impossibilitar a comunicação diretamente entre os equipamentos [6], [9], [10].

Em 1994, um grupo de trabalho do Comitê Técnico do IEC de “Interfaces de Controle e Proteção de Subestações”, propôs a padronização das interfaces dos equipamentos de proteção, publicado como IEC 60870-5-103. Uma estreita cooperação entre as comissões técnicas responsáveis pelas normas relativas às interfaces dos dispositivos foi considerada obrigatória, onde a cooperação entre estas interfaces impulsionou o desenvolvimento de um padrão único para comunicação de dados entre IEDs denominado IEC-61850 [7]. As referidas comissões delegaram especialistas para elaboração deste padrão, que define o modelo de dados e a pilha de protocolos, que possibilita a troca de dados e tem como premissas básicas a interoperabilidade, (troca de informações entre equipamentos de fabricantes distintos) e a

possibilidade de configurações de funções com as necessidades dos usuários. Este modelo deve ser preparado para as evoluções que possam ocorrer, isto é, deve possibilitar a utilização dos progressos nas tecnologias de comunicação e nas necessidades dos usuários [11].

O aumento da capacidade do SEP resulta em complexidade neste sistema, aumentando a importância de realização da supervisão e controle de forma automatizada. O tratamento do volume de informações geradas pelos diversos equipamentos que compõem o sistema elétrico ficaria impraticável sem a utilização de sistemas automatizados.

Os sistemas SCADA (Sistemas de Supervisão Controle e Aquisição de Dados)[12] despontam nas subestações de energia elétrica como principal ferramenta para controle e supervisão do SEP. A presente pesquisa se move das funcionalidades deste sistema e sua forma de comunicação, para inspirar o desenvolvimento de sistemas *Web*, em situações específicas do SEP, como alternativa de baixo custo e com disponibilidade de acesso. A principal função de um SCADA é permitir que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. Tais informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados, como: sensores, transformadores de corrente e potencial; e, em seguida, manipuladas, analisadas, armazenadas e posteriormente, apresentadas ao operador.

Os SCADAs utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar a monitoração e controle dos processos, efetuando coleta de dados em ambientes complexos, eventualmente dispersos geograficamente, e a respectiva apresentação para o operador. Eles podem também verificar condições de alarmes, sendo possível a gravação de registros em banco de dados, ativação de alerta sonoro, utilização de cores para identificação do operador e envio de mensagens. Os SCADA se diferem dos SAS pelo nível de atuação. Muitas vezes os SCADAs utilizam de processos já automatizados pelos SAS para realizar a coleta, supervisão e controle dos processos. Pode-se ter um SAS sem supervisão, apenas automatizando processos através das lógicas de execução. Os SCADA atuam coletando os dados do sistema e projetando-os em sistemas computacionais de forma coerente, para a tomada de decisão do operador. Os componentes de um sistema de supervisão em geral são: sensores e atuadores, rede de comunicação e servidor de monitoração central (sistema computacional SCADA).

Os sensores são dispositivos conectados aos equipamentos controlados e monitorados pelos sistemas SCADA, que coletam os parâmetros físicos do SEP de tensão e corrente, por exemplo, para uso no sistema remoto. Os atuadores são utilizados para operar sobre o sistema, ligando e desligando determinados equipamentos assim como os disjuntores e chaves seccionadoras. Em alguns casos, os dados de medição e controle do SEP estão concentrados nos IEDs facilitando o processo de aquisição de dados.

A rede de comunicação é a plataforma por onde as informações fluem dos IEDs para o sistema SCADA e, levando em consideração os requisitos do sistema e a distância a cobrir, pode ser implementada através de cabos *Ethernet*, fibras ópticas, linhas *dial-up*, linhas dedicadas e conexão via rádio.

As estações de monitoração central são as unidades principais dos sistemas SCADA, sendo responsáveis por recolher a informação gerada pelos IEDs remotos e agir em conformidade com os eventos detectados, podendo ser centralizadas num único computador ou distribuídas por uma rede de computadores, de modo a permitir o compartilhamento das informações coletadas [13] (Figura 4).

Figura 4 - Sistema de supervisão e controle.

Os benefícios que os sistemas SCADA conferem às subestações de energia elétrica são motivadores ao desenvolvimento dos sistemas *Web* aqui descritos, propondo tornar as informações de relevância do SEP ainda mais disponíveis quanto à possibilidade de contato por qualquer ponto de acesso à *Internet*. A introdução da tecnologia digital, juntamente com a incorporação de meios de comunicação entre os dispositivos da subestação de energia elétrica, possibilita o uso de ferramentas para aprimorar a capacidade de supervisão sobre o SEP.

A *Internet* é cada vez mais utilizada como meio de comunicação para os sistemas SCADA. Através do uso de tecnologias relacionadas com a *Internet*, protocolos e padrões como *Ethernet*, TCP/IP⁴, HTTP (*HyperText Transfer Protocol*)⁵ e HTML (*HyperText Markup Language*)⁶, é possível acessar e compartilhar dados entre áreas de produção, áreas de supervisão e controle de vários IEDs. Um *browser*⁷ é capaz de integrar diferentes serviços de rede em uma única e amigável interface com o usuário. Através deste *software*, é possível controlar *online*, uma máquina localizada em qualquer parte do mundo. O cliente solicita a execução de um arquivo no servidor *Web*, através do protocolo HTTP, após o envio do pedido referente à operação pretendida, *scripts* são executados no servidor, de forma que a lógica de execução do sistema implementado se efetive possibilitando:

⁴ É uma pilha de protocolos utilizada em redes de comunicação de dados que tem como principais protocolos o TCP (*Transmission Control Protocol*) e IP (*Internet Protocol*) [53]

⁵ É o protocolo utilizado pela WWW para transmitir recursos [53]

⁶ É uma linguagem para criação de páginas *Web* [8]

⁷ É um programa cliente que interpreta e exibe documentos *Web* [8]

- acesso a outros dispositivos através de uma interface *Ethernet*;
- armazenamento, busca, atualização e remoção de registros em banco de dados;
- tratamento dos dados de forma a transformá-los em informações para exibição na interface.

Algumas das vantagens da utilização da *Internet* e do *browser*, como interface de supervisão e controle de sistemas são:

- o modo simples de interação, ao qual a maioria das pessoas já está habituada e;
- a facilidade de manutenção do sistema, que precisa ocorrer somente no servidor [11].

A WWW (*World Wide Web*) tornou-se um meio conveniente para acesso às informações. Os *browsers* possuem a capacidade de integrar diversas mídias acessando diferentes serviços de rede em uma única interface com o usuário. Sendo assim, a implementação de sistemas de supervisão e controle baseado em tecnologias *Web* gratuitas pode agregar dados que estejam dispostos geograficamente, em uma plataforma computacional, provendo acesso aos mesmos a partir de qualquer dispositivo conectado a *Internet*.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho investiga a potencialidade da *Web* na supervisão e controle de equipamentos do SEP. Para tal foram desenvolvidas aplicações que serviram como base de estudo para a concepção dos resultados, as quais foram testadas em IEDs de proteção, explorando suas possibilidades de comunicação. Uma das premissas adotadas no trabalho foi que todo o sistema deveria ser testado em equipamentos reais, comumente utilizados pelas concessionárias de energia elétrica. Outro ponto importante é a preocupação com a parte visual, explorando a potencialidade da interface que um sistema computacional oferece para apresentação dos dados de forma coesa e intuitiva. De posse dos resultados da experimentação de tais sistemas, foi possível elucidar quanto à pertinência do desenvolvimento de aplicações na *Web*, para supervisão e controle de equipamentos do SEP.

1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral proposto foram trabalhados os seguintes aspectos:

- Caracterizar o estado da arte de sistemas *Web* aplicados ao SEP;
- Estudar as possibilidades de comunicação oportunizadas pelos equipamentos de campo usualmente utilizados na concessionária de energia elétrica;
- Pesquisar ferramentas de desenvolvimento *Web* que trabalhem com as possibilidades de comunicação identificadas nos equipamentos de campo;

- Pesquisar recursos multimídia e ferramentas *Web* para deixar a interface do sistema amigável e ergonômica;
- Implementar um sistema *Web* para supervisão e controle de um *bay* típico de saída de linha;
- Implementar um sistema *Web* para supervisão de um Esquema Regional de Alívio de Carga;
- Implementar um sistema *Web* para coleta, manipulação, disponibilização e predição dos dados de um medidor de qualidade da energia elétrica.

1.3 Metodologia Utilizada

A metodologia de desenvolvimento do trabalho se atém ao objetivo de desenvolver sistemas *Web* realizando acessos a IEDs de proteção e equipamentos de qualidade de energia. Para tal, inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica buscando caracterizar o estado da arte da utilização de ferramentas *Web* no SEP. Uma vez observado os projetos e tendências destas aplicações, passou-se para análise das possibilidades de acesso remoto que os relés de proteção oportunizam observando principalmente:

- as interfaces de comunicação dos relés;
- os *softwares* proprietários de configuração remota;
- os protocolos e ferramentas percorridos na *Web*.

Cabe dizer que os equipamentos analisados fazem parte da estrutura laboratorial do LSEE (Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica) da EESC (Escola de Engenharia de São Carlos), USP (Universidade de São Paulo).

Esclarecido e caracterizado o campo teórico, passou-se à análise para o desenvolvimento do sistema com o levantamento de requisitos. Como pontos principais deste projeto têm-se a definição do sistema, ou seja, qual a proposta do sistema *Web*, a qual irá perpassar pela lógica a ser supervisionada, e a forma de comunicação com o IED que deve oportunizar o objetivo de controle e supervisão do seu funcionamento. Definido estes itens o sistema passa para o processo de desenvolvimento, inicialmente definindo as tecnologias *Web* a serem utilizadas e o *layout* do sistema, posteriormente a implementação.

O processo de implementação e testes se repetem, até que o sistema atinja uma maturidade que garanta o seu funcionamento conforme o esperado. Uma vez finalizado estes processos passa-se então, para a parte de avaliação do seu funcionamento observando características como performance, brechas de segurança, ergonomia da interface e amigabilidade do sistema. Durante a realização deste processo pode surgir a necessidade de alterações no sistema. Se assim ocorrer, o desenvolvimento retorna a fase de codificação. Caso

não ocorra o sistema está pronto para ser testado em situações reais. A Figura 5 ilustra em diagrama de blocos a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho.

Figura 5 - Metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

1.4 Contribuições

Ao final deste trabalho, espera-se contribuir com pesquisas de utilização de sistemas *Web* aplicadas ao SEP nos seguintes pontos:

- pronunciar quanto ao acesso remoto em equipamentos de campo utilizados no desenvolvimento das aplicações relatadas neste documento;

- certificar os protocolos, que estão sendo incorporados nos equipamentos de campo da concessionária de energia elétrica, que podem ser utilizados para a troca de informação entre equipamento e aplicação;
- apontar os pontos fortes e fracos da utilização de tecnologias *Web* no controle e supervisão de situações do sistema elétrico;
- verificar a pertinência e requisitos necessários para utilização destes sistemas em aplicações reais da concessionária de energia elétrica;
- apresentar ferramentas de código fonte aberto que podem ser robustas, para o desenvolvimento de aplicações de controle e supervisão de aplicações do SEP;
- vislumbrar a construção de interfaces intuitivas explorando os recursos da *Web*, que contribuirão para diminuir a possibilidade de falhas e aumentar a segurança em operações críticas de rotina da concessionária de energia elétrica;
- caracterizar o desenvolvimento de aplicações na *Web* utilizando técnicas inteligentes possibilitando explorar a contribuição dessas técnicas juntamente com os benefícios de se ter um sistema na *Web*;
- colaborar com o meio acadêmico publicando os dados de medição de um equipamento de qualidade da energia elétrica na Internet;
- desenvolver aplicações de controle e supervisão de lógicas de automação implementadas em relés de proteção.

1.5 Organização do Texto

A organização do presente trabalho encontra-se dividido nas seguintes seções: O Capítulo I contém uma introdução que contextualiza o trabalho de forma a justificar o uso de tecnologias *Web* aplicadas ao SEP, direcionando para os objetivos gerais e específicos, a metodologia utilizada e as contribuições com o desenvolvimento do trabalho. O Capítulo II descreve uma revisão bibliográfica criteriosa caracterizando o estado da arte da utilização de redes *Ethernet* na proteção, dos sistemas supervisórios e da aplicação de tecnologias *Web* no SEP. O Capítulo III realiza uma revisão de conceitos com enfoque ao SEP e sistemas SCADA. O Capítulo IV aborda as tecnologias *Web* a serem utilizadas no desenvolvimento do trabalho suas características e aplicações. O Capítulo V atinge as aplicações propostas demonstrando o desenvolvimento e os resultados obtidos nos sistemas *Web* empregados em casos de estudo. No Capítulo VI são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho, além dos pontos de continuidade da pesquisa. Ainda compõem o documento as referências bibliográficas. O apêndice A, onde são apresentados os resultados já obtidos com a divulgação científica do mesmo. O anexo A que perpassa as redes *Ethernet*

aplicadas ao SEP com o intuito de referenciar os conceitos a serem aplicados no desenvolvimento do projeto, como no entendimento da estrutura laboratorial, servidores, segurança e protocolos de comunicação.

II. Revisão Bibliográfica

A realização de pesquisas em empresas e universidades tende a desenvolver e explorar tecnologias que irão contribuir para a ciência desbravando situações pouco questionadas. Quando no investigar de tais tecnologias perpassam evolução, mesmo que em experimentos laboratoriais, as pesquisas tendem a traçar um panorama das suas potencialidades, bem como apontar os progressos que estão por vir. Neste contexto é pertinente realizar uma revisão bibliográfica, destacando as publicações pesquisadas na literatura, realizando uma breve abordagem do contexto da pesquisa e apresentando os resultados obtidos pelos autores.

2.1 Comunicação de Dados em Redes *Ethernet*

Segundo [8] “comunicação de dados é a transferência de dados de um dispositivo a outro através de um meio de transmissão; (...) redes é um conjunto de dispositivos de comunicação conectados por *links* de comunicação”. Dentro desta temática, [14] e [10] destacam como principais meios físicos de comunicação utilizados em subestações de energia elétrica:

- fio piloto: condutores metálicos utilizados para interligar relés diferenciais de corrente;
- ondas portadoras: utilizam-se de ondas viajantes na própria linha de transmissão como meio de comunicação;
- sinais de áudio: utiliza canais de baixa frequência variando-a quando alguma ação é exigida;
- microondas: região compreendida entre 10 e 30 GHz, com alcance de 30 a 80 km, propagam-se em linha reta sendo limitada pela visada direta e transmitida por antenas parabólicas;
- fibras ópticas: cabos dielétricos ou OPGW (*Optical Ground Wires*) com alta largura de banda e poucas perdas em transmissão de longas distâncias.

Os meios de comunicação supracitados permitem a interligação dos IEDs das subestações aumentando a possibilidade de aplicação de técnicas para melhorar a oferta da energia elétrica ao consumidor.

No artigo de Giovanini e Coury [15] é discutido o uso de agentes remotos baseados em sistemas de comunicação para a proteção local e de retaguarda. Nesta nova filosofia de proteção, os agentes encontram-se embarcados em cada um dos relés de proteção convencionais. O relé agente procura por informações relevantes comunicando-se com outros relés agentes localizados na mesma subestação ou em subestações remotas. Estas informações são utilizadas então para a detecção de faltas locais ou remotas, falha de relés, disjuntores e procurando compensar tais problemas com um melhor desempenho do que o apresentado por sistemas convencionais. A pesquisa se relaciona ao presente trabalho, uma vez que através de uma rede de comunicação é possível coletar as informações remotamente de agentes distribuídos no SEP, vislumbrando a integração dos dados do sistema para a tomada de decisão.

Skendzic e Moore [16] corroboram que a *Ethernet* baseada em redes locais LAN (*Local Area Network*) tornou-se uma ferramenta indispensável que promete revolucionar a comunicação no sistema elétrico. Os recentes avanços na tecnologia *Ethernet* tem tomado a indústria dos segmentos LAN de 10 Mbps para 100 Mbps seguido de 1 Gbps para redes metropolitanas MAN (*Metropolitan Area Network*) e, mais recentemente 10 Gbps para uso em redes de longa distância WAN (*Wide Area Network*). Até o momento, a comunicação entre subestações é tipicamente fornecida pela infra-estrutura de comunicação SONET/SDH⁸. Ainda bem compreendidos e largamente utilizados, estes padrões não são otimizados para o tráfego de dados e requerem um protocolo de mapeamento e tradução em ambas as extremidades da interface. A mais recente tendência de transmissão de voz sobre IP VOIP (*Voice Over IP*) necessita de serviços que combinados com o baixo custo de *switches Gigabit Ethernet* e de longo curso de fibra ótica tornou possível implantá-las em vastas áreas de aplicações. Os autores analisam as novas capacidades de automatização, proteção e controle de subestações, possíveis com as ligações *Ethernet* entre subestações. Esta análise exprime as capacidades desta tecnologia, o estado da arte e ferramentas disponíveis para gestão de redes *Ethernet*. O artigo também analisa exemplos, tais como: *Ethernet* baseado em regimes de proteção POTT⁹, *synchrophasor*¹⁰ e infra-estrutura de coleta de dados. Como conclusão é traçado um breve panorama da evolução de aplicações futuras, incluindo, por exemplo, o uso

⁸ São padrões de redes síncronas utilizado para interligar redes de longa distância. SONET (*Synchronous Optical Network*) definido pela ANSI (Estados Unidos) e SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) definido pela ITU-T (Europa), embora independentes, são semelhantes e compatíveis [8].

⁹ Esquema de comunicação de transferência de disparo com sobre-alcance permissivo [76].

¹⁰ Instrumento utilizado para medição das ondas elétricas em uma rede elétrica [14].

da *Ethernet* na proteção de linha diferencial. Todas as contribuições abordadas por esta pesquisa relatando os meios de comunicação utilizados no SEP denotam as diferentes tecnologias e formas de utilização da estrutura de comunicação de dados que as concessionárias de energia elétrica estão aplicando. Cabe ressaltar, que o uso dos padrões de redes locais oportunizam uma série de novas aplicações explorando o potencial de protocolos que as redes TCP/IP trabalham.

O trabalho de Jun-ping *et al* [17] relata que o protocolo *Ethernet* vem sendo utilizado gradualmente no processo de comunicação entre os dispositivos das subestações tornando-se o foco da automação para fabricantes e clientes. O trabalho menciona a criação do padrão IEC-61850 que contribui para a utilização da *Ethernet* em redes de comunicação e aponta como tendência para automação de subestações a construção de mensagens específicas MMS (*Manufacturing Message Specification*) em TCP/IP e *Ethernet*, sendo que esta plataforma proporcionará muitos benefícios para a construção e integração de sistemas. O trabalho demonstra em primeiro lugar os princípios básicos da comunicação em rede, sua plataforma de integração para automação de subestações incluindo *hardware* e *software*. Evidencia estudos em tempo real, performance, prioridade da *Ethernet*, MMS e protocolo TCP/IP usando over *Ethernet*¹¹. Este artigo também discute a rede de comunicação em tempo real, modelos cliente/servidor e ponto-a-ponto em subestações e explana os resultados da simulação de eventos de transferência de dados sob estes protocolos. O artigo justifica a utilização da *Ethernet*, com a diminuição de custo e a popularização do padrão que proporciona a integração das tecnologias da informação com o sistema de automação no chão de fábrica. Esta integração vem de encontro à proposta das aplicações desenvolvidas no presente trabalho que utiliza tecnologias de informação da *Internet* para controle e supervisão de equipamentos de chão de fábrica.

Ren *et al* [18], apresenta estudos sobre comunicação *Ethernet* baseado em um sistema de comunicação em subestação para apoiar a integração da proteção. O artigo evidencia recentes desenvolvimentos da proteção no sistema de energia e descreve um sistema de proteção em uma subestação integrada apoiada por uma rede de comunicação. Uma discussão detalhada sobre a concepção da rede de comunicação, dos protocolos de transmissão, sobre a capacidade e velocidade da rede, também são temas deste artigo. Sua conclusão mostra que a *Ethernet* é capaz de satisfazer a necessidade de integração da proteção o que vem colaborar com os demais artigos descritos, justificando a aplicação de tecnologias *Web* no controle e supervisão de sistemas de proteção.

¹¹ Over Ethernet é um padrão que permite transmitir energia elétrica com o cabo de rede [70]

Skendzic e Guzman [19] expõem que desde a criação da tecnologia *Ethernet* no início dos anos setenta, ela tem experimentado grande aceitação e tem crescido exponencialmente. Recentemente, esta tecnologia tem afastado praticamente seus concorrentes de rede local como: *Token Ring*, *Profibus*, *Modbus Plus* e *LonWorks*. Estes protocolos, na sua maioria, tinham que fazer conversões na camada física *Modbus TCP/IP*, *Profibus TCP/IP*, e *DNP TCP/IP*. Acreditava-se que a *Ethernet* ainda era inadequada para comunicações de missão crítica e aplicações em tempo real por causa de limitações inerentes associados a colisões tradicionais à base de acesso técnicas. No entanto, estimulado pelo desenvolvimento de normas internacionais IEEE 802.3x, 802.1q, 802.1p, 802.1w, IEC-61850-x-x, a *Ethernet* evoluiu para uma previsível e confiável tecnologia de rede em tempo real. Este artigo fornece uma visão geral das mais recentes normas e investiga seu impacto sobre a automação e proteção do sistema de energia. Deu-se especial atenção ao uso de mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) e GSSE (*Generic Substation Status Event*)¹² do padrão IEC-61850 bem como de novas opções para a transmissão analógica Over *Ethernet* de dados, descritas na norma IEC-61850-9-2. O documento inclui exemplos de utilização da *Ethernet* em aplicações de tempo real nas subestações de distribuição e na automação industrial, tais como, uma rápida transmissão de *Trip* ou uma reconfiguração da rede baseada na falha da proteção de um disjuntor. Esta pesquisa vem afirmar o uso da *Ethernet* no SEP sendo capaz de transmitir comandos de missão crítica utilizando as mensagens GOOSE utilizadas para troca de informações nas aplicações da presente pesquisa. O artigo se relaciona com o conteúdo pesquisado, pois reafirma o uso da *Ethernet* integrado com tecnologias de informação.

2.2 Web Aplicada ao SEP

O estado da arte demonstra que tecnologias para *Internet* vêm sendo utilizadas para o desenvolvimento de aplicações, para uso em situações do SEP. No artigo de Zecevic [20], é relatado o uso de um sistema *Web* para proporcionar o acesso aos dados do SCADA de diversos locais na companhia, a baixo custo e de forma segura. Com base em normas da concessionária de energia, a *Intranet* e o sistema SCADA são apresentados como solução, através de um *link* para o servidor do SCADA, o servidor *Web* coleta *online* o histórico, informações e publica-os aos usuários que podem acessá-los por um *browser*. A solução apresentada prevê uma camada de informação que é independente do sistema operacional, reduz o *hardware*, *software* e os custos administrativos, além de melhorar a confiabilidade e

¹² GOOSE e GSSE são mensagens de alta prioridade pertencentes à classe GSE (*Generic Substation Event*) do padrão IEC-61850, capazes de trafegar dados de alteração dos estados [10].

segurança dentro da empresa. Tal sistema viabiliza o acesso a informação através de um *link* com a *Internet* de qualquer lugar do mundo. Esta pesquisa demonstra um dos benefícios mais comuns de utilizar a *Internet* para acesso aos dados do SEP. A disponibilidade da informação de qualquer lugar que tenha um ponto de acesso *Internet*.

O artigo de Sutherland e Irvine [21] expõe que o desempenho do sistema de energia elétrica pode ser significativamente melhorado em velocidade e confiabilidade através do estudo da aplicação de métodos padrão da *Internet*. O registro de trabalhos e ordens de serviço quando armazenados em um banco de dados, podem ser acessados, em um sistema *Web*, pelos clientes através da *Internet*. A coleta dos dados iniciais para estudo é realizado pelo preenchimento de formulários, que são mantidos e compartilhados na *Internet*. Os principais cálculos e elaboração de relatórios são embarcados no sistema *Web*, que fornecem resultados em conformidade com os padrões da indústria. Os dados destes formulários são incorporados no cálculo das rotinas que simplificam a realização de um estudo complexo, onde terá que visualizar tabelas, dimensionamento de disjuntor, e indicadores de manutenção. Os resultados são apresentados em uma página *Web* usando *hiperlink* que conecta a tabela de conteúdos nos textos e arquivos gráficos, e é acessível pelo cliente utilizando uma senha. O mesmo relatório pode ser facilmente reproduzido em formato digital para ser gravado e distribuído em CD-ROM. Esses formatos são o primeiro passo para um formato uniforme de dados para estudos dos sistemas de energia elétrica. O artigo demonstra formas de gestão do conhecimento utilizando um sistema *Web* de cadastro das informações e relatórios pertinentes, como facilitador do processo de divulgação dos resultados. Este sistema inspira a elaboração dos relatórios das aplicações da presente pesquisa, observando a contribuição que este levará para a tomada de decisão no SEP.

Outros trabalhos relevantes que seguem o contexto de utilização da *Web*, juntamente com sistemas SCADA, são os artigos de Qiu e Gooi [22] e Qiu et al [23]. O primeiro artigo narra que a *WWW* tornou-se uma forma conveniente para acessar informação sobre a rede, porque o navegador integra diferentes serviços de rede em uma interface de usuário comum e facilmente acessível. Estas características atreladas aos baixos custos de investimento são particularmente adequadas para versar as informações de um SCADA. Este artigo descreve o desenvolvimento de um aplicativo *Web* implementado com base na arquitetura cliente/servidor, onde o usuário pode visualizar os dados de diagramas *online* gerados automaticamente por VLSI (*Very Large Scale Integration*) que usa técnicas de localização e roteamento. Além disso, o usuário pode controlar o funcionamento da subestação no servidor

do site. A escolha da linguagem Java¹³ se justifica nas exclusivas e poderosas funcionalidades como nenhuma necessidade de instalação no cliente, acesso sob demanda e independência de plataforma para a concepção do sistema SCADA. O segundo artigo segue a mesma idéia e coloca que as necessidades operacionais e comerciais da indústria podem exigir sistemas de informação não só para desempenhar funções tradicionais, mas também como apoio a novas funções, especificamente para atender às necessidades da concorrência com a desregulamentação. O rápido desenvolvimento da *Internet* e da computação distribuída tem aberto uma porta viável e rentável para o desenvolvimento de soluções aplicadas ao SEP. Utilizando sistemas SCADA e VLSI, conforme relatado, tal artigo descreve o desenvolvimento de um sistema utilizando JNI (*Java Native Interface*), RMI (*Java Remote Method Invocation*), e EJB (*Enterprise Java Bean*) que oferecem através de uma única interface e poderosas ferramentas, com custo zero de instalação no cliente, um acesso sob demanda, independente de plataforma com visualização *online* do sistema SCADA possibilitando sua operação e gestão. A Figura 6 ilustra os resultados obtidos com o sistema supracitado.

Figura 6 - Acesso *online* ao sistema *Web* desenvolvido em *Java*.

Fonte [23]

Os resultados do artigo mencionado se assemelham com o que se propôs com as aplicações. Desenvolver sistemas com interface intuitiva para controlar e supervisionar lógicas no SEP. No artigo de Qiu et al [23] foi desenvolvido um SCADA *online*. A Figura 6 foi selecionada, pois ela demonstra duas telas do sistema relatado no artigo. Na primeira, o desenho de um mapa com as regiões supervisionadas em destaque, conforme o mapa utilizado na aplicação do ERAC (Esquema Regional de Alívio de Carga). Na segunda um diagrama unifilar do sistema elétrico, que recorda a aplicação de controle de *bay*.

¹³ É uma linguagem de programação orientada a objeto, interpretada desenvolvida pela *Sun Microsystems* [71]

Chen *et al* [24] identifica novos requisitos de integração relacionados à operação, comercialização e manutenção de um sistema de energia. A infra-estrutura de um servidor *Web* é proposta para obter informações de integração nos sistemas de energia. O objetivo é relatar o desenvolvimento de um *framework* aberto, flexível e escalável com grande capacidade de cooperação e integração. A Figura 7 demonstra o modelo proposto:

Figura 7 - Modelo de arquitetura do servidor *Web*.
Fonte[24]

Este modelo tem como principais tecnologias o XML (*Extensible Markup Language*) e o SOAP (*Simple Object Access Protocol*) sendo que o XML é utilizado para padronizar o formato das mensagens entre diferentes plataformas e o SOAP padroniza a comunicação entre as plataformas. O servidor *Web* provedor descreve o seu serviço e publica-o utilizando WSDL (*Web Services Definition Language*) no servidor de registro. O servidor *Web* consumidor utiliza API (*Application programming interface*) e UDDI (*Universal Description Discovery Integration*) para descobrir, localizar e apontar para um serviço. Algumas questões para execução de serviços *Web* baseados em SCADA são tratados no artigo como estudo de caso de uma nova infra-estrutura. O artigo demonstra como tecnologias *Web* podem realizar a integração da operação, comercialização e manutenção de um sistema de energia elétrica. Para a compreensão do artigo, as tecnologias em questão foram explicitadas, compondo o conjunto de ferramentas pertinentes para o desenvolvimento de aplicações na *Web*. A abordagem realizada contribui com a presente pesquisa no que tange a explicitar a potencialidade de ferramentas *Web* aplicada no SEP.

O trabalho de Bry *et al* [25] descreve que no domínio de sistemas SCADA, desafios significativos residem na diversidade de interfaces proprietárias e protocolos que acompanham os componentes e dispositivos fornecidos por diferentes fabricantes. O artigo descreve o FCML (*Facility Control Markup Language*) que é uma linguagem de padronização concebida para proporcionar acesso uniforme a diferentes dispositivos que normalmente só iriam aderir

a interfaces e protocolos proprietários. Como uma aplicação da linguagem XML, o FCML foi idealizado como uma aberta e extensível arquitetura que pode ser facilmente adaptada e ampliada para incluir exigências de futuras aplicações e dispositivos. O sistema sugere uma visão subjacente à conjectura do uso da *Web* em sistemas SCADA como promissoras para uma vasta gama de aplicações, por razões de modularidade e facilidade de implantação, conforme o proposto na presente investigação. A Figura 8 ilustra o funcionamento de um sistema SCADA com e sem FCML.

Figura 8 - Sistema SCADA com e sem FCML.
Fonte [25]

O artigo de Aydogmus e Aydogmus [26] usa a *Internet* como oportunidade de acesso dos alunos, de fora do campus, ao laboratório da universidade por intermédio de um sistema SCADA conforme Figura 9.

Figura 9 - Esquema de acesso ao laboratório.
Fonte [26]

No trabalho é relatado o acesso remoto a um motor de indução situado no laboratório de forma a exemplificar sua eficácia utilizando equipamentos reais. Um PLC é utilizado para controle da operação e um SCADA monitora e controla o processo, sendo que algumas limitações foram colocadas sobre o PLC para proteger o motor de sobrecarga e excesso de

velocidade. O acesso ao sistema supervisorio via *Internet* oferece uma soluão econ4mica para os alunos realizarem experimentos em um ambiente laboratorial. A interface *Web* foi desenvolvida utilizando ASP.NET¹⁴ e implementada no ambiente Visual Studio¹⁵, a proposta al4m de possibilitar acesso 4s informa4es das experi4ncias realizadas no laborat4rio, contribui para melhorar as compet4ncias dos estudantes sobre a arquitetura de sistemas SCADA em uso nas concession4rias de energia. A Figura 10 ilustra a interface de controle do motor via acesso remoto ao sistema.

Figura 10 - Tela de controle do motor via acesso remoto ao sistema.
Fonte [26]

A aplica4o descrita por Aydogmus e Aydogmus [26], foi desenvolvida com objetivos parecidos aos da terceira aplica4o deste documento. Com fins did4ticos ela permite a divulga4o do trabalho e a realiza4o de pesquisas a partir do ambiente *Web* implementado.

Para Moslehi e Kumar [27], a crescente complexidade das redes de energia, a crescente demanda, a necessidade de maior confiabilidade de rede, segurana e efici4ncia, bem como a sustentabilidade ambiental e energ4tica s4o preocupa4es que continuam a destacar a necessidade de um salto em termos de aproveitamento da comunica4o e de tecnologias da informa4o no SEP. Este salto 4 referido no artigo como *Smart Grid*. O *Smart Grid* prop4e a integra4o dos equipamentos do SEP com as centrais da concession4ria de energia el4trica.

¹⁴ ASP.NET 4 uma linguagem de programa4o voltada para o desenvolvimento de aplica4es *Web* criada pela *Microsoft*. [72]

¹⁵ Ambiente de desenvolvimento de aplica4es ASP.NET criado pela *Microsoft*. [72]

Tal integração necessita de equipamentos inteligentes, capazes de se comunicar através de uma rede de comunicação de dados. Com as informações destes equipamentos em formato digital e formatado de forma coesa e intuitiva, as concessionárias podem decidir quanto à manutenção preventiva, tarifação por horário e faixa de consumo, identificação de cargas ligadas ao sistema elétrico e o quanto estas comprometem a tarifação, além da possibilidade de integração com outros equipamentos digitais. O *Smart Grid* trabalha com a filosofia de que a inteligência do sistema está distribuída nestes equipamentos. Sua integração e utilização de forma automática possibilitarão o uso da energia gerada de forma inteligente e sem desperdícios na distribuição [28]. O artigo de Moslehi e Kumar [27] analisa criticamente os impactos de confiabilidade de grandes recursos de redes inteligentes, como as renováveis, a demanda por resposta aos incidentes e o armazenamento. Em seguida os autores apresentam uma grande estrutura de Tecnologia da Informação para atender os desafios de confiabilidade desta rede. Outro fator relevante tratado no artigo relaciona-se a sinergia com as práticas correntes de acesso à informação através da *Internet* utilizando as mais diversas tecnologias como dispositivos móveis. Esta rede se relaciona com a proposta da aplicação de coleta, manipulação, disponibilização e predição dos dados de um medidor de qualidade da energia elétrica, demonstrando a pertinência da aplicação desenvolvida.

O referencial teórico apresentado constata que a presente pesquisa perpassa por diversos conceitos da área de computação e sistemas elétricos. Para a completa compreensão das aplicações, o capítulo III relata os equipamentos utilizados, suas características que oportunizaram a realização da pesquisa e o ambiente em que atuam. Outra caracterização do capítulo mencionado se refere aos sistemas SCADA os quais inspiraram o desenvolvimento das aplicações *Web* deste trabalho.

III. Revisão de Conceitos

A multidisciplinaridade da pesquisa realizada remete a uma série de conceitos que necessitam ser contextualizados. Para a compreensão da atuação dos sistemas é necessário vislumbrar a estrutura do SEP, os equipamentos inseridos neste, o sistema de proteção e ferramentas de controle e supervisão.

Na aplicação do controle de *bay*, a descrição do SEP da geração à distribuição permite a percepção de onde os equipamentos que o compõem estão situados. Esta descrição é necessária também por caracterizar a importância do controle completo e seguro do *bay*. Para a aplicação do ERAC, a caracterização do sistema de proteção se faz necessária, uma vez que demonstra a sua filosofia, funções e principais equipamentos que o compõem. Na descrição do equipamento são evidenciadas suas propriedades que permitem a atuação das aplicações desenvolvidas. Uma posterior caracterização dos SCADAs se fez necessária, pois este é o motivador para o desenvolvimento desta pesquisa. Em maior escala, este sistema tem semelhanças aos aqui descritos.

3.1 Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

O consumo de energia elétrica em residências, comércios, serviços e indústrias, necessita da instalação, manutenção e controle de um aparato tecnológico que viabiliza sua geração, transmissão e distribuição. O contínuo crescimento da demanda de energia elétrica requer um aumento dos recursos despendidos, tornando este sistema cada vez mais complexo. O conjunto de infra-estruturas que o compõem é comumente chamado de SEP que pode ser ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Modelo ilustrativo de um sistema elétrico de potência.
Fonte: [29]

A geração de energia elétrica é realizada por usinas que podem ser hidráulicas, eólicas, térmicas ou termonucleares. Estas usinas utilizam do movimento rotatório de turbinas, resultado da passagem de água, ar ou vapor, acopladas a geradores elétricos para produzirem eletricidade.

Uma vez gerada a energia, transformadores elevadores de tensão são utilizados para a transmissão em linhas de alta tensão. Este fato é necessário, pois em alta tensão é possível transmiti-la a grandes distâncias com pequenas perdas. As linhas de transmissão podem ser terrestres ou aéreas, elas têm por objetivo conduzir a energia gerada nas usinas até as subestações de distribuição percorrendo vários quilômetros.

As subestações de distribuição possuem localização próxima aos centros consumidores. Nela ocorrerá a redução da tensão, de forma que sua distribuição possa ocorrer dentro dos centros urbanos. Neste percurso, linhas de distribuição geograficamente menores irão conduzir a energia para abastecer cargas industriais, comerciais, de serviços e residenciais.

Diante de toda essa estrutura é impossível tornar o SEP imune às perturbações e distúrbios causados por situações internas e externas ao sistema elétrico [30]. Assim, técnicas para identificação de distúrbios e atuação nesses casos são muito importantes motivando diversas pesquisas na área. Conforme apresentado a seguir.

3.1.1 Prevenção e Controle de Falhas no SEP

Segundo [31], a maior parte dos defeitos no SEP podem ser controladas para limitar os danos a fim de melhorar a confiabilidade do sistema, exceto em situações severas como acúmulo de gelo, furacões e tornados. Como o funcionamento do SEP sem falhas é improvável, a alternativa é projetar um SP (Sistema de Proteção) para detectar condições

anormais e tomar as devidas providências. O tipo de ação a ser tomada, depende do dispositivo protegido e da condição do ambiente observado. Pode-se definir basicamente dois tipos de dispositivos de proteção, aqueles que isolam uma situação de falta e os dispositivos que resguardam o SEP nas situações de falta. Nesta pesquisa serão abordados os dispositivos que isolam a situação de falta, visto que estes são alvos dos sistemas supervisórios, assunto chave nesta pesquisa.

3.1.2 Dispositivos que Reagem à Situação de Falta

Os dispositivos que reagem à situação de falta são projetados para detectar uma situação de falta no sistema elétrico e realizar ações pré-determinadas de forma a eliminá-la. Na maioria dos casos, a falta é causada pela falha de um ou mais componentes do sistema, por distúrbio externo, descargas elétricas ou curtos circuitos.

Os dispositivos de proteção monitoram constantemente o SEP, verificando as grandezas tensão e corrente. A operação do sistema em estado normal está atrelada a valores destas grandezas dentro dos seus limites normais de operação. Quando ocorre alguma perturbação, esta é refletida nos seus valores, os quais irão extrapolar seu limite de operação. Neste caso, o sistema passa a se comportar em estado de falta, depreciando o SEP. Situações de falta podem ser transitórias, dependendo das condições de sua natureza. Neste caso, o dispositivo irá executar uma série de ações para eliminar a falta. Geralmente esta ação consiste no ligar e desligar da porção faltosa, em pequenos intervalos de tempo. Caso neste processo for constatado que a falta foi eliminada, o SEP volta para seu estado normal de operação. Excedido o tempo destas ações e persistindo a situação irregular do sistema elétrico, o local onde a falta foi detectada é isolado do SEP. Quando isso acontece, o SEP precisa passar pelo estado de reconstituição, necessitando da intervenção humana para retificar o sistema [31]. Uma vez solucionado o problema, o SEP poderá voltar ao seu estado normal de operação. A Figura 12 ilustra, através de um diagrama de blocos, os estados de operação do SP.

Figura 12 - Estados de operação do SP.
Fonte [31]

Observando a figura é possível apontar duas condições principais para realização de *Trip*¹⁶ no circuito:

1. violar as condições normais de operação representada por $x > X_m$, e;
2. violar o tempo de coação representado por $t > T_m$.

Cabe nesta análise, especificar a lógica de realização do *Trip*, que é utilizado para realizar o isolamento da falta. A Figura 13 ilustra as fases de um *Trip* que se inicia após um estado de falta na operação do sistema. O tempo é incrementado e o SP verifica as grandezas do SEP, representadas por x na Figura 13, comparando seus valores com o passo anterior. Caso não ocorram alterações significativas, o tempo é incrementado para que o próximo passo seja observado. Se o limiar de diferença for ultrapassado, o *Trip* no circuito fica retido até que o limite de espera seja excedido. Esta lógica é utilizada para prevenir distúrbios temporários de pequena intensidade. Quando a falta é eliminada antes do limite de tempo, o circuito nem chega a sofrer o *Trip*; caso contrário, este comando é realizado dando início ao processo de reparo do sistema.

Em casos pertinentes, é implementado no SP a restauração automática da porção faltosa. Caso o circuito seja desenergizado, a condição anormal de falta seja eliminada e o circuito possa ser restaurado, ele entra em um processo de espera até a completa restauração do circuito, passando por uma nova verificação. Caso contrário, a porção faltosa do sistema é

¹⁶ É um sinal de origem elétrica enviado a um ou mais disjuntores de alta tensão com o objetivo de promover sua abertura.

isolada e fica a espera da intervenção humana para determinar as causas da falta e as providências a serem tomadas.

Figura 13 - Processo de decisão de *Trip*.
Fonte [31]

Todo este processo de operação do SP deve acontecer o mais rápido possível, pois as consequências de uma condição de falta permanente no SEP são indesejáveis, deixando cidades inteiras sem energia, danificando equipamentos do sistema elétrico, além de causar muito prejuízo para cargas críticas em empresas e indústrias.

3.1.3 Filosofias de Proteção

Os princípios básicos de operação de dispositivos de proteção, conforme [14], devem garantir uma correta análise e diagnóstico do problema, bem como rapidez na resposta, iniciando procedimentos de ações corretivas no sentido de retornar o mais rápido possível às condições normais de operação. A atuação destes dispositivos é descrita em termos de valores trifásicos de entrada de tensão e corrente, e a saída são mudanças de estado ligado/desligado. O SEP, sob efeito de distúrbios ou condições anormais de operação, deve sofrer a atuação do SP que provocará, sem delongas, o desligamento total do elemento defeituoso.

Para um projeto de SP eficiente é necessário inicialmente conhecer as metodologias e técnicas consolidadas da proteção digital, pois estas são utilizadas como referência para abordagens mais sofisticadas. Para tanto, serão abordados neste documento:

- funções de proteção;
- relés de proteção digitais e suas interfaces de comunicação.

3.1.4 Funções de Proteção

O SP tem como principal função garantir a qualidade do serviço de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como assegurar uma vida útil razoável aos equipamentos do SEP [14]. Dentre as causas de perturbações no sistema elétrico pode-se destacar as apresentadas na Figura 14:

Figura 14 – Causas de perturbações no sistema elétrico.

Tais perturbações podem gerar a perda da estabilidade do SEP, danos aos equipamentos próximos à falta, explosões e efeito cascata. Com isso, o SP deverá alertar uma situação de perigo e isolar a falta em caso de perturbações permanentes.

O SP em geral está associado a relés e a outros subsistemas que atuam no processo de remoção de uma falta. A Figura 15 ilustra um SP de forma a exibir seus subsistemas.

Figura 15 - Subsistemas de um SP.

Fonte [14]

Inicialmente observa-se na Figura 15 que as entradas do relé recebem os sinais de um TP (Transformador de Potencial)¹⁷ e um TC (Transformador de Corrente)¹⁸. Estes dispositivos são necessários, pois a alta magnitude de tensão e corrente no SEP precisa ser reduzida, observando as devidas proporções, para manipulação nos relés e manuseio seguro dos técnicos da concessionária de energia [32].

O relé é o dispositivo responsável pela tomada de decisão lógica no SP. Ele possui um conjunto de ajustes pré-configurados que utilizando os valores de entrada realizam um processamento com o objetivo de detectar e disparar comandos em uma situação de falta no SEP. O relé possui uma alimentação auxiliar em corrente contínua que pode ser realizada por um banco de baterias e tem como função mantê-lo em operação no caso de falha na alimentação de corrente alternada recebida pelo relé.

O disjuntor é o responsável por interromper a corrente no SEP em caso de detecção de falta. Este dispositivo é capaz de cessar altas correntes de curto-circuito isolando o trecho faltoso.

3.1.5 Relés de Proteção

Relés são dispositivos compactos com tecnologia de construção eletromecânica, estático ou digital conectados no SEP para detectarem condições indesejadas ou intoleráveis dentro de uma determinada área. Chamados “sentinelas silenciosas”, eles são uma forma ativa e segura

¹⁷ Dispositivo utilizado para reduzir os valores de tensões para níveis compatíveis com instrumentos de medição e relés de proteção obedecendo a uma relação de transformação [68].

¹⁸ Dispositivo utilizado para reduzir os valores de correntes para níveis compatíveis com instrumentos de medição e relés de proteção obedecendo a uma relação de transformação [68].

de manter um alto grau de continuidade do serviço e diminuição dos danos aos equipamentos. Estes relés podem ser classificados quanto à funcionalidade como [33]:

- relé de proteção: responsável por detectar defeitos e comandar a abertura de disjuntores de alta tensão;
- relé de monitoramento: verifica as condições do SEP ou do SP. Estes relés incluem detectores de falta, mecanismos de alarme, monitoramento de canal, verificação de sincronismo e fase da rede;
- relé de religação: estabelece sequencia para fechar o disjuntor seguinte a um comando de *Trip*;
- relé regulador: é ativado quando um parâmetro de operação do sistema esteja fora dos limites predeterminados;
- relé auxiliar: opera em resposta a abertura ou fechamento de um circuito como operação intrínseca a outro relé ou dispositivo;
- relé de sincronismo: assegura condições para interconexão entre dois SEP.

Os relés são equipamentos fundamentais para a realização da presente pesquisa, neste ínterim, foram utilizados quanto à funcionalidade, os relés de proteção, e quanto à tecnologia de construção, os relés digitais.

3.1.6 Relés Digitais

A tecnologia digital nos relés foi impulsionada pela evolução dos computadores. Os primeiros relatos de utilização de computadores na área de potência datam a década de 1960. Estes estavam na sua segunda geração, construídos por *transistors*, eram enormes, caros e tinham pouca capacidade de processamento. Neste contexto, a utilização dos computadores nos sistemas de potência ficou restrita a área acadêmica. A evolução dos computadores viabilizou técnica e economicamente a construção de relés digitais nos anos posteriores [14]. Atualmente, eles dominam os projetos de novas subestações além de estarem substituindo os relés eletromecânicos e estáticos em subestações antigas. A Figura 16 ilustra os subsistemas principais de um relé digital.

V - Valores de Tensão

I - Valores de Corrente

TP - Transformadores de Potencial

TC - Transformadores de Corrente

Bth - Filtros *anti-aliasing Butterworth*;

S/H - *Sample and hold*.

A/D - Conversor Analógico Digital

CPU - Unidade Central de Processamento

MUX - Multiplexador

RAM - *Random Access Memory*

ROM - *Read-Only Memory*

EPROM - *Erasable Programmable Read-Only Memory*

Figura 16 - Principais subsistemas de um relé digital

Fonte [14]

Na Figura 16 observa-se que valores de tensão (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) e corrente (I_a , I_b , I_c e $3I_0$) chegam do Sistema de Potência nos transformadores (TP e TC). Os transformadores atenuam os valores de tensão e corrente para valores adequados aos microprocessadores (CPU). Além disso, isolam o relé de proteção dos sinais destes equipamentos. Os Filtros *anti-aliasing*¹⁹ passivos passa baixa são usados no processamento digital dos sinais, como por exemplo, o filtro de *Butterworth*²⁰ (Bth). Logo após, dispositivos S/H são utilizados na amostragem não sequencial das entradas analógicas disponibilizando-as ao Multiplexador (MUX). O MUX realiza a conexão das entradas analógicas uma a uma ao conversor analógico digital (A/D). Como o conversor A/D é o elemento de maior valor financeiro no projeto do

¹⁹ São filtros utilizados para restringir a banda do sinal satisfazendo o teorema da amostragem [14].

²⁰ Filtro eletrônico passa baixa utilizado no processo de digitalização do sinal com intuito de representar o sinal analógico de forma fidedigna evitando a sobreposição de espectros [14].

relé digital, o MUX, juntamente com os dispositivos S/H, diminuem o custo do relé, pois permitem a utilização de apenas um conversor A/D [14].

Ainda na Figura 16, o conversor A/D é responsável pela conversão do sinal analógico em digital obedecendo à uma dada taxa amostral. Os sinais de entrada trazem informações do SEP como: estado das chaves seccionadoras, disjuntores e atuação de outros dispositivos de proteção. A CPU²¹ faz todo o controle do relé desde a aquisição dos dados até o envio das decisões. O *software* do relé fica armazenado na memória ROM²², os parâmetros do sistema são armazenados na EPROM²³. Já as operações imediatas para a tomada de decisão do relé utilizam a memória RAM²⁴. Os sinais de saída contêm a decisão tomada pelo relé, podendo ser a abertura de um disjuntor, o soar de um alarme, entre outros. A porta serial é utilizada, geralmente, para conexão do relé a um computador possibilitando o envio de lógicas de controle, verificação de *status* e registros de eventos. Muitos relés possuem outros meios de conexão remota como, por exemplo, a porta *Ethernet*. O *display* exibe constantemente os dados do dispositivo. Conforme o modelo em operação, este irá mostrar maior quantidade de informação e possuir diferentes possibilidades de leituras. Para manter o equipamento em operação, independente da energia do SEP, é utilizado um banco de baterias.

3.1.7 Características Funcionais dos Relés

Os relés de proteção devem promover funcionalidades essenciais a um SP. Como o seu papel fundamental é isolar a porção faltosa do SEP. Segundo [14] podem-se elencar algumas características que os relés devem apresentar para atuar de forma eficiente na proteção do SEP, conforme exemplificado na Figura 17.

²¹ É o componente responsável pela manipulação direta ou indireta dos dados, tem a função de processar os dados no relé [69].

²² Memória que guarda os dados por um longo período de tempo, onde os dados normalmente, não podem ser alterados pela CPU, tem a função de armazenar o *software* do relé [69].

²³ Memória ROM que pode ser apagada e regravada, armazenando os ajustes do relé [69].

²⁴ Memória volátil de leitura e escrita temporária pela CPU, que recebe as operações imediatas do relé [69].

Figura 17 - Características dos relés de proteção.

Vislumbrando as características do relé, a sensibilidade é a capacidade de responder às condições anormais do sistema de proteção para os quais o relé foi projetado. Tal sensibilidade pode ser calculada pelo quociente da corrente de curto-circuito no extremo mais afastado de uma linha de transmissão, sob condição de geração mínima, pela corrente primária de operação da proteção ou *corrente de pickup*²⁵. O resultado dessa divisão deverá estar entre 1,5 e 2. A seletividade é a propriedade de correta escolha do momento oportuno que o SP deve atuar, para tal, um índice de segurança é configurado nos relés o que deverá garantir que ele não atue em situações indevidas e isole a falta retirando a menor parte do SEP de operação. A velocidade de atuação é uma das características mais almejadas no SP, ela consiste na diferença entre o tempo da falta e a sua completa isolamento do SEP. A confiabilidade é a capacidade de operar somente nas situações em que foi projetado e não atuar em qualquer outra ocasião. Falhas fora do campo de atuação do relé, mas próxima deste, podem alterar as formas de onda de tensão e corrente lidas, deixando uma falsa impressão de falta àquele relé. Para conseguir confiabilidade, criteriosos ajustes são realizados nestes equipamentos os quais devem ser robustos, pois eles podem ficar longos períodos em inatividade, seguido de ocasiões de operação crítica. Para aumentar esta robustez, os relés digitais implementam a auto diagnose, onde situações de manutenção possam ser detectadas antes de ocorrer a falha.

3.1.8 Interfaces de Comunicação

As interfaces de comunicação com o relé são importantes, pois elas permitem a realização de ajustes, configurações e análise do dispositivo através de um sistema remoto. Tais interfaces possibilitam a comunicação entre os relés, viabilizam a emissão de alertas em condições de falta, coleta de dados, realização de testes e diagnóstico das funções de proteção. Com os relés utilizados no experimento deste trabalho, foi realizado a comunicação através da interface de rede *Ethernet* RJ-45 ou Fibra óptica.

Para a comunicação utilizando o padrão das redes de computadores, pode ser acoplada ao relé uma placa extra com interfaces *Ethernet*. Estas interfaces seguem o padrão de comunicação IEEE 802.3 [8]. Sua função é controlar todo o envio e recebimento de dados definindo a arquitetura, taxa de transmissão dos dados, método de acesso ao meio, protocolo de comunicação, velocidade de transmissão, tamanho dos pacotes de dados e cabos de rede suportados.

²⁵ Corrente de pickup ou de partida é a corrente mínima capaz de iniciar a operação do relé.

O cabeamento par trançado²⁶ é o meio de transmissão clássico utilizado em redes locais contemporâneas. Este tipo de cabeamento pode ser blindado STP (*Shielded Twisted Pair*) ou não blindado UTP (*Unshielded Twisted Pair*). A diferença entre eles está na blindagem externa dos STPs, tornando-os adequados a ambientes com fontes de interferências, como grandes motores elétricos e antenas de transmissão de rádio. Os conectores utilizados para ligar os cabos aos adaptadores e equipamentos de interconexão são do tipo RJ-45²⁷ [34]. A Figura 18 ilustra uma interligação RJ-45 com uma placa de rede *Ethernet*.

Figura 18 - Ligação com a interface RJ-45.

Os padrões *Ethernet* trabalham ainda com cabeamento de fibra óptica. Suas principais vantagens são a imunidade a ruídos elétricos, imunidade à umidade, não necessita de aterramentos especiais e possibilitam a passagem de cabos em dutos de energia elétrica. A Figura 19 exemplifica o cabeamento de fibra.

Figura 19 - Fibra óptica.

A fibra óptica conduz sinais fotônicos, a luz é conduzida ao longo de um fino plástico ou fibra de vidro e é coberta por um fino revestimento isolante (*cladding*). A fibra e o revestimento são envoltos por uma jaqueta plástica, que tem a função de proteger a delicada fibra óptica [34].

3.2 Sistemas SCADA

Os SCADA são amplamente utilizados no SEP para adquirir, controlar e supervisionar o SAS. Ele é responsável por fornecer dados dos *status* das linhas de transmissão e

²⁶ É um tipo de cabo composto por dois pares de fios trançados com a finalidade de anular as interferências eletromagnéticas que podem ocorrer no meio de transmissão [39].

²⁷ Conector padrão utilizado nas extremidades dos cabos par trançado [34].

equipamentos de campo, respaldando o operador do sistema elétrico para tomada de decisão. Baseado nas contribuições que estes sistemas inferem, observa-se que, juntamente com a incorporação de tecnologias digitais e de comunicação de dados, eles tendem a se popularizar, contribuindo para um controle cada vez mais efetivo e eficaz do SEP. Sua expansão é eminente e notória no estado da arte, o qual instiga a pesquisa quanto à utilização da *Web*, uma tendência de popularização da informação, aplicada ao que estes sistemas fazem de melhor, ou seja, o controle e supervisão de equipamento do SEP.

Segundo Silva e Salvador [35] um supervisor pode ser definido como um sistema que monitora processos executados em uma planta, a partir da visualização das variáveis do processo, bem como das ações tomadas pelo sistema de automação. Pinto [12] complementa que sistemas SCADA se referem ao conjunto de equipamentos e ao *software*, empregados na supervisão, operação e controle de plantas industriais, concessionárias de energia elétrica, sistemas de distribuição de água, edifícios, entre outros. Através desses sistemas, torna-se possível a execução de ações integradas de supervisão, operação e controle, a partir de um computador integrado ao sistema através de uma rede de comunicação de dados.

Há um grande número de sistemas, capazes de operar nas mais diversas plataformas de *hardware*. Nesses sistemas, a ação de supervisão é realizada pela visualização gráfica dos diversos componentes da planta na tela de um computador. Os resultados das medições realizadas pelos instrumentos instalados em diversos pontos da planta são mostrados de várias formas:

- valores numéricos;
- representações de variação de nível;
- gráficos;
- visualização de medidores analógicos e;
- relatórios.

A ação de supervisão é também enriquecida pelo sistema de alarmes que tem a função de chamar a atenção dos operadores para os problemas que ocorrem no SEP. Esta ação pode ser incrementada com um *software* de diagnóstico de faltas, recomendações de manutenção e reparo.

A tarefa de operação se torna extremamente facilitada com o uso dos sistemas SCADA, pois oferecem ao operador tanto a visão geral do processo como os detalhes específicos dos instrumentos e dispositivos instalados. O comando dos dispositivos, chaves, válvulas e atuadores podem ser operados através de um microcomputador IBM-PC, economizando-se o tempo gasto no acionamento de chaves e botoeiras nos painéis de comando.

Quanto à tarefa de controle, [12] destaca duas tendências existentes:

- controle através de IEDs e;
- controle por microcomputadores.

No primeiro caso, a tarefa de controle fica restrita aos IEDs deixando para o sistema SCADA, somente as tarefas de supervisão e comando. Os defensores desta tendência alegam que os IEDs são mais confiáveis que os computadores. Isto se justifica, visto que é comum encontrá-los funcionando há mais de uma década, em ambientes industriais agressivos sem, contudo, haver falhas.

O controle através de computadores traz a vantagem de se poder utilizar toda a potencialidade de *hardware* e *software* dos modernos computadores, aliada às inúmeras possibilidades de técnicas de controle disponíveis nos sistemas de *software*.

A utilização das duas tendências, em uma mesma instalação, é plausível em um SEP, neste caso, delega-se aos IEDs as tarefas de controle realimentado de plantas críticas e reservam-se as tarefas de controle dos níveis mais elevados para os computadores equipados com sistemas SCADA onde os tempos de resposta podem ser mais longos. Incluem-se, nesses casos, as ações de controle inteligente implementadas por sistemas especialistas utilizando-se técnicas avançadas como controle adaptativo, redes neurais artificiais, lógica *fuzzy* além de inúmeras técnicas de controle de sistemas não lineares [12]. Os vários produtores de sistemas SCADA têm colocado no mercado versões cada vez mais sofisticadas e que permitem a integração de equipamentos de diversos fabricantes. Apesar de não haver uma padronização, podem-se encontrar características comuns nestes sistemas, tais como: plataforma de *hardware*, estrutura do sistema e interface homem-máquina.

3.2.1 Plataforma de *Hardware*

Os primeiros sistemas SCADA foram desenvolvidos na década de 60 para auxiliar na operação dos sistemas elétricos das concessionárias de energia, onde eram usados computadores do tipo *mainframe*²⁸. Como esses computadores não possuíam as facilidades gráficas dos computadores atuais, eram utilizados painéis mímicos com lâmpadas sinalizadoras. Em seguida, ainda na década de 60, com o surgimento dos minicomputadores, diversos fabricantes passaram a produzir o que se conhecia como computadores de processo e que foram bastante utilizados na indústria. Esses sistemas foram os precursores dos SDCD (Sistemas Digitais de Controle Distribuídos). Os primeiros SDCDs eram compostos, em geral, por computadores do tipo estação de trabalho, utilizando-se amplamente a capacidade gráfica desses equipamentos. Os SDCDs são ainda amplamente utilizados na indústria, diversas opções foram colocadas no mercado nos anos 80. Dentre as desvantagens desses equipamentos

²⁸ Computador de grande porte dedicado ao processamento de um grande volume de informações [69].

em relação aos sistemas SCADA atuais, citam-se o custo e o fato de serem bastante fechados, isto é, dependentes do fabricante. Os SCADA atuais são sistemas abertos, que aceitam *hardware* e *software* de diversos fabricantes e de diferentes plataformas, integradas em rede [12].

Silva e Salvador [35] relatam que a *Internet* é cada vez mais utilizada como meio de comunicação para sistemas SCADA. Através dos seus protocolos padrões como a *Ethernet*, TCP/IP, HTTP e HTML é possível acessar dados de diversos equipamentos agregando as informações a serem visualizadas em um *browser* padrão, disponibilizando a manipulação do sistema sem limitação de tempo/espço. O *browser* comunica com o servidor *Web* através do protocolo HTTP, e após o envio do pedido referente à operação pretendida, recebe a resposta na forma de uma página HTML. Algumas das vantagens estão na utilização de uma ferramenta habitual para acesso às informações da parte do usuário e a facilidade de manutenção do sistema que ocorrerá somente no servidor.

3.2.2 Estrutura dos Sistemas SCADA

Os fabricantes de *software* SCADA oferecem versões que operam em computadores do tipo PC, estações de trabalho e outras plataformas, utilizando sistemas operacionais tais como *Windows Server*, OS/2 e *Unix*. Estes sistemas operacionais são do tipo multitarefa, permitindo a utilização de *software* através do sistema gráfico de janelas (Figura 20). Eliminando os sistemas antigos de painéis mímicos (Figura 21).

Figura 20 - SCADA gráfico composto por janelas.

Fonte: [36]

Figura 21 - Painéis mímicos.

No SCADA, todas as facilidades de controle e supervisão estão embutidas no *software*, restando para o engenheiro de sistema as definições de projeto e a montagem das janelas através de sistemas gráficos de desenho em computador. Em geral, não se exige do engenheiro de sistema habilidades de programação para a definição de um sistema SCADA [12].

Durante a operação, o *software* comunica-se continuamente com os equipamentos de controle em campo, tais como IEDs, instrumentos de medida, sistemas de aquisição de dados e outros dispositivos. O SCADA responde adequadamente, durante a monitoração dos equipamentos, armazenando os dados programados e respondendo à lógica imposta pelo sistema, ou por solicitação do operador.

Sua composição pode ser dividida em sensores e atuadores; controle primário; rede de comunicação; sistema de aquisição e controle secundário; e monitoração conforme Figura 22 [37].

Figura 22 - Composição estrutural de um sistema SCADA.

Sensores são dispositivos que convertem grandezas físicas, tais como, corrente e tensão em valores passíveis de serem utilizados nos sistemas de controle primário, ou seja, nos IEDs de pátio da estação de energia elétrica.

Atuadores são equipamentos que intervêm no sistema elétrico, de forma a operar as ações de controle no ligar ou desligar de máquinas, equipamentos, ou linhas de transmissão. Os dispositivos responsáveis por esta ação, no sistema elétrico, são os disjuntores e chaves seccionadoras.

As redes de comunicação ainda carecem de pesquisas para uma eficiente aplicação no SEP, visto que não existe um protocolo padrão consolidado para comunicação nas redes deste setor. Conforme explicitado na introdução, existe uma série de protocolos utilizados nesta comunicação que pode ser realizada por fiação elétrica, comunicação de dados sem fio e por fibra óptica. Estas redes têm como função fazer a ligação entre IEDs e estações remotas de aquisição e controle secundário do SEP.

As estações de monitoração possuem um *software* de aquisição, armazenamento, tratamento das informações e disponibilização destas de forma a tornar o controle e supervisionamento do sistema mais simples e intuitivo.

3.2.3 Interface Homem-Máquina

A IHM (Interface Homem-Máquina) é de fundamental importância na automação de subestações, pois é através dela que o operador pode interagir com o equipamento ou processo. Em uma máquina, muitas vezes se faz necessário que o operador intervenha no processo ou na sua sequência de operação, ou então que o operador simplesmente visualize informações e tome atitudes neste.

Para esse fim são utilizados vários recursos, entre os quais pode-se citar [12]:

- quadro sinóptico ou quadro resumo e;
- *software* de supervisão.

O quadro sinóptico consiste em um quadro resumo da organização lógica, algumas vezes cronológica, dos principais acontecimentos do fato supervisionado, de forma a simplificar a visualização e facilitar o entendimento, para tomada de decisões sob o processo. O quadro sinóptico está, geralmente, instalado em um *display* próximo aos equipamentos de campo, configurado para relatar dados sobre um processo com descrição dos estados dos equipamentos e emissão de alertas.

O *software* de supervisão utiliza todo o recurso gráfico de que um computador dispõe para facilitar o controle e visualização do estado do sistema. Podem-se citar como integrantes de um *software* supervisor, uma planta do sistema; marcações de pontos para destaque; detalhes dos equipamentos que o compõem; relatórios; ou seja, todo um relato sistematizado da condição atual do que se supervisiona, onde alguns possibilitam além da supervisão, o controle e anunciação de eventos de forma a manter o operador sempre informado dos

principais acontecimentos do sistema. Pelo propósito a que serve, todos os equipamentos supracitados são Interfaces Homem Máquina, pois em todos existem uma interação entre o operador, homem, e o equipamento.

IV. Tecnologias *Web*

No contexto mundial a *Internet* tem facilitado a comunicação entre sistemas remotos. Ela vem revolucionando diversos aspectos do dia a dia como o comércio, lazer, entretenimento, notícias, reuniões e diversos outros que necessitariam de um deslocamento e muitas vezes são facilitados pela disponibilidade que esta interconexão de redes vem promovendo. Segundo Kurose [38] aplicações de rede é a razão de ser de uma rede de computadores. Se não fosse possível inventar aplicações úteis, não haveria necessidade de projetar protocolos de rede para suportá-las. O Anexo A teoriza os padrões das redes de computadores, fator necessário para a abrangência que a *Internet* possui. O SEP vem passando por um processo parecido, ao de padronização das redes de computadores, com o padrão IEC-61850. Este utiliza o mesmo protocolo *Ethernet*, das redes de computadores, na camada física para troca de informações. O endereçamento lógico descrito na camada de rede, também é um conceito que se faz entender através do anexo A, aplicado nos relés, servidor da aplicação e clientes. Na camada de aplicação estão os protocolos que possibilitam o desenvolvimento de *softwares* para as redes, estes utilizam as portas dos protocolos da camada de transporte para acesso aos serviços, conforme o realizado no acesso remoto das aplicações. Os protocolos aqui descritos permitiram o desenvolvimento das aplicações do presente trabalho e vem desempenhando um papel fundamental na comunicação em sistemas *Web*.

4.1 WWW

A WWW, rede mundial de computadores, é um repositório de informações espalhadas por diversos pontos no mundo. Segundo Kurose [38] talvez, o fator mais atraente para a maioria dos seus usuários seja o acesso por demanda, ou seja, os usuários acessam o que querem, quando querem, o que é diferente da informação em uma televisão ou rádio. Para

Forouzan [8] ela apresenta uma combinação única de flexibilidade, possibilidade de transporte e recursos que facilitam a vida dos usuários e a destaca entre os demais serviços oferecidos. Geralmente está sobre uma arquitetura cliente/servidor onde o usuário digita o endereço de um site, denominado URL (*Uniform Resource Locator*)²⁹, e através do *browser* acessa o conteúdo localizado na URL solicitada.

4.2 Browser

Existem diferentes *browsers* comerciais que tem como função interpretar documentos *Web*, os quais são compostos geralmente por códigos HTML e *JavaScript*. Cada *browser*, em geral, é formado pelo controlador, programas cliente e interpretadores. O controlador é responsável pela interface com o usuário recebendo dados dos periféricos e utilizando os programas do cliente para acessar os documentos. O programa cliente pode utilizar diferentes protocolos como FTP, Telnet ou HTTP para exibir um documento. O interpretador de comandos, dependendo do tipo de documento, pode ser HTML, *JavaScript*, Java, Flash entre outros. A Figura 23 ilustra o funcionamento de um *browser*.

Figura 23 - Funcionamento de um *browser*.
Fonte [8]

4.3 HTTP

Em redes TCP/IP o WWW é o serviço que utiliza o protocolo HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) para transferência de hipertexto. Definido na RFC 1945 e RFC 2616, ele especifica as mensagens que os clientes podem enviar e receber aos servidores sendo que,

²⁹ URL - Localizadora de recursos uniformes. É um padrão para especificação de qualquer tipo de informação na Internet.

clientes e servidores devem obedecer às regras desse protocolo para se comunicarem. O modo habitual de um navegador entrar em contato com um servidor é estabelecer uma conexão TCP na porta 80, embora esse procedimento não seja exigido formalmente [39] [40].

O HTTP (versão 1.1) foi reestruturado para atender a grande demanda de conteúdo que a *Internet* necessita, permitindo conexões persistentes. Na maneira mais comum de operação do HTTP, o cliente estabelece uma conexão TCP/IP com um servidor em operação em um computador aguardando conexões na porta 80, caso não fornecido. Estabelecida a conexão, o cliente envia uma requisição composta da operação, argumentos e parâmetros. Recebida uma requisição, o servidor a processa e gera uma mensagem de resposta que é enviada pela mesma conexão e, dependendo dos parâmetros da requisição, encerra a conexão.

As requisições e respostas mais comuns trocadas entre cliente e servidor estão listadas na TABELA 2.

TABELA 2 - Métodos internos de solicitações HTTP.

Método	Descrição
GET	Solicita a leitura de uma página da <i>Web</i>
HEAD	Solicita a leitura de cabeçalho de página da <i>Web</i>
PUT	Solicita o armazenamento de uma página da <i>Web</i>
POST	Acrescenta um recurso (por exemplo, uma página da <i>Web</i>)
DELETE	Remove a página da <i>Web</i>
TRACE	Ecoa a solicitação recebida
OPTIONS	Consulta certas opções

Fonte [39]

- O método GET solicita ao servidor que envie a página. A grande maioria das solicitações a servidores *Web* tem a forma de métodos GET.
- O método HEAD solicita apenas o cabeçalho da mensagem, sem a página propriamente dita. Esse método pode ser usado para se obter a data da última modificação feita na página, para reunir informações destinadas à indexação, ou apenas para testar a validade de um URL.
- O método PUT é o inverso de GET, em vez de ler, ele grava a página. Esse método possibilita a criação de um conjunto de páginas em um servidor remoto onde o corpo da solicitação contém o conteúdo da página.
- Um pouco semelhante à PUT é o método POST, que também transporta um URL. No entanto, em vez de substituir os dados existentes, os novos dados são anexados a ele, em um sentido mais genérico. Enviar uma mensagem a um *newsgroup* é um exemplo de anexação nesse contexto.

- DELETE exclui a página. A exemplo de PUT, a permissão e a autenticação têm papel fundamental, não há garantia de que DELETE tenha sido bem-sucedido, pois, mesmo que o servidor HTTP remoto esteja pronto para excluir a página, o arquivo subjacente pode ter um modo que impeça o servidor HTTP de modificá-lo ou excluí-lo.
- O método TRACE serve para depuração, ele instrui o servidor a enviar de volta a solicitação. Esse método é útil quando as solicitações não estão sendo processadas corretamente e o cliente deseja saber qual solicitação o servidor recebeu de fato.
- O método OPTIONS fornece um meio para que o cliente consulte o servidor sobre suas propriedades ou sobre as de um arquivo específico [39].

4.4 Servidor Web Apache

Servidores *Web* são utilizados na publicação de páginas na *Internet* com o objetivo de criação de interfaces que geralmente, permitem interatividade e compatibilidade com os recursos locais de imagem, som e vídeo. Alguns deles, oferecem suporte a ferramentas de desenvolvimento de sistemas com consultas a banco de dados e geração de documentos administrativos. Estes servidores viabilizam também a incorporação de *scripts* que são executados quando determinadas operações são evocadas pelos clientes, por exemplo, uma solicitação POST ou quando explicitamente referenciados. *Scripts* são programas interpretados no servidor que permitem que um formulário preenchido eletronicamente seja armazenado em um arquivo ou em uma base de dados. Interfaces para bases de dados acessadas por um navegador também são implementadas como *scripts*. Outra utilização desses é a geração automática de recursos, por exemplo, o resultado de uma consulta a uma base de dados.

Um mesmo servidor *Web* pode responder por vários sites mediante um recurso conhecido como servidor virtual. A identidade de um servidor virtual é composta por três itens: um endereço IP, uma porta para a conexão HTTP e um *header*³⁰, ou nome por meio do qual este é referenciado. Neste caso, pode-se ter vários servidores com o mesmo endereço IP e respondendo na mesma porta, porém todos com *headers* diferentes, ou com o mesmo header e IP, mas em portas diferentes [41].

O servidor Apache é o responsável por mais de uma dezena de projetos envolvendo tecnologias de transmissão via *Web*, processamento de dados e execução de aplicativos distribuídos. Suas funcionalidades são mantidas através de uma estrutura de módulos com

³⁰ Cabeçalho ou nome pelo qual um recurso do servidor *Web* é requisitado.

versões para os sistemas operacionais Windows, Novell Netware, OS/2 e diversos outros do padrão POSIX (Unix, Linux, FreeBSD).

4.5 HTML - *HiperText Mark-up Language*

Para ter acesso aos recursos publicados na *Internet*, o cliente utiliza um *browser* que interpreta a linguagem HTML. O termo linguagem de marcação indica que o conteúdo será decifrado de acordo com a marca que receber. A linguagem HTML define *tags*, marcas que irão formatar textos, incluir nas páginas imagens, sons, vídeos, animações e *links* que levarão ao acesso de diversas outras. Esta página pode ser composta ainda de folhas de estilo CSS (*Cascading Style Sheets*)³¹ e código *JavaScript*.

O *JavaScript* é uma linguagem que permite utilizar lógica em páginas escritas em HTML. Criada pela Netscape em 1995, com o objetivo de atender principalmente a validação de formulários e interação com o site, são *scripts* interpretados pelo *browser* do cliente com grande versatilidade e utilidade ao lidar com ambientes em árvore, como o HTML.

4.6 PHP - *Hypertext Preprocessor*

Um servidor *Web*, além de responder as requisições dos clientes, oferece diversos recursos para capacitar a construção de conteúdo para *Internet*. Dentre os recursos de compatibilidade com o servidor Apache, destaca-se o PHP. O qual é uma linguagem de *script Open Source* de ampla utilização, interpretada e que é especialmente interessante para desenvolvimento para a *Web* podendo ser mesclada dentro do código HTML. O objetivo principal da linguagem é permitir a desenvolvedores escrever páginas que serão geradas dinamicamente no servidor formatando seus retornos em HTML.

Trata-se de uma linguagem extremamente modularizada, o que a torna ideal para instalação e uso em servidores *Web*. Além disso, destaca-se a extrema facilidade com que o PHP lida com servidores de base de dados como MySQL, PostgreSQL, Microsoft SQL Server e Oracle [42].

Entre as principais características da linguagem PHP, merecem destaque:

- código aberto;
- *software* livre;
- multiplataforma;
- eficiência - consome poucos recursos do servidor;

³¹ Define estilo em linguagens de marcação provendo a separação entre o formato e o conteúdo.

- acesso a bancos de dados - acesso nativo aos principais bancos de dados utilizados atualmente;
- processamento de imagens.

Grande parte da força do PHP reside no grande número de funções predefinidas fornecidas pelos desenvolvedores do seu código-fonte aberto. Funções podem ser criadas e utilizadas exatamente da mesma forma que as funções predefinidas [43].

4.6.1 *Socket* em PHP

Para se estabelecer uma conexão virtual que permita a comunicação entre processos é necessário a utilização de dois identificadores: o endereço IP e o número da porta. A combinação entre IP e porta é conhecida como endereço *socket*.

A camada de transporte precisa do par endereço *socket* do cliente e do servidor, para compor o cabeçalho do IP e o cabeçalho do protocolo da camada de transporte, o qual definirá se a comunicação é orientada ou não a conexão [8].

A função PHP utilizada para realizar uma conexão *socket* é denominada *fsockopen*. Ela estabelece parâmetros para realizar a conexão como: nome do computador de destino; número da porta; dois parâmetros para controle de erro; e o *timeout*³² da conexão. A partir desta função e as demais, de manipulação do *socket*, foi possível o desenvolvimento de aplicações para acesso a diversos serviços que os equipamentos oportunizam. Mais informações sobre a manipulação de *sockets* em linguagem PHP pode ser obtida em [44].

4.6.2 Redes Neurais Artificiais em PHP

O desenvolvimento de códigos em comunidades contribui com a divulgação das ferramentas e fortalece as tecnologias de código fonte aberto. O PHP possui diversas comunidades de discussão e compartilhamento na *Internet*. Entre as mais conhecidas, PHP Classes [45] destaca-se como um repositório de compartilhamento de assuntos afins ao PHP como:

- *scripts* de classes em PHP;
- artigos técnicos sobre PHP e assuntos afins;
- opiniões de livros de PHP e outros produtos;
- encontrar locais de trabalho em todo o mundo;
- encontrar profissionais de PHP;

³² É o tempo limite que a conexão se manterá aberta. Ou este tempo é renovado, ou a conexão é encerrada [38].

- encontrar grupos de programadores por região;
- fórum de perguntas sobre PHP e sobre as classes publicadas no site;
- encontrar servidor para a hospedagem de sites em PHP.

O site oferece através de cadastro gratuito a postagem e o *download* de classes desenvolvidas por programadores PHP profissionais. Existem no site 3 classes sobre RNAs (Redes Neurais Artificiais). Desenvolvida por Vieira [46], a classe implementa um *Perceptron* que pode ser treinado para reconhecer padrões em suas entradas. Junto à classe está um exemplo que demonstra como a classe pode ser utilizada para encontrar pessoas de um determinado perfil. Primeiro, o *Perceptron* é treinado com várias respostas de um formulário. Em seguida, as respostas deste formulário são classificadas nos perfis utilizando o *Perceptron*. Desenvolvida por Boorn [47], esta outra classe pode ser utilizada para simular a decisão de roteamento de pacotes para chegar a uma determinada rede de destino. Ela implementa uma rede neural capaz de determinar, qual das portas de saída disponíveis em um nó da rede de origem, pode entregar pacotes mais rapidamente, para um determinado nó da rede de destino. Por fim, desenvolvida por Freedelta [48], tem-se uma classe que implementa uma rede neural MLP (*Multilayer Perceptron*) com algoritmo de treinamento *back propagation*. Ela possui um conjunto de dados de treinamento composto por valores de entrada e saída desejada, que realiza o treinamento ajustando os pesos baseado no erro médio entre os valores de saída da rede e a saída desejada. Posteriormente a rede é validada utilizando o conjunto de testes.

Citado em Icontem [45], NeuralMesh é uma ferramenta de integração de Inteligência Artificial à programas em PHP [49]. Desenvolvido em PHP, ele possui um ambiente administrativo de configuração da RNA e um *framework* que viabiliza a inserção da rede nos demais códigos PHP.

FANN (*Fast Artificial Neural Network Library*) é uma biblioteca de código fonte aberto, que implementa redes neurais artificiais MLP *feedforward* em linguagem C. Ela pode ser executada em diversas plataformas e possui uma extensão para ser compilada junto ao PHP incluindo as funções e comandos da biblioteca FANN como internas à linguagem [50].

4.7 *Asynchronous JavaScript and XML*

Com o crescimento da *Web* e o avanço da tecnologia, muito se discute sobre o que é publicado na *Internet* que tenha usabilidade, para que o usuário não passe a maior parte do tempo esperando seu *browser* carregar a página solicitada. Ajax é o uso sistemático de

tecnologias providas por navegadores, como *JavaScript* e XML. A Figura 24 demonstra a alteração realizada na requisição dos dados em uma requisição *Ajax*.

Figura 24 - Comparação de uma requisição HTTP com e sem *Ajax*.
Fonte [51]

A Figura 24 deixa claro que a diferença entre uma requisição com e sem o *Ajax* está na camada chamada de *Engine Ajax*, que será um intermediário no processo de requisição do *browser* com o servidor *Web*. Esta camada permite a realização de requisições assíncronas de informações, ou seja, o conteúdo visualizado pelo usuário dependerá de sua interação com a página *Web*, onde a página toda não é mais trafegada para o cliente e sim as partes solicitadas [51]. A Figura 25 ilustra esse funcionamento.

Figura 25 - Requisições síncronas modelo clássico e assíncronas com *Ajax*.
Fonte [51]

O Ajax é uma iniciativa na construção de aplicações *Web* mais dinâmicas, criativas e interativas, onde apenas o local solicitado pelo usuário sofrerá modificação. Seu

funcionamento permite solicitações frequentes de dados, porém, mais leves, pois o conteúdo de retorno não é mais a página toda.

4.8 *JQuery*

O Ajax, bem como o CSS, HTML e demais ferramentas de programação para *Internet*, ao trabalhar no *browser* requer uma série de compatibilidades, visto que o desenvolvimento dessas aplicações necessita da evolução dos navegadores. Com isso são desenvolvidos *frameworks* para amparar desenvolvedores a se concentrarem na lógica dos sistemas da *Web* e não nos problemas de incompatibilidade dos navegadores atuais.

O *JQuery* é um exemplo de *framework* que tem como principais funcionalidades [52]:

- resolução da incompatibilidade entre os navegadores;
- redução de código;
- reusabilidade do código através de *plugins*³³;
- utilização de uma vasta quantidade de *plugins*;
- trabalha com Ajax e DOM (*Document Object Model*);
- implementação segura de recursos do CSS.

4.9 *SSL - Secure Sockets Layer*

A *Internet*, quando chegou ao público era utilizada apenas para distribuir conteúdo estático. Porém, em pouco tempo, surgiu a necessidade de empregá-la em transações financeiras, como a compra de mercadorias por cartões de crédito, transações bancárias *online* e para o mercado de capitais eletrônico. O SSL emergiu para garantir segurança na *Web* usando de algoritmos de compactação, criptografia de chave pública e chave simétrica para imprimir sigilo, integridade e autenticação. Com o SSL, o servidor possui uma chave privada e uma chave pública que é verificada por uma AC (Autoridade Certificadora). O receptor da mensagem deve obter a chave pública por intermédio de confiança da AC, para verificar se a chave pública do certificado é mesmo daquele servidor.

O SSL constrói uma conexão segura entre dois *sockets*, incluindo negociação de parâmetros entre cliente e servidor, autenticação mútua de cliente e servidor, comunicação secreta e proteção da integridade dos dados. Ele trabalha aceitando conexões na camada de aplicação e enviando pacotes para a camada de transporte. Depois que a conexão segura é estabelecida, a principal tarefa do SSL é manipular a compactação e a criptografia. Quando o HTTP é usado sobre o SSL, ele se denomina HTTPS (*HyperText Transfer Protocol Secure*);

³³ São códigos adicionais que permitem a inclusão de mais funcionalidades ao *framework* [52].

embora seja um protocolo HTTP padrão, é comum encontrá-lo disponível na porta 443. A propósito, o SSL não se limita a uso apenas com navegadores da *Web*, mas essa é sua aplicação mais comum [39].

4.10 FTP - *File Transfer Protocol*

O FTP é um protocolo da camada de aplicação muito utilizado na *Internet*, ele permite a transferência de arquivos entre equipamentos locais e remotos. Geralmente, o FTP necessita de usuário e senha para ter acesso, sendo que uma parte destes servidores da *Internet* disponibiliza um acesso anônimo para publicação de arquivos [40].

A implementação do FTP utiliza a arquitetura cliente/servidor, onde o servidor aguarda conexões TCP na porta 20 e o cliente irá abrir uma porta aleatória para tal transação. O protocolo FTP permite a navegação em parte da estrutura de diretórios do servidor remoto para localização do arquivo desejado além de diferenciar arquivos texto, usualmente ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*)³⁴, e arquivos binários como imagens e executáveis de programas [53].

4.11 Telnet

A forma mais comum de administração remota de um equipamento é através do Telnet. Este serviço permite ao usuário utilizar os recursos de um dispositivo remoto, configurando-o e administrando-o sem a necessidade da presença física. Para usar o Telnet é necessário possuir uma conta de acesso, usuário e senha, no computador remoto [40].

Os clientes Telnet são muitas vezes referenciados como terminais com pouco nível de inteligência associada, visto que sua função é enviar ao servidor os comandos do teclado e exibir na tela do usuário as informações geradas. Neste caso, todo o processamento está no servidor viabilizando a execução de instruções, *scripts* e programas a partir de linha de comando. O servidor Telnet aguarda conexões TCP na porta 23 e o cliente abrirá uma porta aleatória para realizar a transação conforme explicitado no FTP [53].

³⁴ Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação: é uma codificação de caracteres padrão de representação de texto em dispositivos eletrônicos [8].

4.12 Mysql

O sistema gerenciador de banco de dados *MySQL* é um servidor robusto que utiliza a linguagem padrão SQL (*Structured Query Language*)³⁵. Pode ser usado em sistemas de produção com alta carga, missão crítica e também ser embutido em programas de uso em massa [54].

O programa *MySQL* é de licença dupla. Os usuários podem escolher entre usar o programa *MySQL* como um produto *Opensource/Free Software* ou comprar uma licença comercial padrão da *MySQL AB*³⁶. É mandatória a aquisição de uma licença quando a utilização do *software* possuir um propósito comercial. Este pode funcionar em uma vasta gama de plataformas e sistemas operacionais, como *Windows*, *Linux*, *FreeBSD*, *BSDI*, *Solaris*, *MAC OS X*, *SunOS*, *SGI*, entre outros.

As principais características do *MySQL* são:

- portabilidade;
- compatibilidade;
- excelente desempenho e estabilidade;
- pouca exigência quanto a recursos de *hardware*;
- facilidade de uso;
- *software* livre;
- suporte a vários tipos de tabelas (como *MyISAM* e *InnoDB*).

Os tipos *MyISAM* e *InnoDB* são formatos das tabelas de armazenamento de dados do *MySQL* que possuem características diferenciadas e são recomendáveis de acordo com a aplicação [54]. A principal diferença está no suporte a *Transactions*³⁷ e *Constraints*³⁸ de chave estrangeira suportado somente pelo tipo *InnoDB*.

4.12.1 Diagrama Entidade Relacionamento

O diagrama entidade relacionamento tem como objetivo facilitar o projeto do banco de dados. Sua modelagem utiliza conceitos de entidades, atributos, relacionamentos e cardinalidade de um relacionamento conforme explicitado:

³⁵ É uma linguagem declarativa, para banco de dados relacional, que especifica a forma de transação dos dados entre a aplicação e o servidor de banco de dados [54].

³⁶ Nome da companhia de *software* que desenvolve o banco de dados *MySQL* [54].

³⁷ São transações realizadas entre tabelas de chave primária e estrangeira para manter a integridade do banco de dados de acordo com as restrições determinadas pelo administrador [54].

³⁸ São restrições de inclusão, alteração e deleção, inclusas no banco de dados, entre as chaves primária e estrangeira, com o objetivo de manter a integridade do banco de dados [54].

- entidades são os objetos do problema, ou seja, sobre o que se deseja guardar de informações. Cada entidade deve ser classificada como forte ou fraca, obtendo neste caso, um atributo de chave primária ou estrangeira respectivamente. Uma entidade é representada por um conjunto de atributos;
- atributos são as propriedades da entidade, denotando os dados de armazenamento necessários para caracterizar a entidade;
- relacionamentos são as associações entre as entidades que podem ser de valor único ou multivalorado;
- cardinalidade diz respeito à quantidade de entidades que devem estar associadas a outra entidade através de um relacionamento [55].

Com esses conceitos, define-se: as tabelas do banco de dados denominadas entidades; os campos das tabelas chamados atributos; e os relacionamentos entre elas observando a cardinalidade entre as chaves primária e estrangeira.

V. Aplicações Desenvolvidas

Com o intuito de desenvolver aplicações que permitam o estudo da utilização da *Web* como meio de supervisão e controle de um SAS, relata-se no presente capítulo o levantamento de requisitos, processos de desenvolvimento, implementação, testes e análise dos resultados, conforme metodologia descrita na seção 1.3 para uma aplicação de supervisão e controle de um *bay* típico de saída de linha, da supervisão de um ERAC e de uma aplicação de coleta, manipulação, disponibilização e predição dos dados de um medidor de qualidade da energia elétrica. Para as aplicações supracitadas, foram utilizadas ferramentas *Web* gratuitas, para coletar dados e enviar comandos aos Relés, realizando o registro de informações históricas da operação e anúncio de eventos.

No contexto atual do SEP, a *Web* se tornou uma via conveniente para acesso às informações devido ao fato dos *browsers* serem capazes de integrar diferentes serviços de rede em uma única e amigável interface com o usuário. As aplicações aqui descritas objetivam a análise da pertinência do uso da *Web* no SEP. O presente capítulo se inicia com a estrutura laboratorial, implementada por Miranda [10] e Chemin Neto [6] no LSEE, que viabilizou o desenvolvimento das aplicações utilizando equipamentos de campo tornando os resultados próximos ao que aconteceria em uma situação real, além de permitir que as conclusões possam contribuir para pesquisas da concessionária de energia elétrica.

5.1 Estrutura Laboratorial

A estrutura laboratorial do LSEE conta com três bastidores. O primeiro simulando uma subestação composta por 3 relés do fabricante A e um medidor de qualidade da energia elétrica. O segundo bastidor simula o *backbone* da rede, nele estão instaladas duas caixas de testes de sistemas de potência, um *Patch Panel*, duas *switches* gerenciáveis, duas bobinas de fibra óptica com 20 km cada uma, dois conversores de fibra monomodo para multimodo, um

conversor de comunicação RS-485 para *Ethernet* e um processador de comunicação. O terceiro bastidor simula a segunda subestação composta por 7 relés do fabricante B. Todos estes IEDs estão interligados via fibra óptica e cabo UTP através do *switch* que proporciona, além da realização da comunicação entre eles, a possibilidade de comunicação entre a rede de computadores do laboratório e a rede de comunicação dos relés. A Figura 26 é uma imagem da estrutura atual do laboratório.

Figura 26 - Estrutura laboratorial do LSEE.

Toda a estrutura laboratorial supracitada oportunizou o desenvolvimento de aplicações *Web* que atuem em equipamentos reais do SEP. A análise das demandas exigidas de desempenho ou aplicação também foram pautadas para moldar as aplicações, de forma que elas possam atuar em situações legítimas do SEP e responderem com informações relevantes para o operador do sistema elétrico. Foram escolhidas situações comuns de automação no SEP e observadas suas características e dados importantes, para a modelagem do sistema de forma a simplificar sua operação.

5.2 Sistema *Web* de Controle e Supervisão de *Bay*

Um *bay* de linha de transmissão faz a conexão entre esta e a subestação. Localizados nas subestações são parte ou subfunção desta, dentro de um nível de tensão. É a camada mais interna da subestação. Por ser um elemento de tamanha importância, consequentemente de conhecimento das pessoas inseridas neste meio, como conhecedores da estrutura física de uma concessionária de energia elétrica e acadêmicos de cursos afins à engenharia elétrica; foi proposto o desenvolvimento de um sistema *Web* para atuar nesta porção do sistema elétrico. Observados o papel do *bay* na subestação, bem como, as contribuições que o sistema *Web* pode proporcionar, objetivou-se o desenvolvimento de um sistema de supervisão e controle de um *bay* típico de saída de linha. A pesquisa para o desenvolvimento do referido sistema principiou na implementação da lógica de controle de *bay* publicada por Miranda *et al* [56].

Através de relés digitais e o meio de comunicação de dados os autores controlam um *bay* composto por um disjuntor (DJ-1), duas chaves seccionadoras de linha (CS-1 e CS-2) e uma chave de aterramento (CT), conforme ilustra a Figura 27.

Figura 27 - *Bay* em estudo.

Para a completa compreensão do sistema, o objeto de estudo precisa ser caracterizado sob o ponto de vista de intertravamentos e manobras. A preocupação neste momento é conhecer as condições de campo para abertura e fechamento de cada chave observando os requisitos de operação do caso em estudo, além de situações que envolvem segurança e a correta operação do equipamento. De forma resumida tem-se:

- A chave de aterramento CT só pode ser fechada com o disjuntor DJ1 aberto e ambas as chaves seccionadoras CS1 e CS2 de linha abertas.

- As chaves CS1 e CS2 só podem ser abertas com o disjuntor DJ1 aberto.
- As chaves CS1 e CS2 só podem ser fechadas com a chave de aterramento CT aberta.
- O disjuntor DJ1 só pode ser fechado com as chaves seccionadoras de linha CS1 e CS2 fechadas.
- Os estados dos demais equipamentos do *bay* não possuem qualquer influência sobre a abertura do disjuntor. A proteção é majoritária nesse quesito.

Para o caso em estudo, além dos intertravamentos podem-se definir sequências de manobras para energização e desenergização total do *bay*. Resumindo tem-se:

- Energização total: abrir CT, fechar CS2, fechar CS1, fechar DJ1, entregar o *bay* para operação.
- Desenergização total: abrir DJ1, abrir CS1, abrir CS2, fechar CT, entregar o *bay* para manutenção.

A lógica advinda dos sistemas digitais para comando do disjuntor DJ1 foi reproduzida de acordo com a Figura 28.

Figura 28 - Comando, intertravamento e supervisão para o disjuntor DJ1.

Com o intuito de garantir uma operação local, via uma eficaz interface homem máquina (IHM) e à prova de acionamentos acidentais, foi inserida uma condição de segurança, a qual prevê que o operador precisa pressionar o botão de controle PB1 por 3 segundos. Esse pré-requisito foi estendido para os demais equipamentos. Além dessa conduta, 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 para controle que o equipamento possui.

A lógica contempla também o comprimento do pulso aplicado às bobinas de abertura e fechamento do disjuntor, sendo definido pelo programador no momento de criação da lógica. Para esta implementação foi considerado um comprimento de pulso igual a 1 segundo.

O estado do disjuntor, aberto ou fechado, também foi contemplado e monitorado na lógica desenvolvida. Além da função de sinalização, essa supervisão funciona como um circuito anti-bombeamento. Por fim, o estado fechado das demais chaves é monitorado, o qual estabelece o intertravamento entre as mesmas e o disjuntor. A lógica de controle, supervisão e intertravamento para CS1, CS2 e CT possuem comportamento global similar ao demonstrado no disjuntor DJ1. A sensibilidade da mudança está restrita às condições de intertravamento. A descrição detalhada dessas lógicas pode ser obtida em [56].

Vislumbrado o cenário, partiu-se para a reprodução do ensaio. Para tal, foi utilizado um relé digital com as lógicas que farão o controle dos equipamentos de campo. A Figura 29 ilustra o ensaio realizado.

Figura 29 - Funcionamento da lógica para controle das chaves e disjuntor.

Para a representação das chaves seccionadoras e disjuntor presentes no *bay* proposto, visto que o ensaio foi realizado em ambiente laboratorial, utilizou-se de um relé digital que representa através de sua IHM os estados aberto ou fechado destes equipamentos. A Figura 30 ilustra a montagem realizada.

Figura 30 - Montagem do ensaio implementado.

Uma vez reproduzido o ensaio, iniciou-se o desenvolvimento de um sistema para acesso remoto ao *bay* apresentado na Figura 27.

A interface deveria ser intuitiva e de fácil manipulação, de forma que o operador possa encontrar todas as instruções necessárias para a realização das manobras no sistema e manuseio do *bay* de maneira simples e direta. Neste ínterim, optou-se por compor a interface da representação, o unifilar do *bay* e um menu principal com imagem e texto explicativo facilitando a localização das instruções de manejo do sistema.

Para a implementação do sistema, observaram-se as maneiras de acesso remoto que os relés oportunizam. Analisando o *software* proprietário dos relés de proteção e seus programas de configuração, através da utilização do analisador de protocolo *WireShark*³⁹ e o *scanner* de rede *Nmap*⁴⁰, constatou-se que estes equipamentos mantêm a porta 23 do serviço Telnet ouvindo, ou seja, esperando conexões. Através de um *socket* foi possível estabelecer conexão, autenticar e enviar comandos por intermédio do *software* cliente, que neste caso, é o próprio sistema desenvolvido.

Identificada a oportunidade de acesso remoto aos relés, plausível de implementação na *Web*, e sem interferência no funcionamento do referido dispositivo, e da rede de comunicação de dados, iniciou-se o processo de desenvolvimento com as seguintes premissas:

- o zelo pela funcionalidade, bem como, sua performance;
- o registro de informações históricas e a geração de relatórios personalizados;
- o controle de usuários no acesso ao sistema;
- a informação da realização de uma operação crítica, como o abrir e fechar do disjuntor, enviada através de correio eletrônico ao responsável pela operação do *bay* previamente cadastrado e definido no sistema;

³⁹ *Software* que captura os pacotes que trafegam pela placa de rede do computador e permite a filtragem para análise [74].

⁴⁰ *Software* que mapeia as portas abertas em determinado endereço IP [73].

- a disposição das informações para operar o sistema de forma clara e objetiva ao usuário.

O sistema implementado utiliza tecnologias como PHP, MySQL, Ajax, JQuery e SSL para realizar o acesso via *Intranet* aos relés de proteção, enviar e receber comandos executando a lógica digital implementada no relé e registrar a mudança de estado, dos equipamentos controlados, em um banco de dados apresentando-as de maneira amigável.

O PHP utilizado como linguagem para realizar o processo de conexão aos relés demonstrou eficiência na manipulação de *sockets*. Algumas dificuldades foram transcorridas na comunicação do *software* com o Relé. Por ser um sistema *Web*, onde a realização da conexão utiliza HTTP, que têm como característica, abrir um canal de comunicação, enviar e receber os dados solicitados e fechá-lo. Realizando a comunicação do sistema *Web* com o Relé desta forma, observou-se que a utilização do sistema proposto fica impraticável, tamanha demora no estabelecer da comunicação, autenticação e envio de comandos, sempre que uma nova solicitação se fizer necessária. Para resolver este impasse, a solução foi manter o *socket* aberto enquanto o usuário estiver conectado ao sistema. Tal estratégia apresentou resultados satisfatórios corrigindo a demora quanto ao envio e resposta do relé aos comandos de abertura e fechamento dos equipamentos do *bay*. A Figura 31 ilustra um trecho do código em PHP utilizado para manter o *socket* aberto.

```
<?
function irc_open($serv_addr, $serv_port, $errno, $errstr) {
    global $mode;
    if ($mode == 1) {
        return fsockopen($serv_addr, $serv_port, $errno, $errstr);
    } elseif ($mode == 2) {
        $socket = socket_create(AF_INET, SOCK_STREAM, SOL_TCP);
        socket_connect($socket, $serv_addr, $serv_port);
        return $socket;
    }
}

$socket = irc_open($serv_addr, $serv_port, $errno, $errstr);

if ($socket < 0) { echo "failed... $errno: $errstr"; return; }
else { echo "Conectado."; }

while($socket > 0) {
    $out = irc_read($socket, 4096);
    $out = rtrim($out);
    /*
    Comandos de entrada e saída do Relé.
    */
}
?>
```

Figura 31 – Conexão do *socket* em PHP.

Realizada as adequações no código e definição da interface, iniciou-se a modelagem do banco de dados. No levantamento de requisitos observou-se que o banco de dados da aplicação deveria armazenar:

- os dados do usuário como: *login*, senha, nome, email e permissão;
- a mensagem de alerta a ser enviada quando da atuação do dispositivo principal do *bay*;

- os estados dos equipamentos, bem como, o horário de mudança e o usuário que a realizou;
- o armazenamento dos comandos enviados ao relé, como objeto de análise do estado da aplicação.

A Figura 32 ilustra o relacionamento entre as tabelas da aplicação.

Figura 32 - Diagrama entidade relacionamento da aplicação controle de bay.

A aplicação, portanto, passa para a fase de implementação, testes e análise de resultados objetivando a obtenção do comportamento esperado de cada operação. Para oportunizar a comunicação, fez-se a interligação dos relés através de uma rede LAN, utilizando cabeamento par trançado UTP, uma *switch* 10/100Mbps e endereçamento lógico, conforme a Figura 33.

Figura 33 - Enlace para acesso remoto em rede Ethernet.

O funcionamento do sistema de controle e supervisão remota do *bay* implementado, pode ser ilustrado conforme Figura 34.

Figura 34 – Sistema implementado.

É importante ressaltar que a utilização do PHP como ferramenta principal no desenvolvimento do sistema proposto, aumenta sua segurança. Por ser uma linguagem de *scripts*, interpretada no servidor, a troca de informações sistema/relé, tais como a autenticação para acesso aos dados processados pelo equipamento, ficam restritos à comunicação servidor/relé que é realizada dentro da rede local da subestação. A comunicação cliente/servidor tem como tráfego somente a interação do cliente com o sistema *Web* e o resultado em HTML e *JavaScript* do processamento da comunicação *socket*, as quais são informações que não comprometem a segurança do sistema.

O sistema, endereçado na rede lógica dos equipamentos, está implementado em um servidor *Web* com banco de dados que aguarda conexões HTTP. O cliente irá requisitar o acesso, através de um *browser* padrão, digitando a URL do sistema utilizando HTTPS. A página utiliza o protocolo SSL para criptografar o HTTP, garantindo sigilo na troca de informações cliente/servidor. O usuário previamente cadastrado e com permissão de acesso

faz o *login* liberando-o para uso do sistema. Logo após a autenticação, o usuário é direcionado para a tela inicial que apresentará instruções básicas de utilização, conforme pode ser visualizado na Figura 35.

Figura 35 – Interface inicial do sistema.

Para a realização do cadastro prévio de determinado usuário utiliza-se a opção “configurar” do menu, através da qual um usuário pode ser inserido ou receber alterações do seu perfil. Por esta opção, também se discriminam os Operadores e Administradores do sistema. Para o operador, reservam-se as funções de visualizar os eventos ocorridos no *bay* e enviar comandos de abertura e fechamento aos seus equipamentos. Já o administrador será capaz de executar todas as atividades desenvolvidas pelo operador, além de cadastrar novos usuários e definir mensagens de alarme quando da operação de algum equipamento sob supervisão (Figura 36).

Figura 36 – Menu de cadastro de usuário.

Quanto aos comandos solicitados e os executados pelo usuário, cabe dizer que estes foram concebidos para serem imunes a ações intempestivas, ou seja, o usuário realiza a requisição/solicitação do comando e a mesma não é executada de imediato, sendo necessária a sua confirmação. Este processo ocorre sempre que uma das chaves é acionada através da interface. Ao clicar sobre a chave, o sistema irá abrir uma janela de alerta perguntando se o usuário deseja realizar aquela operação, abertura ou fechamento da chave, que ele clicou. Para que o comando seja enviado ao relé, o usuário deve escolher a opção OK da janela, a qual irá permitir o envio do comando ao equipamento. Caso o usuário escolha a opção Cancelar, o sistema não enviará nenhuma requisição ao relé.

Outra informação importante do sistema consiste na tela de intertravamentos. Ela apresenta ao usuário as interconexões elétricas e lógicas entre os equipamentos da subestação, as quais possuem a finalidade de estabelecer as ações de comando permissíveis (Figura 37).

Figura 37 – Intertravamentos implementados.

Além dos intertravamentos foi descrita uma sequência de manobras para energização e deserenergização total do *bay*, conforme Figura 38.

Figura 38 - Sequências de manobras para a energização e a deserenergização total do *bay*.

No que tange a elaboração de relatórios de operação dos equipamentos do *bay*, o sistema apresenta uma tela de histórico. Nesta é possível vislumbrar o número acumulado de operações de abertura e fechamento de cada equipamento, bem como as solicitações de comando por usuário com estampa de tempo por evento, contendo data e hora conforme Figura 39.

Figura 39 - Histórico de operação dos equipamentos do *bay*.

Cabe salientar que os relatórios apresentados podem ser utilizados para determinar a manutenção ou troca dos equipamentos se identificado um grande número de operações. Quando o estado aberto ou fechado de um dos equipamentos do *bay* for considerado de maior interesse para a operação do SEP, qualquer alteração na sua posição é reportada, via correio eletrônico, para um ou mais dos usuários previamente cadastrados, além de representado na tela do operador. Na implementação realizada, as mudanças de estado do disjuntor são enviadas aos usuários marcados como responsáveis pelo *bay*.

O objetivo dos testes realizados no *software* foi de verificar a eficácia do sistema de controle e supervisão *Web* desenvolvido. Para isso foram executadas as manobras contidas na TABELA 3. Cada comando, seja de fechamento ou abertura, é requisitado quando o usuário aciona na interface o ícone correspondente ao equipamento desejado. Em seguida, surge uma mensagem de confirmação para o comando solicitado. Caso afirmativo, o mesmo será enviado ao relé que possui a lógica de controle do *bay*.

Se os intertravamentos desenvolvidos forem respeitados, haverá então a mudança de estado do equipamento selecionado.

TABELA 3 - Manobras efetuadas através do sistema *Web*.

Manobra	Recepção	Resultado
Comando CS-1	Recebido	Êxito
Comando CS-2	Recebido	Êxito
Comando DJ-1	Recebido	Êxito
Comando CT	Recebido	Êxito
Intertravamento CT	Recebido	Êxito
Intertravamento CS-1	Recebido	Êxito
Intertravamento CS-2	Recebido	Êxito
Intertravamento DJ-1	Recebido	Êxito
Energização Total	Recebido	Êxito
Desenergização Total	Recebido	Êxito

As manobras descritas na TABELA 3 como comandos, são situações onde o usuário do sistema *Web*, respeitando os intertravamentos, realiza as mudanças de *status* aberto/fechado nos equipamentos que compõem o *bay*. A verificação dos intertravamentos foi testada, realizando uma manobra não permitida. Estes testes possibilitaram a verificação dos casos, onde o intertravamento deve bloquear a manobra da chave especificada. Os testes de energização e desenergização total do *bay* foram realizados, respeitando a sequência de manobra especificada na interface do sistema, o qual também foi enviado e recebido com êxito. Em relação aos testes executados, pode-se afirmar que em todos, a resposta obtida foi idêntica a esperada, denotando o êxito no desempenho do sistema de supervisão e controle *Web* proposto.

5.2.1 Segurança e Confiabilidade

O sistema aqui descrito atuou em uma porção do sistema elétrico, que requer muita segurança. O ligar ou desligar inesperado de um *bay* pode ser desastroso, colocando em risco a vida dos operadores do sistema elétrico, ou mesmo desligando uma porção da subestação de energia que pode acarretar em sérios problemas na transmissão ou distribuição da energia elétrica. Analisando o desenvolvimento da aplicação, ferramentas computacionais de segurança foram utilizadas para garantir a segurança do *software*. O primeiro fator de segurança que pode ser observado no sistema se refere à autenticação dos usuários. O acesso ao sistema é permitido somente aos usuários cadastrados. Sua autenticação através de *login* e

senha permitem a identificação das operações que este realizou, garantindo o não-repúdio⁴¹, fator de segurança importante dos sistemas computacionais. A autenticação no site utiliza um controle de sessão, realizado através do PHP, que solicita uma nova autenticação, caso a interação do usuário com o sistema esteja inativa. Este controle visa tratar ocasiões comuns de usuários de sistemas *Web*, que trocam de estações de trabalho, ou deixam suas estações, sem finalizar a sessão anterior.

Outro fator de segurança a ser observado neste sistema refere-se ao uso do HTTPS. Os protocolos SSL e HTTP oportunizam o acesso às páginas *Web* utilizando criptografia de chave pública e privada. O fato da troca de informações ser criptografada, não descarta a possibilidade de interceptação destas informações, porém, os dados não serão inteligíveis. A criptografia utilizada pelo HTTPS utiliza o algoritmo RSA (*Rivest, Shamir e Adleman*) de 1024 *bits*. Para a quebra desta criptografia, são necessárias algumas semanas, onde, neste período pode ocorrer a troca da senha, desde que definida uma política de segurança para acesso ao sistema.

Quanto aos dados de autenticação no relé e envio das requisições de abertura e fechamento das chaves, estes estão restritos ao tráfego entre o servidor e o equipamento. Como o servidor estaria na subestação, dentro de uma rede privada da concessionária de energia elétrica, pode-se supor que esta informação possa estar mais protegida.

Uma vez conectado em rede fica impossível a segurança total do sistema [57]. Quando este sistema oportuniza um acesso remoto esta segurança fica ainda mais comprometida. Como o sistema supostamente estaria sendo executado remotamente, a confiabilidade do sistema perpassa por outras variáveis. Deve ser considerado que o servidor onde a aplicação está hospedada, deve implementar medidas de segurança contra ataques de DoS (*Denial of Service*)⁴², implementação de um *Firewall*⁴³ para bloquear as tentativas de acesso não autorizado e ter redundância de *hardware* e *software* para garantir que o servidor esteja sempre disponível quando houver a necessidade de acesso. Como o objetivo da aplicação é iniciar a execução de um *bay* ou colocá-lo em manutenção, será necessário atentar para o acesso entre usuário e sistema caso este processo tenha que ocorrer dentro de um prazo determinado.

A presente pesquisa carece de investigação para poder ser aplicada em um sistema real da concessionária de energia elétrica. Suas contribuições estão ligadas às oportunidades de

⁴¹ Ocorre quando o resultado de uma autenticação não pode ser negado posteriormente [67] conforme explicitado no Anexo A.

⁴² Ataque a servidores com objetivo de negação do serviço, impedindo que os usuários utilizem o sistema [67].

⁴³ É uma coleção de *hardware* e *software* projetado para examinar o tráfego em uma rede controlando o acesso aos serviços [67].

supervisão e controle, que o uso das tecnologias digitais trouxe aos equipamentos utilizados no SEP, bem como, a verificação da pertinência da *Web* no contexto das aplicações.

5.3 Sistema Web de Supervisão do Esquema Regional de Alívio de Carga

Um ERAC consiste em uma lógica para controle, corte de cargas e recomposição do SEP. Da prática, tem-se que o SEP opera em estado de equilíbrio de potência gerada e consumida, estabelecendo uma operação em regime permanente para uma dada frequência. Porém, este sistema está comumente sujeito a certos distúrbios onde, para alguns casos, faz-se necessário o corte de cargas para se restabelecer o equilíbrio do SE. Para atender a este objetivo, as concessionárias de energia elétrica implementam uma lógica de controle, visando o corte de cargas e o restabelecimento do sistema, denominada por ERAC.

Muitas são as causas de desequilíbrio no SEP. As mais comuns são:

- a variação da carga conectada na rede elétrica;
- mudança na configuração da rede;
- e perda de geração.

Como efeito desses distúrbios, tem-se a instabilidade do sistema, cargas operando fora de suas especificações de projeto e alteração das características intrínsecas dos equipamentos de medição, controle e proteção.

Neste contexto, a perda de geração pode ser caracterizada como perda de pequena geração ou de grandes blocos de geração. A perda de pequena geração ocorre quando a geração remanescente tem capacidade de suprir a carga pela ação dos reguladores automáticos de velocidade das unidades geradoras, ou pelo controle automático de geração. A perda de grandes blocos de geração ocorre quando a geração remanescente não consegue suprir a demanda, caracterizando uma diminuição da frequência no SE. Neste caso, deverão ocorrer de maneira direcionada cortes de certas cargas conectadas no sistema, de maneira a possibilitar o restabelecimento da frequência fundamental. A realização deste corte de cargas deverá ser o menor possível e deve seguir algumas premissas baseado nas regras estabelecidas pelas empresas pertencentes ao SIN, segundo critérios de priorização, riscos devido às contingências de perda de geração e déficit de geração na região.

Seguindo as recomendações do ONS, são definidas filosofias de operação do ERAC adotando cortes de acordo com estágios de rejeição de cargas segundo a frequência atingida e o tempo de instabilidade gerado. A TABELA 4 demonstra os estágios de rejeição de cargas adotados por muitas empresas segundo Kinderman [30].

TABELA 4 - Filosofia do ERAC.

Estágio	Frequência Ajustada	Temporização	Corte de Cargas em % da carga total
1º	58,5	0,35 s	7,5
2º	58,2	0,35 s	7,5
3º	57,9	0,35 s	10
4º	57,6	0,35 s	15
5º	57,3	0,35 s	15

Fonte: [30]

Observando a TABELA 4 conclui-se que, para o correto funcionamento do ERAC, um monitoramento contínuo da frequência do SEP deve ser realizado nas subestações, podendo ser utilizada a função 81⁴⁴ dos relés digitais, presentes nestas instalações, para identificação da subfrequência alvo da lógica do sistema. A concessionária de energia elétrica deve pré-estabelecer quais cargas serão desligadas do SEP na atuação de cada estágio, de maneira que estas cargas correspondam às porcentagens do total da geração de energia atual da subestação, definidas na TABELA 4. De acordo com a frequência ajustada na ocasião da subfrequência, são observados os estágios de rejeição de cargas atingidos realizando assim, a atuação da lógica no corte das cargas. Esta, deve persistir por um tempo, também definido pela filosofia aplicada, para que o corte e restabelecimento das cargas não fiquem oscilando.

Os procedimentos de restabelecimento, quando da atuação do ERAC, aplicam-se para as cargas desligadas. O restabelecimento deverá ocorrer após a estabilização da frequência em torno da fundamental por um tempo mínimo de um minuto.

Caracterizado o funcionamento do sistema, pode-se estruturar o seu funcionamento na estrutura laboratorial. Cabe explicitar que as lógicas aqui descritas foram desenvolvidas no LSEE, porém não é foco do presente trabalho explorá-las, eximindo-o de maiores esclarecimentos. A lógica do ERAC pode ser efetuada conforme os blocos funcionais ilustrados na Figura 40.

⁴⁴ A função 81 refere-se a frequência. Relés com esta função realizam a leitura de valores de frequência do SEP [68]

Figura 40 - Implementação do ERAC.

Descrição dos blocos funcionais:

1. Constituído de um relé com os vários estágios, ajustes de frequência, de acordo com a TABELA 4.
2. Lógica do ERAC para atuar abrindo os disjuntores na sequência dos estágios, ajustes de frequência, através do bloco de controle dos equipamentos biestáveis.
3. Lógica para controle e supervisão dos equipamentos biestáveis.
4. Esta aplicação foi totalmente desenvolvida em ambiente laboratorial, sendo que, para o momento, os equipamentos de pátio, disjuntores, não estavam disponíveis para receber os comandos de abertura ou fechamento e fornecer as informações de estado. A solução encontrada foi utilizar um relé digital para simular os equipamentos supracitados, conforme descreve Miranda[56].
5. Restabelecido o equilíbrio de carga e geração, isto é, a normalidade do sistema elétrico de potência, as recomposições das cargas podem ocorrer manualmente (bloco 3) ou por processo automatizado.

Para implementação da lógica descrita nos blocos funcionais utilizou-se de três relés. O primeiro utilizando a função 81, proteção por subfrequência, recebe do simulador de sistemas de potência, a frequência exemplificando a ligação do ERAC com o SEP. Neste, estão configurados os ajustes dos estágios de subfrequência. Sua função é verificar se algum estágio foi acionado ou restabelecido. Em caso positivo, o relé irá comunicar com o segundo informando-o da alteração de estágio. Neste segundo relé estão implementadas as lógicas de corte de cargas e recomposição do sistema, as quais estarão processando o sinal enviado. Executada as lógicas, o estado do sistema será atualizado em um terceiro relé simulador de equipamentos biestáveis que receberá comandos de abertura ou fechamento de disjuntores representando a retirada ou a recomposição de cargas das regiões definidas na lógica do ERAC. Toda a comunicação é realizada com o envio de mensagens GOOSE através de uma

rede de comunicação de dados, garantindo a criticidade da transmissão dessas informações. A Figura 41 ilustra a estrutura laboratorial montada para a realização do ensaio implementado.

Figura 41 - Montagem do ensaio implementado.

Realizado os devidos testes e observado o correto funcionamento da lógica implementada nos relés, passou-se ao desenvolvimento do sistema *Web* de supervisão. Inicialmente, observaram-se as maneiras de acesso remoto que os relés oportunizam. Como são relés de fabricantes diferentes, os quais o sistema *Web* deveria realizar o acesso, examinou-se como obter a leitura da frequência realizada pela função 81 do relé. Observando o tráfego na rede em uma conexão remota com o *software* proprietário através de analisadores de protocolo e *scanners* de rede, notou-se que o fabricante possui um *WebServer* implementado no relé, o qual disponibiliza relatórios em HTML de informações de suporte ao usuário, informações do equipamento, um mapeamento da memória do protocolo ModBus, relatório de faltas, registro de eventos e os estados dos operadores lógicos conforme Figura 42.

Figura 42 - Tela de relatórios do equipamento.

Com este relatório foi possível ler a variação de frequência através de uma requisição *Ajax* que atualiza a interface a cada 1,5 segundos demonstrando a variação de frequência do sistema. Para a leitura dos estados simulados no relé, cujos fabricantes diferem entre si. Os procedimentos foram os mesmos descritos na aplicação do controle de *bay*, ou seja, através de uma conexão *socket* na porta 23 utilizando comandos PHP.

A interface deveria ser intuitiva e de fácil manipulação, onde o operador encontrasse todas as instruções necessárias para o completo entendimento da situação atual do SEP sob a atuação do ERAC. Neste ínterim, optou-se por compor a interface com o mapa da região sob supervisão do ERAC e um menu principal com imagem e texto explicativo facilitando a localização das instruções de manipulação do sistema.

O processo de desenvolvimento seguiu as mesmas premissas relatadas na aplicação anterior, porém, buscou-se a construção de uma interface que exemplificasse de forma fidedigna o funcionamento deste tipo de proteção. Observando o ambiente *Web* e as ferramentas gratuitas que se dispõe, identifica-se que o Google Maps se destaca como o instrumento de pesquisa, visualização de mapas e imagens de satélite mais eficiente da *Web*. Através da API⁴⁵ do Google Maps, utilizando *JavaScript*, é possível incorporar mapas em uma página *Web*. Esta API fornece utilitários para manipular e adicionar conteúdo aos mapas possibilitando sua adequação na aplicação desenvolvida.

A API do Google Maps utiliza medidas de latitude e longitude para manipular a posição do mapa, bem como, marcadores para identificar as regiões. Estes valores podem ser pesquisados na própria ferramenta, com isso, adotou-se 3 regiões com subestação e cidades de atuação do ERAC. A primeira, a subestação localiza-se em Varginha - MG e as regiões de atuação dos estágios são Três Corações, Machado, Alfenas, Três Pontas e Areado respectivamente. A segunda, a subestação está em São Carlos - SP e as regiões de atuação são Jaú, Porto Ferreira, Pirassununga, Limeira e Araraquara respectivamente. Já a terceira, a subestação se encontra no Rio de Janeiro - RJ e as regiões de atuação dos estágios são Niterói, São João de Meriti, Teresópolis, Petrópolis e Nova Iguaçu respectivamente. Cabe ressaltar que as regiões são utilizadas de forma ilustrativa para identificar a atuação dos estágios do ERAC. É importante relatar que as concessionárias de energia elétrica, atentas aos benefícios que a digitalização de suas instalações trazem, estão utilizando o ERAC não mais na transmissão, mas na distribuição, podendo selecionar as cargas que serão desligadas evitando a saída de grandes blocos de carga de uma mesma região e beneficiando cargas importantes do SEP [58].

Realizada a definição da interface, iniciou-se a modelagem do banco de dados. No levantamento de requisitos observou-se que o banco de dados da aplicação deveria armazenar:

- os dados do usuário como *login*, senha, nome, email e permissão;
- a mensagem de alerta a ser enviada quando da atuação dos estágios do ERAC;
- os estados dos equipamentos, bem como, o horário de mudança, a região afetada e o usuário presente no sistema;

⁴⁵ API - Interface de Programação de Aplicativos é um conjunto de rotinas e padrões estabelecidos por um *software*.

- um cadastro das regiões e suas medidas de latitude e longitude;
- um cadastro das regiões que cada usuário possui acesso;
- um cadastro dos estágios de atuação do ERAC;
- na implementação foi necessário o armazenamento dos comandos enviados ao relé, como objeto de análise do estado da aplicação;
- o armazenamento da frequência do sistema no momento da atuação dos estágios do ERAC, bem como, o horário de atuação, a região atingida e o usuário conectado devem estar armazenados para compor o relatório;
- os marcadores correspondentes a cada estado no sistema.

A Figura 43 ilustra o relacionamento entre as tabelas da aplicação.

Figura 43 - Diagrama entidade relacionamento da aplicação do ERAC.

A aplicação, portanto, passa para a fase de implementação, testes e análise de resultados objetivando a obtenção do comportamento esperado de cada operação. A lógica digital programada nos IEDs, bem como a rede de comunicação, permitiram o acesso remoto aos relés e o desenvolvimento de um sistema de supervisão.

Para o caso em estudo, fez-se a interligação dos relés através de uma rede LAN, utilizando cabeamento de par trançado UTP, um *switch* 10/100Mbps e endereçamento lógico, conforme a Figura 44.

Figura 44 - Enlace para acesso remoto em rede *Ethernet*.

A Figura 45 ilustra o funcionamento do sistema implementado.

Figura 45 - Sistema implementado.

O sistema, endereçado na rede lógica dos equipamentos, está implementado em um servidor *Web* com um banco de dados, esperando conexões HTTP. O cliente requisita o

acesso, através de um *browser* padrão, digitando a URL do sistema utilizando HTTPS. A página utiliza o protocolo SSL para criptografar o HTTP, garantindo sigilo na troca de informações cliente/servidor. O usuário previamente cadastrado e com permissão de acesso faz o *login* liberando-o para uso do sistema. A Figura 46 ilustra a tela inicial do sistema.

Figura 46 - Interface inicial do sistema.

A tela inicial apresenta em 1 a frequência do sistema; em 2 a região da subestação; e em 3 um mapa representando as áreas de atuação do ERAC controladas pela subestação. Em 4, tem-se uma tabela que demonstra os estágios de rejeição de cargas, a frequência ajustada, sua temporização e respectivas porcentagens de corte no atingir dos estágios de rejeição das cargas. Em 5, encontra-se uma legenda indicando a representatividade dos balões no mapa e, por fim, no destaque 6, descrito em tabela, estão as três regiões configuradas e suas respectivas cidades que representam os cortes realizados quando atingir os estágios de rejeição.

Realiza-se o cadastro prévio de determinado usuário pela opção configurar no menu principal, através da qual um usuário pode ser inserido ou receber alterações no perfil. Por esta opção, também se discriminam os Operadores e Administradores do sistema e quais as regiões que este usuário terá acesso. Para o operador, reservam-se as funções de visualizar os eventos ocorridos e receber a alteração de estado da atuação do ERAC por email. O administrador é capaz de executar todas as atividades desenvolvidas pelo operador, além de cadastrar novos usuários e definir mensagens de alarme ao operador, quando da atuação nos estágios sob supervisão (Figura 47).

USP SÃO CARLOS **LSEE** LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Conectado: 58.150 Hz Rio de Janeiro - RJ

Inicial **Configurar** **Histórico** **Sair**

Cadastrar Usuário | **Alterar Usuário** | **Cadastrar Mensagem**

Nome:

E-mail:

Nome de Usuário:

Senha:

Confirme a Senha:

Tipo Usuário: **Operador**

Região: ☐ Minas Gerais - MG ☐ São Carlos - SP ☐ Rio de Janeiro - RJ

Cadastre **Limpa**

Figura 47 - Tela de cadastro de usuário.

No que tange a elaboração de relatórios de operação do ERAC, o sistema apresenta uma tela de histórico, que possibilita vislumbrar a região desligada, a frequência do sistema no momento da atuação, seu estágio, bem como data e hora do evento em ordem decrescente. Todas as atuações são reportadas via correio eletrônico, para um ou mais usuários previamente cadastrados (Figura 48).

USP SÃO CARLOS **LSEE** LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Conectado: 58.490 Hz Minas Gerais - MG

Inicial **Configurar** **Histórico** **Sair**

HISTÓRICO

Região desligada	Frequência	Atuação ERAC	Data	Hora
Três Corações	58.5 Hz	Estágio 1 de atuação	05/06/2010	13:14:10
Areado	57.3 Hz	Estágio 5 de atuação	05/06/2010	13:13:53
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	05/06/2010	13:13:53
Alfenas	57.9 Hz	Estágio 3 de atuação	05/06/2010	13:13:52
Machado	58.2 Hz	Estágio 2 de atuação	05/06/2010	13:13:51
Três Corações	58.5 Hz	Estágio 1 de atuação	05/06/2010	13:13:51
Areado	57.3 Hz	Estágio 5 de atuação	04/06/2010	14:22:46
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	14:22:46
Alfenas	57.9 Hz	Estágio 3 de atuação	04/06/2010	14:22:46
Machado	58.2 Hz	Estágio 2 de atuação	04/06/2010	14:22:40
Três Corações	58.5 Hz	Estágio 1 de atuação	04/06/2010	14:20:00
Areado	57.3 Hz	Estágio 5 de atuação	04/06/2010	14:13:45
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	14:13:45
Alfenas	57.9 Hz	Estágio 3 de atuação	04/06/2010	14:13:45
Machado	58.2 Hz	Estágio 2 de atuação	04/06/2010	14:13:44
Três Corações	58.5 Hz	Estágio 1 de atuação	04/06/2010	14:13:44
Areado	57.3 Hz	Estágio 5 de atuação	04/06/2010	11:45:56
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	11:45:56
Alfenas	57.9 Hz	Estágio 3 de atuação	04/06/2010	11:45:56
Machado	58.2 Hz	Estágio 2 de atuação	04/06/2010	11:45:30
Três Corações	58.5 Hz	Estágio 1 de atuação	04/06/2010	11:45:20
Machado	58.2 Hz	Estágio 2 de atuação	04/06/2010	11:44:16
Três Corações	58.5 Hz	Estágio 1 de atuação	04/06/2010	11:44:05
Três Corações	58.5 Hz	Estágio 1 de atuação	04/06/2010	11:34:29
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	11:20:15
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	11:20:10
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	11:20:05
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	11:20:00
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	11:19:55
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	11:19:50
Três Pontas	57.6 Hz	Estágio 4 de atuação	04/06/2010	11:09:53

Figura 48 - Histórico de atuação do ERAC.

Uma quantidade significativa de testes foi realizada para verificar a eficácia do sistema de supervisão *Web* desenvolvido. Para isso, o sistema foi exposto às situações contidas na TABELA 5. Os resultados da tabela sugerem que o disjuntor 1 seja o equipamento responsável por controlar a região sobre efeito do estágio 1 do ERAC, o disjuntor 2 do segundo estágio e assim sucessivamente.

TABELA 5 - Testes realizados.

Situação	Resultado Esperado	Resultado
Criar um defeito antes de colocar o sistema em operação	Disjuntor mantém seu estado aberto.	Êxito
Fechar o disjuntor 1 manualmente	Verificar o recebimento do seu estado no sistema <i>Web</i> desenvolvido	Êxito
Criar um defeito sustentado que sensibilize o estágio 1	O disjuntor 1 deve ser aberto	Êxito
Retirada do defeito	Recomposição automática (fechamento disjuntor)	Êxito
Sensibilizar todos os estágios do ERAC	Verificar o recebimento do seu estado no sistema <i>Web</i> desenvolvido	Êxito

As situações descritas na tabela de testes denotam possibilidades abordadas na atuação do sistema. São casos reais, acometidos desde o início da operação do sistema, até situações de funcionamento em campo, por exemplo, a verificação do recebimento da mudança na interface de supervisão, no momento da atuação de cada estágio do ERAC.

Em relação aos testes executados, pode-se afirmar que para todos, a resposta obtida foi idêntica a esperada, denotando o êxito no desempenho do sistema de supervisão *Web* proposto. Mesmo com a validação visual da execução do *software*, cabe uma investigação de sua eficiência quanto à comunicação com os relés, afinal, o tempo de ajuste para tomada de decisão de cortes de carga é de 0,35s.

A fim de medir a comunicação e o processamento da troca de informações entre o sistema *web* e o relé, *scripts*⁴⁶ foram implementados, obedecendo às comunicações oportunizadas no relé, para que medições de tempo e utilização da rede quantificassem a eficiência das técnicas utilizadas na aplicação do ERAC para comunicação com os relés.

⁴⁶ Utilizado para designar uma sequência de comandos e tarefas a serem executadas [1].

5.3.1 Análise Temporal

O ambiente de teste é composto por um servidor no qual está instalado o serviço *Web* apache com módulo para programação em PHP e criptografia SSL. Neste mesmo servidor encontra-se o banco de dados *MySQL*. O microcomputador está conectado a um *switch* gerenciável⁴⁷ que se conecta aos relés digitais, através de uma rede *Intranet*.

Figura 49. Ambiente de teste.

Cabe ressaltar que o relé utilizado para medir a frequência do sistema se comunica a 10 Mbps, e o relé simulador de estado dos equipamentos a 100 Mbps.

5.3.2 Caracterização dos Testes

Para a realização da análise temporal inicialmente observou-se o cenário da aplicação, a qual vislumbra dois tipos de conexão: *socket* e *Ajax*.

A conexão *Ajax* requisita a frequência do sistema no relé que implementa a função 81. Esta requisição é realizada pelo acesso a uma página HTML, onde do retorno se utiliza a frequência do sistema.

A conexão *socket* acessa o simulador de equipamentos biestáveis e envia comandos às interfaces de saída do relé, verificando a abertura ou fechamento dos equipamentos simulados. Para realização da análise foi medido o tempo entre o envio e recebimento de 1000 mensagens enviadas ao servidor.

5.3.3 Testes Realizados

O primeiro teste realizado mediu o tempo de saída e retorno da mensagem *Ajax* que contém a frequência do sistema. Esta requisição é composta por uma conexão *socket* ao relé e

⁴⁷ Equipamento em conformidade com a IEC-61850-3 para condições mecânicas, climáticas e imunidade a EMC (Compatibilidade Eletromagnética), equipamento classe C em conformidade com a IEC-870-2-2. [10]

o envio do comando GET do protocolo HTTP, solicitando a página HTML que contém a frequência do sistema. Para tal, foram observadas as requisições Ajax para determinar sua periodicidade. Após alguns testes foi possível concluir que o tempo de 1,5 segundos garantia, com margem de segurança, que toda mensagem enviada teria seu retorno. A Figura 50 ilustra a medição de tempo realizada nas 1000 requisições.

Figura 50. Gráfico das requisições HTTP com *Ajax* em 1,5s.

A média das 1000 requisições realizadas foi de 0,311 segundos, porém, fica evidente no gráfico alguns picos de tempo em torno de 1,3 segundos sem parâmetro determinado, o que impossibilita diminuir o tempo entre essas requisições.

O segundo teste realizado explora a conexão Telnet no relé simulador de equipamentos biestáveis. Através de um *socket* é realizado a conexão no relé, onde comandos de autenticação e posteriormente de leitura das interfaces de saída são enviados. Para manter o mesmo parâmetro de comparação, foi utilizado um atraso de 1,5 segundos entre os comandos enviados ao relé. A Figura 51 ilustra a medição de tempo realizada.

Figura 51. Gráfico da conexão Telnet com *Socket* em 1,5s.

A média das 1000 requisições realizadas foi de 0,000312 segundos. Observa-se no gráfico que a maioria dos tempos medidos estão abaixo de 1 milissegundo.

Observada a discrepância de tempo entre conexões *Ajax* e *Socket* propôs-se testar os citados tipos de conexão em situações inversas. Na realização do acesso por Ajax no relé via Telnet, estaria utilizando o HTTP na sua característica de abrir o canal de comunicação, trafegar os dados e fechá-lo. Quando desenvolvido o sistema, esta alternativa foi desprezada pela demora no estabelecer da comunicação, autenticação e envio de comandos, sempre que uma nova solicitação se fizer necessária.

Já a conexão *socket* com HTTP foi possível de implementar, conforme realizado com o Telnet, mudando somente a porta de comunicação. Neste caso, a aplicação mantém uma conexão *socket* aberta entre a aplicação e o relé, e envia comandos GET para obter as informações de frequência do sistema. Os parâmetros de atraso e número de requisições foram mantidos, conforme testes anteriores. A Figura 52 ilustra a medição de tempo realizada.

Figura 52. Gráfico das requisições HTTP com *Socket* em 1,5s.

A média das 1000 requisições realizadas foi de 0,000555 segundos. Observa-se no gráfico que o tempo da primeira requisição, que corresponde à conexão *socket* ao equipamento, está em torno de 0,257 segundos, ou seja, próxima do tempo da maioria das requisições realizadas com Ajax. As demais estão abaixo de 1 milissegundo conforme aconteceu com o Telnet. Os resultados obtidos até o momento demonstram que a conexão *socket* possibilita a diminuição dos 1,5 segundos de espaço entre as requisições. Observado tal fato, outro teste foi realizado utilizando *socket* e HTTP diminuindo o tempo entre as requisições para 0,10 segundos (Figura 53).

Figura 53. Gráfico das requisições HTTP com *Socket* em 0,10s.

A média das 1000 requisições realizadas foi de 0,000102 segundos, diminuindo ainda mais o tempo de resposta. Outra análise a ser realizada é do tráfego gerado. Este, não deve influenciar na troca de mensagens entre os relés.

5.3.4 Análise do Tráfego Gerado

Para a análise do tráfego gerado pelos testes, utilizou-se da configuração *Port Mirror* do *switch*. Esta configuração replica o tráfego de uma porta do *switch* em outra. Na porta espelhada conectou-se um microcomputador e ativou-se o *software Network Monitoring* que construiu o gráfico do tráfego de saída da interface de rede em que o relé está conectado (Figura 54).

Figura 54 - Esquema para medir o tráfego da rede

5.3.5 Medições Realizadas

O primeiro teste foi da conexão Ajax com requisições HTTP. A Figura 55 ilustra o tráfego para esta situação.

Figura 55. Tráfego das requisições HTTP com *Ajax*.

Observa-se na Figura 55 que o tráfego gerado ficou entre 190 e 550 *bytes* dos 10 Mbps do canal de comunicação, ocupando cerca de 0,044% do meio de transmissão.

O segundo teste medido foi da conexão *socket* com Telnet. O tráfego gerado pode ser observado na Figura 56.

Figura 56. Tráfego da conexão Telnet com *Socket*.

Observa-se na Figura 56 que existe uma tendência do tráfego se estabilizar em 133 bytes, porém ocorrem alguns picos em torno de 220 bytes sem frequência determinada. Como neste caso, os equipamentos se comunicam à 100 Mbps, a ocupação do canal de comunicação está em torno de 0,002%.

No terceiro teste considerado, analisou-se o tráfego das requisições HTTP com *socket*. O tráfego gerado pode ser observado na Figura 57.

Figura 57. Gráfico das requisições HTTP com *Socket*.

Na Figura 57 observa-se um pico de 400 bytes gerados logo no início da conexão. Este pico corresponde a conexão do *socket* ao equipamento. Os demais tempos tendem a se estabilizar com tráfego de no máximo 70 bytes dos 10 Mbps do canal de comunicação, sendo que 0,032% do canal de comunicação é ocupado no pico e nas demais mensagens o tráfego chega a 0,006% do canal. O tráfego dos testes realizados para requisições espaçadas por 1,5 segundos e 0,10 segundos é idêntico.

A filosofia da aplicação supervisionada atribui 0,35 segundos de temporização da subfrequência ajustada, para realizar o corte de cargas. Dos testes realizados, as conexões *socket*, tanto em HTTP como em Telnet, obtiveram valores de tempo abaixo de 0,26 segundos. Por conseguinte, nas conexões supracitadas, os tempos encontrados foram compatíveis com a aplicação pretendida. A utilização da rede de comunicação, em todos os testes, ficou abaixo dos 0,05% do canal de comunicação não interferindo no tráfego da aplicação.

Os valores obtidos ficaram dentro dos parâmetros necessários para que o operador tenha, no ambiente *web*, a situação real do ambiente supervisionado. Cabe ressaltar que os resultados obtidos são aplicáveis ao ambiente de teste descrito na seção 5.3.1.

A presente análise vem corroborar com a linha de pesquisa sobre a pertinência de utilização da *web* aplicada aos SEPs. Ela demonstra que existem ferramentas disponíveis, capazes de atender aos requisitos de tempo necessário às aplicações consideradas, bem como para o desenvolvimento de aplicações para supervisão de novas situações do sistema,

possibilitando a construção de aplicativos que irão contribuir para uma maior utilização da *web* nos SEPs.

As aplicações desenvolvidas oportunizaram verificar, que protocolos da *Internet* e de redes de computadores, são incorporados nos relés de proteção e utilizados pelos fabricantes, para parametrização e administração remota destes equipamentos. Observa-se na literatura que esta é uma tendência nos modelos mais novos, incluindo protocolos de gerência e monitoramento remoto do equipamento e da rede de comunicação. A inclusão de protocolos de rede nos relés de proteção, juntamente com a evolução das ferramentas utilizadas, mostram a pertinência no desenvolvimento de aplicações *Web*, para controle e supervisão de alguns dos problemas relacionados ao SEP.

5.3.6 Segurança e Confiabilidade

O sistema aqui descrito possui particularidades quanto à execução, pois os fatores de tempo das subfrequências devem ser tratados com certo rigor. A temporização de 0,35s para atuação dos estágios do ERAC coloca em pauta, se um sistema *Web* consegue manter a comunicação dentro destes parâmetros de tempo. A análise da capacidade de realização das requisições no tempo e da influência destas requisições na rede de comunicação, comprovaram que a comunicação e as ferramentas utilizadas possuem este potencial.

Observando a descrição do ambiente, a aplicação do ERAC segue a mesma configuração do controle de *bay*. Pode-se identificar que a autenticação, a criptografia com HTTPS, a limitação do tráfego das requisições de autenticação e comandos ao relé na rede local, são fatores de segurança que são mantidos nesta aplicação. A preocupação quanto ao acesso remoto, a segurança do servidor contra invasão e contra ataques de indisponibilidade de serviço continuam.

A confiabilidade do servidor, para que a aplicação se torne de tempo real, deve ser estudada com rigor. Técnicas de redundância, sistemas distribuídos, *software* e *hardware* para aplicações em tempo real devem ser estudadas para garantir a confiabilidade e assim colocar a aplicação para execução em um ambiente real. As contribuições desta pesquisa estão no tratamento da interface utilizando recursos disponíveis gratuitamente na *Internet*, a análise temporal que demonstra a viabilidade de continuação da pesquisa, o acesso a equipamentos de fabricantes diferentes, utilizando protocolos diferentes, ascendendo à possibilidade de uso da *Web* para integrar dados de equipamentos variados, distribuídos na planta do SEP em uma interface coesa e intuitiva, simplificando e facilitando o trabalho do operador.

5.4 Sistema *Web* para Coleta, Manipulação, Disponibilização e Predição dos Dados Coletados por um Medidor de Qualidade da Energia Elétrica

A presente aplicação foi desenvolvida observando a aplicabilidade do ERAC, que pode ser por sub-frequência ou sub-tensão. Os valores de tensão e corrente, quando armazenados em função do tempo, podem ser utilizados para o desenvolvimento de aplicações que irão contribuir para explorar pesquisas no sistema elétrico.

Entre os sistemas que motivaram o desenvolvimento desta aplicação *web*, o *Smart Grid* se mostra com um ideal afim. Sua proposta de integração e disponibilização de dados vem de encontro ao que foi desenvolvido nesta aplicação.

Outro motivador para o desenvolvimento desta aplicação foi a de contribuir com a divulgação do laboratório virtual, publicando o sistema no *Web Site* do LSEE. Este fato se torna notável, uma vez que a exportação dos dados do banco de dados pode contribuir para trabalhos nas disciplinas de qualidade da energia elétrica e proteção de sistemas elétricos de potência.

O ambiente laboratorial do LSEE possui um equipamento de qualidade da energia elétrica com características de medição e registro das grandezas do sistema. Dentre as medições realizadas por este equipamento, optou-se por utilizar: frequência e tensão. Outra característica importante deste medidor é quanto a comunicação. Ele possui uma porta Ethernet 10 Mbps que viabilizou a coleta dos dados através de um sistema *Web*. Esta aquisição ocorre através de uma conexão *socket* na porta 23 do equipamento, pelos quais os comandos de autenticação e de exibição dos valores medidos foram enviados. O sistema captura os dados do medidor de qualidade da energia elétrica e alimenta um banco de dados. Com o banco de dados preenchido, um sistema na *web* foi desenvolvido para tratar estes dados e exibi-los de forma coesa e intuitiva, através de gráficos. Além dos gráficos com variações de tempo, o sistema proporciona a exportação destes dados em arquivo texto. O objetivo desta coleta é demonstrar que a partir destes dados é possível desenvolver aplicações para o Sistema Elétrico, conforme a aplicação de predição de valores de frequência realizados por uma rede neural *perceptron* multicamadas.

Para a coleta dos dados, o medidor foi ligado a um alimentador trifásico a quatro fios na rede elétrica do laboratório LSEE. A Figura 58 ilustra a ligação realizada no equipamento.

Figura 58 - Ligação das fases e neutro do medidor.

Após a alimentação elétrica do equipamento, este passou a medir as grandezas sem armazenar nenhuma informação em sua memória. Para coletar os dados, o equipamento foi ligado através da sua interface Ethernet na rede local do laboratório, conforme a Figura 59.

Figura 59 - Ligação da porta *Ethernet* do medidor.

A comunicação entre sistema e medidor, segue o padrão realizado nas aplicações anteriores. Por se tratar de um medidor de qualidade, os comandos do equipamento são diferentes, porém a conexão, autenticação, forma de requisição e tratamento do retorno realizado são os mesmos.

Através de *scripts* executados em intervalos de 1 segundo, as requisições são realizadas e o retorno é tratado para que os dados de interesse, frequência e tensão, sejam armazenados no banco de dados.

5.4.1 Análise dos Dados de Frequência

Com o banco de dados preenchido, elencaram-se alguns relatórios que poderiam ser de interesse da concessionária da energia elétrica, ou mesmo de estudantes acadêmicos. O

primeiro relatório desenvolvido demonstra a variação de 60 valores de frequência cadastrados no banco de dados efetuados uma leitura por segundo. (Figura 60)

Figura 60 - Gráfico da frequência atual do sistema.

Foi escolhida uma janela de 60 valores de forma a permitir uma leitura nítida e possibilitar a percepção da variação da frequência. Para a construção dos gráficos, utilizou-se a biblioteca de geração de gráficos em PHP JPGraph que é livre e de código fonte aberto. Outro gráfico exibido no sistema corresponde à média de frequência do dia. A Figura 61 exemplifica a tela do sistema.

Figura 61 - Gráfico da variação de frequência no dia.

Para a caracterização dos dados a serem utilizados no gráfico referente ao dia foi calculada a média dos valores lidos. A partir da quantidade de dados datados do dia em questão, estes foram agrupados em 60 grupos. Uma média da frequência e do horário de cada grupo foi calculada, dispondo assim os dados a serem traçados no gráfico.

O gráfico da semana é mais um que compõe o sistema (Figura 62).

Figura 62 - Gráfico da variação de frequência na semana.

No gráfico da semana, compõem a legenda do eixo x a data e a hora da frequência traçada. Foram selecionados os dados da última semana, armazenados no banco de dados. A metodologia para a caracterização dos dados em 60 pontos foi a mesma aplicada no gráfico do dia.

Outro gráfico que compõe o sistema é o mensal (Figura 63).

Figura 63 - Gráfico da variação de frequência no mês.

Neste gráfico são selecionados os dados do último mês armazenados no banco de dados. A exibição deste gráfico também necessitou do dia e horário no eixo x e o agrupamento dos 60 pontos seguiu o critério da média, conforme gráficos anteriores.

5.4.2 Análise dos Dados de Tensão

Para o relatório de tensão, o equipamento disponibiliza os dados de tensão fase a-terra (V_a), fase b-terra (V_b), fase c-terra (V_c), fase ab (V_{ab}), fase bc (V_{bc}), fase ca (V_{ca}). A

Figura 64 ilustra a tela com o gráfico dos últimos 60 valores de tensão, nas fases indicadas, capturados do equipamento.

Figura 64 - Gráfico da tensão atual.

Observando o gráfico é possível identificar somente dois valores de tensão, V_c com 0,13 kv e V_{ca} com 0,22 kv. Os valores de tensão fase neutro são todos iguais para os últimos 60 pontos. Como os valores são traçados em linha, estas estão superpostas. O mesmo acontece com os valores de tensão fase-fase.

O gráfico da tensão média no dia pode ser observado na Figura 65.

Figura 65 - Gráfico da variação de tensão no dia.

No gráfico da tensão no dia, observam-se algumas variações na tensão, onde as demais linhas de valores de tensão fase neutro e fase-fase começam a aparecer. Para o cálculo dos 60 valores médios foram utilizados, os mesmos critérios empregados no gráfico da frequência.

O gráfico da semana pode ser observado na Figura 66.

Figura 66 - Gráfico da variação de tensão na semana.

Nos valores da semana é possível observar que ao analisar os dados de períodos maiores a variação da tensão torna-se explícita. Neste gráfico, as datas e horários começam a compor o eixo x para o completo entendimento do período analisado.

Outro gráfico implementado corresponde à variação da tensão no mês. A Figura 67 ilustra a tela do sistema com o respectivo gráfico.

Figura 67 - Gráfico da variação de tensão no mês.

Neste gráfico é possível observar como a variação de tensão ocorreu nos dados coletados do mês.

5.4.3 Exportação dos Dados

Para viabilizar a utilização dos dados coletados foi desenvolvido o módulo para exportar os dados. Neste módulo, o usuário do sistema pode selecionar data e hora de início e fim para coleta das informações. A partir do período selecionado, o sistema irá gerar um gráfico da

média dos valores do período selecionado, seguindo a metodologia adotada nos demais gráficos, permitindo a geração de um arquivo TXT para *download*. (Figura 68)

Figura 68 - Gráfico de frequência do período selecionado.

É possível verificar a variação de frequência do período pesquisado no gráfico traçado. Clicando em gerar arquivo TXT será aberta uma janela oferecendo o *download* dos dados em arquivo TXT. Os dados do arquivo são formatados em duas colunas, onde a primeira coluna possui a data e horário que a informação foi requisitada no medidor, e a segunda coluna, a respectiva frequência neste tempo. A Figura 69 ilustra o layout do arquivo para o exemplo demonstrado.

Data Hora	Frequencia
28/06/2010 12:10:47	59.99
28/06/2010 12:10:48	59.99
28/06/2010 12:10:49	59.99
28/06/2010 12:10:50	60
28/06/2010 12:10:51	60
28/06/2010 12:10:52	60
28/06/2010 12:10:53	60.01

Figura 69 - Arquivo de *download* com os dados de frequência.

Os dados disponibilizados podem ser utilizados em quaisquer aplicações e demonstram a variação de frequência no laboratório LSEE.

Outro gráfico implementado, exemplifica a variação de tensão no período selecionado. A Figura 70 ilustra o resultado da variação dos dados de tensão do sistema no período selecionado.

Figura 70 - Gráfico de tensão do período selecionado.

No gráfico é possível verificar a variação da tensão no período selecionado. Clicando em gerar arquivo TXT, será oferecido o *download* dos dados do período pesquisado. Os dados do arquivo são formatados em colunas conforme ilustra a Figura 71.

Data Hora	Fase A	Fase B	Fase C	Fase AB	Fase BC	Fase CA
28/06/2010 12:10:47	0.13	0.13	0.12	0.22	0.22	0.22
28/06/2010 12:10:48	0.13	0.13	0.12	0.22	0.22	0.22
28/06/2010 12:10:49	0.13	0.13	0.12	0.22	0.22	0.22
28/06/2010 12:10:50	0.13	0.13	0.12	0.22	0.22	0.22
28/06/2010 12:10:51	0.13	0.13	0.12	0.22	0.22	0.22
28/06/2010 12:10:52	0.13	0.13	0.12	0.22	0.22	0.22

Figura 71 - Arquivo de *download* com os dados de tensão.

Os dados disponibilizados podem ser utilizados em quaisquer aplicações e demonstram a variação de tensão fase-neutro e fase-fase no LSEE.

5.4.4 Desenvolvimento da Aplicação de Predição da Frequência

Utilizando os dados de frequência espaçados no tempo do banco de dados construído, foi desenvolvida uma aplicação *Web* que implementa uma RNA⁴⁸ (Rede Neural Artificial) TDNN⁴⁹ (*Time Delay Neural Network*) para a predição dos valores de frequência obtendo sua

⁴⁸ são modelos computacionais inspirados no cérebro humano e que possuem a capacidade de aquisição e manutenção de informações [60].

⁴⁹ é uma rede neural *perceptron* multicamadas com algoritmo de treinamento *backpropagation* cujas entradas são escalonadas ao longo do tempo [59].

variação futura. Para o desenvolvimento desta aplicação foi utilizada a implementação em PHP de uma rede neural *perceptron* multicamadas com algoritmo de treinamento *backpropagation* disponível em [48].

Inicialmente, a implementação recebe os valores de entrada da aplicação e normaliza-os entre 0 e 1 para trabalhar com os dados na rede neural. Para efeito de comparação do ajuste realizado pela rede, foi calculado o erro quadrático médio da primeira época. Feito isso, é iniciado o treinamento utilizando o algoritmo *backpropagation*, que ajusta os pesos gerados aleatoriamente para serem utilizados na classificação dos dados de entrada. A função de ativação processa o conjunto de entradas recebidas e o transforma em estado de ativação, limitando o valor final da saída. A função de ativação utilizada nesta rede neural foi a logística⁵⁰, que faz a ativação dos pesos com valores entre 0 e 1.

Para o conjunto de dados de treinamento e validação da rede, foram selecionados os últimos 350 valores de frequência variantes no tempo, presentes no banco de dados, onde 280 são reservados para treinamento e 70 para os testes. O critério para divisão do conjunto de treinamento e testes foi de 80% para treinamento e 20% para testes.

Sistemas variantes no tempo são aqueles cujo comportamento é modelado em função do próprio tempo [59]. Esta é uma característica de sistemas variantes no tempo. Geralmente, tais sistemas são dinâmicos e não lineares, podendo ser descritos por uma série temporal. Segundo [60], para uma rede neural ser considerada dinâmica, é preciso que possua memória.

A TDNN é uma rede neural MLP com algoritmo de treinamento *backpropagation* cujas entradas são escalonadas ao longo do tempo. A previsão ou predição de valores posteriores a partir do instante t , associados ao comportamento do processo, é computada em função do conhecimento de seus valores temporariamente anteriores, isto é [61]:

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

Sendo n_p a ordem do preditor, ou seja, a quantidade de medidas (amostras) passadas que serão necessárias para a estimação do valor $x(t)$. A arquitetura da rede TDNN está embutida em uma rede neural MLP em que atrasos temporais estão introduzidos somente na camada de entrada, conforme ilustra a Figura 72.

⁵⁰ É uma função de ativação totalmente diferenciável cuja derivada de primeira ordem existe e é conhecida em todos os pontos do seu domínio de definição, tendo como resultado valores reais entre 0 e 1 [60].

Figura 72 - Arquitetura de PMC com entradas atrasadas no tempo.

Para trabalhar com sistemas variantes no tempo, a entrada da rede neural foi formatada para a realização da predição, distribuindo os valores selecionados do banco de dados conforme TABELA 6.

TABELA 6 - Exemplo da formatação dos dados de treinamento.

Tempo	X1	Saída Desejada
02/07/2010 05:21:36	59,96	59,95
02/07/2010 05:21:35	59,95	59,95
02/07/2010 05:21:34	59,95	60
02/07/2010 05:21:33	60	60
02/07/2010 05:21:32	60	60,02
02/07/2010 05:21:31	60,02	60,02
02/07/2010 05:21:30	60,02	60,01
02/07/2010 05:21:29	60,01	60,01

Observa-se na TABELA 6 que a frequência do valor de entrada do segundo atual, passa a ser a saída desejada do segundo seguinte e assim sucessivamente nos tempos posteriores. Na configuração dos parâmetros da rede neural, os valores foram ajustados realizando testes empíricos a partir dos valores utilizados na aplicação da TDNN descrita em [61], observando a influência destes valores no erro quadrático médio de forma a minimizá-lo. A arquitetura da rede neural implementada, tem ordem de predição 1, utilizando 1 neurônio de entrada, 26 neurônios na camada escondida e 1 neurônio na camada de saída. A Figura 73 exemplifica a arquitetura da rede implementada.

Figura 73 - Topologia da rede neural.

Para a definição do número de neurônios na camada escondida foram realizados 100 testes variando de 1 a 1 os neurônios na camada escondida, onde foi escolhida a rede de menor erro quadrático médio. Cabe ressaltar que todos os testes realizados para verificar a quantidade de neurônios na camada escondida, foram efetuados na aplicação, traçando o gráfico dos valores de saída da RNA e do valor que ela deveria apresentar como resposta, possibilitando a verificação visual do ajuste da rede.

Definido os parâmetros da rede e verificada a pertinência da aplicação, esta foi inserida no *Web Site* do laboratório virtual, com o objetivo de exemplificar o uso dos dados coletados para o desenvolvimento de aplicações (Figura 74).

Figura 74 - Resultado da rede neural de predição dos valores de frequência.

A aplicação exibe a taxa de aprendizagem utilizada na configuração da RNA 0,1. O termo de *momentum*, que acelera a convergência da rede neural, foi configurado em 0,8. O

valor do limiar de ativação, ou seja, a média da diferença entre o resultado da rede neural e o valor desejado deve ser menor que este valor, e foi configurado em 10^{-7} . Como resultado do treinamento, são exibidos os valores do erro quadrático médio da primeira e última época, permitindo a análise do quanto foi ajustado. Para efeito de precisão da rede neural, deve ser considerado o erro quadrático médio da última época, que no exemplo ficou em $1,014 \times 10^{-8}$. O número de épocas gasta para chegar à precisão solicitada foram 4.164 épocas para o treinamento realizado na Figura 74. O gráfico da Figura 74 exibe os valores desejados (reais da medição) e a saída da rede neural no tempo, demonstrando assim visualmente pequenas diferenças entre esses valores, possibilitando a validação da aplicação.

O sistema desenvolvido contribui com o objetivo de verificar a pertinência do uso de aplicações *Web* usadas na supervisão e controle de equipamentos do sistema elétrico, de forma a comprovar que o ambiente *Web* pode oferecer facilidades para o ambiente acadêmico, bem como para a concessionária de energia elétrica. Como nesta aplicação os dados coletados foram de um equipamento no laboratório, com o intuito de contribuir com o meio acadêmico, a segurança da informação não é um fator crítico. Neste caso, não se preocupou com a autenticação de usuários e o uso de criptografia no acesso. Para casos de sigilo nos dados, ou o uso das informações para tomada de decisão, a preocupação com segurança e confiabilidade descritas nas aplicações de controle de *bay* e ERAC devem ser consideradas. A RNA implementada contribui com o uso de técnicas inteligentes aplicadas ao SEP no ambiente *Web*. Apesar de não ser o foco da implementação, esta aplicação pode contribuir com, por exemplo, uma predição dos valores de frequência de um sistema real apontando para uma possível queda de estágios do ERAC, enviando alertas ao operador.

VI. Conclusões

O objetivo principal da presente pesquisa está na verificação da pertinência no desenvolvimento de sistemas *Web* para supervisão e controle dos SEPs. As aplicações aqui descritas são viabilizadas pela incorporação de tecnologias digitais e de comunicação nos equipamentos que compõem o SEP. A linha de pesquisa que motivou o desenvolvimento do presente trabalho, se baseia nas contribuições que as tecnologias utilizadas na *Internet* podem oferecer na supervisão e controle de aplicações do SEP. Uma das contribuições das aplicações *Web*, está na integração do elevado número de informações de monitoramento realizadas pelas concessionárias, permitindo a geração de relatórios de forma automatizada e coesa. A popularização da *Internet* e o seu rápido desenvolvimento, com tecnologias que agregam grande quantidade de dados com alta disponibilidade, são fatores motivadores da aplicação destas tecnologias no SEP, visto o elevado volume de informações de controle e supervisão neste ambiente. Manipulando esses dados, os SAS são implementados viabilizando a operação dos equipamentos de forma automatizada. O protocolo IEC-61850 tem como finalidade a padronização da comunicação que ainda é realizada utilizando diferentes protocolos proprietários. Os sistemas SCADA permitem uma visão geral do SEP, possibilitando sua supervisão e controle. Estes tópicos descritos no Capítulo I buscam contextualizar este ambiente que tem se tornado favorável ao uso de tecnologias *Web* para sua integração. Este aspecto se torna presumível, uma vez que os dados gerados pelos equipamentos que o compõem necessitam de uma maior integração e disponibilidade de acesso.

A caracterização do estado da arte se faz relevante, relatando como a *Web* vem sendo utilizada no SEP, evidenciando-a como uma tendência nos sistemas supervisórios conforme observado no Capítulo II. Diante do referencial bibliográfico, foi possível identificar que, os sistemas *Web* mencionados em sua maioria trabalham em conjunto com o banco de dados de um SCADA. Outro ambiente explorado com aplicações *Web*, apresentado na literatura, é em

laboratórios de universidades realizando a supervisão e controle de equipamentos com o intuito de criar um laboratório virtual com possibilidade de acesso remoto às práticas realizadas nas disciplinas. Estas fontes bibliográficas comprovam o direcionamento realizado na presente pesquisa. No Capítulo III foi entendido como necessário, uma revisão conceitual observada a multidisciplinaridade da pesquisa e a diversidade de conteúdos tratados nas aplicações. Foi necessário caracterizar o SEP, seus equipamentos digitais e interfaces de comunicação. Posteriormente caracterizou-se o sistema SCADA, para explicitar a simplificação que o sistema desenvolvido pode trazer para o SEP, tanto de estrutura, afinal o SCADA possui uma série de equipamentos entre o *software* supervisor e os relés de campo, quanto de custo do acesso, exaltando o uso de protocolos padrão da *Internet*. É fato que este foi aplicado em uma pequena porção do sistema elétrico se comparado ao SCADA, que permite a supervisão e controle de todo o SEP, porém, a pesquisa comprova que em situações específicas, implementado medidas de segurança e confiabilidade, um sistema *Web* aparece como alternativa eficiente para a realização do controle e supervisão. As redes de comunicação de dados utilizando enlaces e interface de comunicação baseada nos padrões da *Internet*, vem tornando-se cada vez mais presentes no SEP, com a digitalização das subestações e a adoção do padrão IEC-61850 para troca de informações. Este padrão, que utiliza a Ethernet como protocolo da camada física, permite uma comunicação muito próxima da realizada nas redes de computadores salvo as devidas necessidades de garantia quanto as mensagens críticas.

As tecnologias *Web* citadas no Capítulo IV, demonstram a potencialidade das ferramentas livres e a força que o desenvolvimento em comunidades possui. Todos os testes realizados nos sistemas, os quais utilizaram a estrutura laboratorial relatada, que fazem acesso direto aos relés via rede de comunicação de dados, tiveram resultados satisfatórios e corresponderam às exigências de tempo, sem comprometer o tráfego da rede de comunicação, que as aplicações necessitam.

No Capítulo V é importante ressaltar a estrutura laboratorial que permitiu a realização dos testes, uma vez que seus resultados utilizando equipamentos reais do SEP contribuíram com a pesquisa, garantindo a veracidade das afirmações quanto aos testes de tempo e utilização da rede. Na aplicação controle de *bay* ficou evidenciado a qualidade do controle quando este é realizado por um sistema computacional. A segurança do operador no manusear do sistema; a emissão de relatórios que contribuem na tomada de decisão; e a intuitividade da interface, são resultados de destaque nesta aplicação apontando para a tendência de uso da *Web* observada nos sistemas SCADA. No sistema de supervisão do ERAC, merece destaque a coleta de informações de relés de proteção de fabricantes diferentes

em uma mesma aplicação realizando a interoperabilidade⁵¹ entre estes equipamentos; a utilização de recursos distribuídos, oferecidos gratuitamente na *Internet*, que compõem a interface tornando-a mais ergonômica e clara; e os relatórios que auxiliam no controle da concessionária, uma vez que esta deverá prestar contas a ONS quanto às atuações do ERAC. Na aplicação do item 5.4 a contribuição para o meio acadêmico, disponibilizando dados para a realização de pesquisas, foi um fator motivador. A rede neural de predição dos dados de frequência do sistema é uma aplicação importante, que denota mais uma situação de atuação de sistemas *Web*, apontando para o uso de técnicas inteligentes realizando classificações *on-line* que contribuirão para a evolução da pesquisa nos SEPs.

O acesso do sistema *Web* ao relé via TCP/IP elucida uma nova concepção de comunicação entre os níveis de estação e de *bay* para controle e supervisão de equipamentos. Esta comunicação geralmente utiliza protocolos diversos como DNP3, ModBus, FieldBus, ProfiBus e outros, dependendo do fabricante de desenvolvimento do SCADA. A pesquisa realizada permitiu observar que os equipamentos com tecnologias da *Internet* para comunicação com seus *softwares* de configuração possibilitam a utilização das mesmas para outras tarefas. Estas foram utilizadas para a leitura dos relatórios na aplicação do ERAC. Envio de comandos nas interfaces de entrada e saída, na aplicação de controle de *bay*. Coleta de informação de um medidor de qualidade da energia elétrica na aplicação de predição dos dados de frequência. O constante desenvolvimento e aprimoramento das ferramentas utilizadas, como por exemplo, *PHP*, *JavaScript*, *Ajax*, *JQuery* e *MySQL*, mostra potencialidade e adequação do seu uso para resolver alguns dos problemas relacionados ao SEP e contribuir com o meio acadêmico, desenvolvendo aplicações pertinentes ao estudo de sistemas elétricos.

As publicações, listadas no Apêndice A, de trabalhos em congressos nacionais e internacionais de renome em educação, automação e controle de engenharia elétrica, demonstram a pertinência da pesquisa. A mensuração dos padrões de comunicação em rede de computadores, bem como suas características realizadas no Anexo A, tem um lugar importante nesta pesquisa quando descreve e exemplifica como o sistema *Web* funciona sob a rede de comunicação.

Vale ressaltar que o uso de plataforma *Web* implica em disponibilidade de acesso à informação de qualquer ponto conectado à *Internet*, onde as aplicações desenvolvidas se tornam alternativas interessantes, visto que, o SEP é um ambiente heterogêneo e geralmente, está disperso por quilômetros de distância. Estas aplicações podem contribuir também com o

⁵¹ Troca de informações entre dois ou mais dispositivos, em que o receptor deve entender a sintaxe e semântica do pacote, com base nos atributos de dados recebidos na comunicação, compartilhando informações por um ou vários fabricantes, sem o uso de pontes; [10]

estudo de conteúdos relacionados ao sistema elétrico facilitando o acesso às informações, além de ser uma alternativa de baixo custo por utilizar ferramentas gratuitas.

6.1 Sugestões para Continuidade da Pesquisa

Os resultados obtidos com a presente pesquisa encorajam sua continuidade e vislumbram um futuro próximo de aplicações *Web* atuando no SEP. Neste ínterim, podem-se destacar alguns pontos de continuidade:

- profissionalizar as aplicações para que estas atuem com maior abrangência no SEP;
- realizar um estudo relativo a segurança que os sistemas de controle e supervisão na *Web* devem possuir;
- testar e homologar um ambiente confiável necessário para a hospedagem do sistema *Web*;
- realizar outras implementações que utilizem técnicas inteligentes, com o intuito de explorar este tipo de aplicação verificando as contribuições que elas podem trazer ao SEP por estarem na *Web*.

Referências Bibliográficas

- 1 DEITEL PJ, DEITEL HM. Ajax, Rich Internet Applications e desenvolvimento Web para programadores. São Paulo: Pearson Prentice Hall; 2008.
- 2 ANEEL. [Internet]. [cited 2009 Fevereiro 11]. Available from: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15&idPerfil=2>.
- 3 ONS. [Internet]. [cited 2009 Fevereiro 12]. Available from: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx.
- 4 ONS. Requisito de Telessupervisão para a Operação. 2003.
- 5 BOSCO F. O Futuro do Controle na Transferência de Dados. Controle & Instrumentação. 2005.
- 6 CHEMIN NETTO U. Aplicações de Controle e Supervisão Distribuídas em Subestações de Energia Elétrica Através do Uso de Relés Digitais de Proteção. São Carlos 2008.
- 7 COMMISSION, Internacional Electrometechanical. IEC-61850 - Part 1: introduction and Overview. 2003.
- 8 FOROUZAN BA. Comunicação de Dados e Redes de Computadores. São Paulo: McGrawHill; 2008.
- 9 IGARASHI G. Estudo da IEC 61850 e o seu impacto no sistema de automação de subestações. São Paulo: USP - Escola Politécnica; 2008.

- 10 MIRANDA JC. IEC 61850: Interoperabilidade e Intercambialidade entre Equipamentos de Supervisão, Controle e Proteção Através das Redes de Comunicação de Dados. São Carlos 2008.
- 11 GURJÃO EC, CARMO UA, SOUZA BA. Aspectos de comunicação da norma IEC 61850. SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. 2006.
- 12 PINTO FdC. Sistemas de Automação e Controle. [Internet]. Espírito Santo 2005 [cited 2010 Julho 19]. Available from: <http://www.ebah.com.br/sistema-de-automacao-e-controle-doc-a15557.html>.
- 13 GUARNERI GA. UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Coordenação de Eletrônica. [Internet]. 2009 [cited 2009 Maio 19]. Available from: <http://giovanni.guarneri.googlepages.com/supervisorio.pdf>.
- 14 COURY DV, OLESKOVICZ M, GIOVANINI R. Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. São Carlos: EESC-USP; 2007.
- 15 GIOVANINI R, COURY DV. Sistemas Agentes Remotos Aplicados à Melhoria da Proteção Local e de Retaguarda. CBA - Congresso Brasileiro de Automática. 2004.
- 16 SKENDZIC V, MOORE R. Extending the Substation LAN Beyond Substation Boundaries: Current Capabilities and Potential New Protection Applications of Wide-Area Ethernet. IEEE Conference Proceeding. 2006.
- 17 JUN-PING S, WAN-XING S, SUN-AN W, WU Kg. Substation automation high speed network communication platform based on MMS+TCP/IP+Ethernet. IEEE Conference Proceeding. 2002.
- 18 REN YL, HE JH, BO ZQ, DONG XZ, CAUNCE BRJ, KLIMEK A. Ethernet based Substation Communication System for Integrated Protection. IEEE Conference Proceeding. 2006.
- 19 SKENDZIC V, GUZMA A. Enhancing Power System Automation Through the Use of Real-Time Ethernet. IEEE Conference Proceeding. 2006.
- 20 ZECEVIC G. Web based interface to SCADA system. IEEE Conference Proceeding. 1998.

- 21 SUTHERLAND PE, IRVINE RG. Power system studies through the Internet. IEEE Conference Proceeding. 2001.
- 22 QIU B, GOOI HB. Web-Based SCADA Display Systems (WSDS) for Access via Internet. IEEE Conference Proceeding. 1998.
- 23 QIU B, GOOI HB, LIU Y, CHAN EK. Internet-Based SCADA Display System. IEEE Journal or Magazine. 2002.
- 24 CHEN Q, GHENNIWA H, SHEN W. Web-services infrastructure for information integration in power systems. IEEE Conference Proceeding. 2006.
- 25 BRY F, LORENZ B, OHLBACH HJ, ROEDER M, WEINBERGER M. The Facility Control Markup Language FCML. IEEE Conference Proceeding. 2008.
- 26 AYDOGMUS Z, AYDOGMUS O. A Web-Based Remote Access Laboratory Using SCADA. IEEE Journal or Magazine. 2009.
- 27 MOSLEHI K, KUMAR R. Smart Grid - A Reliability Perspective. IEEE PES Conference on "Innovative Smart Grid Technologies". 2010.
- 28 GELLINGS CW. The smart grid: enabling energy efficiency and demand response. Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc.; 2009.
- 29 GAUDIMAQUETES. GAUDIMAQUETES. [Internet]. [cited 2009 Fevereiro 17]. Available from: <http://www.gaudimaquetes.com.br/>.
- 30 KINDERMANN G. Proteção de Sistemas Elétricos. Vol II. Edição do Autor; 2007.
- 31 ANDERSON PM. Power System Protection. United States of America: McGraw-Hill; 1998.
- 32 PHADKE AG, THORP JS. Computer Relaying for Power Systems. Taunton, Somerset, England: Research Studies Press LTD; 1988.
- 33 ELMORE WA. Protective Relaying Theory and Applications. New York: ABB Power T&D Company Inc.; 1994.
- 34 MORIMOTO CE. Redes Guia completo. [Internet]. 2003 [cited 2009 Maio 12]. Available from: www.guiadohardware.net.

- 35 SILVA APG, SALVADOR M. O que são sistemas supervisórios? [Internet]. 2005 [cited 2009 Outubro 02]. Available from: http://www.faatesp.edu.br/atividades/2_sem_2009/ANEXO.02.pdf.
- 36 SPIN. EMS/SCADA ActionView - Aplicações Elétricas. [Internet]. 2009 [cited 2010 Julho 15]. Available from: <http://www.spinengenharia.com.br/produtos/actionview-aplicacoes-eletricas.aspx>.
- 37 RANIERI F. Sistema supervisorio de parâmetros de máquinas elétricas via TCP/IP e painel eletrônico de mensagens. São Carlos 2007.
- 38 KUROSE JF, ROSS KW. Redes de Computadores e a Internet Uma abordagem top-down. São Paulo: Pearson Addison Wesley; 2006.
- 39 TANENBAUM AS. Redes de computadores. 4th ed. Vrije Universiteit, Amsterdam, Holanda: Editora Campus; 2003.
- 40 FERREIRA RE. Linux Guia do Administrador do Sistema. São Paulo: Novatec; 2003.
- 41 TIBET CV. LINUX Administração e Suporte. São Paulo: Novatec; 2001.
- 42 SICA C. PHP Orientado a Objetos: Fale a Linguagem da Internet. Rio de Janeiro: Ciência Moderna; 2006.
- 43 CONVERSE T, PARK J. A Bíblia do PHP. São Paulo: Editora Campus; 2003.
- 44 ACHOUR M, BETZ F, DOVGAL A, LOPES N, MAGNUSSON H, RICHTER G, SEGUY D, VRANA J. fsockopen. [Internet]. 2009 [cited 2009 Novembro 5]. Available from: <http://br2.php.net/manual/en/function.fsockopen.php>.
- 45 ICONTEM. PHP Classes Repository. [Internet]. 1999 [cited 2010 Julho 15]. Available from: <http://www.phpclasses.org/>.
- 46 VIEIRA APO. Perceptron. [Internet]. 2004 [cited 2010 Julho 15]. Available from: <http://www.phpclasses.org/package/1702-PHP-Perceptron-implementation-for-pattern-recognition.html>.
- 47 BOORN D. ANN Router Simulation. [Internet]. 2006 [cited 2010 Julho 15]. Available from: <http://www.phpclasses.org/package/3021-PHP-Simulate-routing-decision-using-neural-networks.html>.

- 48 FREEDELT. Back Propagation Scale. [Internet]. 2010 [cited 2010 Julho 06]. Available from: <http://www.phpclasses.org/package/6045-PHP-Implement-neural-networks-using-back-propagation.html>.
- 49 STOWASSER L. Neural Mesh. [Internet]. 2010 [cited 2010 Julho 15]. Available from: <http://neuralmesh.com/>.
- 50 NISSEN S. Implementation of a Fast Artificial Neural Network Library (fann). [Internet]. 2003 [cited 2010 Julho 16]. Available from: http://ufpr.dl.sourceforge.net/project/fann/fann_doc/1.0/fann_doc_complete_1.0.pdf.
- 51 CABRERA EBdA. AJAX – Visão Conceitual. [Internet]. [cited 2009 Novembro 5]. Available from: <https://portaljava.dev.java.net/files/documents/353/36081/AJAXvisaoConceitual.pdf>.
- 52 RESIG J. Documentation. [Internet]. [cited 2009 Novembro 5]. Available from: http://docs.jquery.com/Main_Page.
- 53 PALMA L, PRATES R. TCP/IP Guia de Consulta Rápida. Novatec; 2000.
- 54 AB M. Manual de Referência do MySQL 4.1. [Internet]. [cited 2009 Agosto 9]. Available from: <http://dev.mysql.com/doc/refman/4.1/pt/introduction.html>.
- 55 SILBERSCHATZ A. Sistemas de Banco de Dados. Rio de Janeiro: Campus; 2006.
- 56 MIRANDA JC, CHEMIN NETTO U, OLESKOVICZ M, COURRY DV. Uma Lógica para Controle de Bay Dispondo de Relés Digitais Comerciais e Meios de Comunicação Adequados. Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE. 2007.
- 57 KUROSE JF. Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down. São Paulo: Addison Wesley; 2010.
- 58 LESSA e SILVA SE. Exploração de Recursos de Automação de Subestações. SIMPASE - Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos. 2008.
- 59 HAYKIN S. Redes Neurais princípios e prática. 2nd ed. Porto Alegre: Bookman; 2001.
- 60 BRAGA AdP, LUDEMIR TB, CARVALHO ACPdLF. Redes Neurais Artificiais Teoria e Aplicações. Rio de Janeiro: LTC; 2000.

- 61 SILVA INd, SPATTI DH, FLAUZINO RA. Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas. São Paulo: Artliber; 2010.
- 62 IEEE. IEEE recommended practice for data communications between remoteterminal units and intelligent electronic devices in a substation. [Internet]. 2001 [cited 2009 Abril 28]. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=912952&isnumber=19702>.
- 63 TANENBAUM AS. Redes de computadores. 3rd ed. Rio de Janeiro: Campus; 1997.
- 64 COMER DE, STEVENS DL. Interligação em Rede com TCP/IP. Rio de Janeiro: Campus; 1999.
- 65 FOROUZAN BA. Comunicação de Dados e Redes de Computadores. Porto Alegre: Bookman; 2005.
- 66 OLIFER N, OLIFER V. Redes de Computadores: Princípios, Tecnologias e Protocolos para o Projeto de Redes. LTC; 2008.
- 67 BERNARDES MC. Guia de Estudos - Gestão e Segurança da Informação. Varginha, MG: UNIS - Centro Universitário do Sul de Minas; 2007.
- 68 ARAÚJO CAS, CÂNDIDO JRR, SOUSA FC, DIAS MP. Proteção de Sistemas Elétricos. 2nd ed. Rio de Janeiro: Interciência; 2005.
- 69 MONTEIRO MA. Introdução a Organização de Computadores. LTC; 2007.
- 70 MORGAN T. Power Over Ethernet - The Definitive Resource. [Internet]. 2006 [cited 2009 novembro 4]. Available from: http://www.poweroverethernet.com/articles.php?article_id=370.
- 71 DEITEL HM, DEITEL PJ. Java: Como Programar. Prentice-Hall; 2005.
- 72 DEITEL HM, DEITEL PJ. C# Como Programar. Makron Books; 2003.
- 73 NMAP. Nmap Reference Guide. [Internet]. [cited 2009 Novembro 5]. Available from: <http://nmap.org/book/man.html>.
- 74 WIRESHARK. Documentation WireShark. [Internet]. [cited 2009 Novembro 5]. Available from: <http://www.wireshark.org/docs/>.

75 SOUSA LB. Redes de Computadores Guia Total. São Paulo: Erica; 2009.

76 GENERAL ELECTRIC COMPANY. D60 Relé de Distância de Linha. [Internet]. 1997 [cited 2010 Julho 17]. Available from: <http://www.geindustrial.com.br/produtos/relés/d60/01.asp>.

APÊNDICE A

A. Publicações Realizadas

- SILVA, L. E. ; MIRANDA, J. C. ; COURY, D. V. . Análise Temporal de Conexões com Tecnologias *Web* Aplicadas na Supervisão de um Esquema Regional de Alívio de Carga - ERAC. In: CBA - Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito, MS.
- SILVA, L. E. ; NETO, U. C. ; MIRANDA, J. C. ; OLESKOVICZ, M. ; COURY, D. V. . Tecnologias *Web* Aplicadas no Esquema Regional de Alívio de Carga – ERAC. In: CLAGTEE - Eighth Latin-american Congress on Electricity Generation and Transmission, 2009, Ubatuba, SP.
- SILVA, L. E. ; MIRANDA, J. C. ; NETO, U. C. ; COURY, D. V. ; OLESKOVICZ, M. . A Utilização de Ferramentas *Web* para a Supervisão e Controle de Equipamentos do Sistema Elétrico de Potência. In: CBA - Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora, MG.
- SILVA, L. E. ; NETO, U. C. ; MIRANDA, J. C. ; OLESKOVICZ, M. ; COURY, D. V. . 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: COBENGE - Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2008, São Paulo.

ANEXO A

A. Redes Ethernet

As redes de comunicação de dados têm contribuído com a automação de subestações, no que tange a troca de informações entre IEDs. É notória a tendência, nas instalações das subestações, em se adaptar para utilização dos protocolos utilizados na *Internet*. O padrão IEC-61850, por exemplo, propõe o uso da Ethernet como balizador na troca de informações entre os dispositivos de uma subestação de energia elétrica, o que vem tornando-o popular na automação do SEP.

A comunicação em rede necessariamente necessita de regras para que os dispositivos possam se comunicar e para tal, são utilizados protocolos que ditam regras para a comunicação entre os equipamentos. A ISO (*International Organization for Standardization*) criou o modelo RM-OSI (*Reference Model - Open Systems Interconnection*) com o objetivo de fornecer uma base comum que permita o desenvolvimento coordenado de padrões para interconexão de sistemas. Informações sobre recomendações para a comunicação de dados entre unidades de terminais remotas e IEDs na subestação podem ser encontradas em [62].

Modelo RM-OSI

O Modelo RM-OSI tem sete camadas onde cada uma representa um grupo de tarefas específicas, sendo que nem todas as camadas são necessárias para a implementação da comunicação. A camada N utiliza os serviços da camada N-1 e fornece serviços para a camada N+1 comunicando-se por meio da troca de dados.

Cada camada acrescenta suas próprias informações de controle e cabeçalho, sendo a informação processada como se fosse realmente horizontal, ou seja, as informações da camada

N de origem são interpretadas pela camada N de destino. Os pacotes de dados podem ser separados nas camadas em *bits*, quadros, datagramas, segmentos e mensagens conforme ilustra Figura 75 [63].

Figura 75 - Modelo RM-OSI.

O modelo RM-OSI é intangível, ou seja, não é palpável e não permite a comunicação em rede, para isso é necessário o uso de protocolos específicos. Esses protocolos se referem às especificações de implementação para uma ou mais camadas do modelo RM-OSI.

As camadas ou níveis do modelo RM-OSI tratam especificidades necessárias na comunicação. Em termos gerais pode-se dizer que o nível físico trata da padronização das interfaces elétricas, mecânica e de sinalização; o nível de enlace de dados tem como tarefa principal utilizar mecanismos para detecção e correção de erros; o nível de rede faz o roteamento, ou seja, escolhe o melhor caminho para a transmissão de uma mensagem, principalmente em redes de longa distância; o nível de transporte tem como principal função “garantir” que uma mensagem não se perca, tratando da comunicação fim a fim; o nível de sessão fornece facilidades para sincronização entre receptor e o transmissor; o nível de apresentação cuida do significado dos *bits*, traduzindo-os para representação na camada de aplicação; o nível de aplicação fornece diferentes atividades como correio eletrônico, transferência de arquivos, acesso a *Web*, acesso remoto a equipamentos, enfim, a grande maioria dos serviços comuns dos usuários da *Internet*. Neste trabalho, serão descritas características destas camadas, porém, informações mais detalhadas podem ser encontradas em [8], [39] e [63].

Camada Física

A camada física fornece as características físicas, mecânicas, elétricas, funcionais e de procedimento para a transmissão de *bits*. Segundo [8] suas funções são:

- definir a representação dos *bits* em sinais elétricos ou ópticos;
- decidir a taxa de dados do canal, ou seja, o número de *bits* enviados a cada segundo neste;
- realizar a sincronização entre emissor e receptor;
- especificar a topologia física da rede especificando como os dispositivos devem estar conectados para formar a rede;
- e determinar o sentido das transmissões, podendo ser *simplex*, *half-duplex* e *full-duplex*, correspondendo a difusão unidirecional, bidirecional alternada e bidirecional simultânea de troca de informações, respectivamente.

A principal função desta camada é permitir o envio de uma cadeia de *bits* pela rede sem preocupar com o seu significado ou com a forma como esses *bits* são agrupados. Os *hardwares* de conectividade são normalmente associados à camada física, tais como, concentradores, *hubs* e repetidores, que reativam os sinais elétricos para serem enviados na rede, bem como conectores de mídia, Modems e Codecs.

Camada de Enlace de Dados

O papel principal da camada de enlace de dados é organizar os *bits* da camada física, detectar e ocasionalmente corrigir erros, controlar o acesso ao meio, identificar os computadores da rede e tornar o meio de transmissão em um meio confiável para camadas superiores. Suas principais tarefas são [63]:

- transferência dos *frames* entre os equipamentos da rede, os quais são resultado do empacotamento do fluxo de *bits* da camada física em unidades gerenciáveis;
- realizar o endereçamento físico dos equipamentos utilizando geralmente o endereço MAC (*Media Access Control*) destes;
- controlar o fluxo das informações quando houver diferença na velocidade de envio e recebimento dos dados de forma que não sobrecarregue as partes;
- detectar e retransmitir *frames* danificados, perdidos e controlar o recebimento de *frames* duplicados;

- realizar o controle do acesso a mídia implementando disciplinas de acesso onde se destaca o CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), amplamente usado em redes LAN *Ethernet*.

O modelo CSMA/CD consiste em períodos alternados de disputa e de transmissão de dados. Quando uma estação termina a transmissão de um quadro, qualquer outra estação que tenha um quadro a ser enviado pode transmiti-lo, se duas ou mais estações decidirem transmitir simultaneamente, haverá uma colisão. As colisões podem ser detectadas verificando o sinal recebido e comparando-o com o sinal enviado. Realizada a detecção da colisão, uma estação realiza sua transmissão e a outra espera um intervalo de tempo aleatório para, em seguida, tentar novamente. Este algoritmo de disputa é regularizado pelo padrão IEEE 802.3 que define ainda, as opções de meio físico e taxa de transmissão nesta comunicação.

Camada de Rede

A camada de rede do modelo RM-OSI trata da entrega dos pacotes entre várias redes. Enquanto a camada de enlace realiza o endereçamento físico, dentro de uma única rede, a de rede irá endereçar, logicamente sendo a responsável pela entrega de cada pacote do equipamento de origem até o de destino. São responsabilidades desta camada [39]:

- o endereçamento lógico, onde a mensagem é incluída na rede com os endereços de origem e destino para ser direcionada pelos dispositivos no processo de comunicação;
- o roteamento, que através de equipamentos de conexão chamados roteadores, encaminham os pacotes da rede de origem até a de destino.

Com essas responsabilidades a camada de rede define os métodos de movimentação de informações entre diversas redes independentes; o endereço lógico de cada equipamento na rede; a descoberta das rotas e manutenção das tabelas de roteamento.

Camada de Transporte

Fornece uma comunicação fim a fim “confiável”. Compensa a falta de serviços de conexão confiáveis e orientados por conexão das camadas inferiores. A camada de transporte usa a sincronização de segmentos para ordená-los anexando um número a cada segmento. Fica a cargo desta camada [63]:

- o endereçamento do ponto de acesso ao serviço, pois, normalmente os equipamentos executam vários programas ao mesmo tempo, onde o pacote precisa saber, não

apenas o equipamento de destino mas, o processo de destino. Este endereçamento é comumente chamado de portas;

- a segmentação e remontagem da mensagem, solicitando a retransmissão dos pacotes perdidos;
- o controle da conexão pode ser orientado ou não por conexão. Quando não orientado, os segmentos da camada de transporte de origem são interpretados nesta mesma camada no destino. Quando orientado, é realizada a conexão, os dados são transferidos e a conexão é encerrada;
- o controle de fluxo que, diferente da camada de enlace que o faz no *link*, é realizado de uma extremidade a outra da troca de mensagens;
- o controle de erros nesta camada é realizado a cada processo certificando que toda a mensagem foi entregue ao destinatário.

Camada de Sessão

A camada de sessão permite que os usuários de diferentes máquinas estabeleçam sessões entre eles. Uma sessão mantém o controle de quem deve transmitir em cada momento, suas principais características são [39]:

- realizar o controle de diálogo permitindo que esta comunicação seja *half-duplex* ou *full-duplex*;
- o gerenciamento de símbolos, impedindo que duas partes tentem executar a mesma operação crítica ao mesmo tempo;
- e a sincronização, realizando a verificação periódica de transmissões longas para permitir que elas continuem a partir do ponto em que estavam ao ocorrer uma falha.

Camada de Apresentação

A camada de apresentação deixa de se preocupar com a movimentação de *bits*, e passa a trabalhar com questões relacionadas à sintaxe e à semântica das informações transmitidas. Para a comunicação ocorrer por diferentes representações de dados, as estruturas podem ser definidas de maneira abstrata, com uma codificação padrão que será usada durante a conexão. A camada de apresentação gerencia essas estruturas de dados abstratas e permite a definição e o intercâmbio de estruturas de nível mais alto, por exemplo, registros bancários. São responsabilidades desta camada [63]:

- a tradução das *strings*, números e códigos dos programas em fluxos de *bits* antes de serem transmitidas garantindo a interoperabilidade entre os métodos de codificação diferentes;
- a criptografia, que consiste na conversão das informações para um outro formato, garantindo a privacidade e descriptografia para a utilização da mensagem no seu formato original;
- a compressão dos dados muito utilizada na transmissão de conteúdo multimídia.

Um exemplo de serviço de apresentação é a codificação dos dados em uma forma padrão, por exemplo, para o padrão Unicode⁵² ou ASCII⁵³.

Camada de Aplicação

A camada de aplicação implementa um conjunto de protocolos bastante diversificado e orientado a aplicações bem definidas. Esta camada tem por função o gerenciamento dos programas de usuário, programas de aplicação, que utilizam o sistema de comunicação para a troca de informações. Entre os serviços específicos desta camada pode-se citar [39]:

- o terminal de rede virtual que permite a administração remota de um equipamento;
- transferência, acesso e gerenciamento de arquivos em um equipamento remoto;
- serviços de correio eletrônico e;
- serviços de diretórios.

Protocolos da Arquitetura TCP/IP

O conjunto de protocolos da *Internet*, TCP/IP, é o padrão mundial para interconexão de sistemas. Nenhum outro conjunto de protocolos proporciona tanta interoperabilidade, abrange sistemas de tantos fornecedores e é executado em mais tecnologias de rede que o TCP/IP [64]. Isso se deve basicamente à popularização da *Internet*, principal aplicação do protocolo.

⁵² Codificação que utilize 32 bits para representar um símbolo ou caractere em qualquer linguagem [8].

⁵³ Codificação que contem 128 códigos representados por um número de 7 bit [8].

Figura 76 - Comparação modelo RM-OSI e TCP/IP.
Fonte [39]

O TCP/IP de fato é um conjunto de protocolos. Os mais conhecidos dão, justamente, o nome desse conjunto, TCP e IP, que operam nas camadas de transporte e rede respectivamente. Todos os protocolos do TCP/IP são documentados nos RFCs (*Request for Comments*), que são documentos descritivos do protocolo TCP/IP e que estão disponíveis na *Internet*. O *software* de protocolo da *Internet* TCP/IP é organizado em camadas que se comunicam, conforme descrito na Figura 77.

Figura 77 - Organização conceitual e protocolos do TCP/IP.
Fonte [64]

Serão descritos os protocolos mais utilizados do modelo TCP/IP, informações detalhadas podem ser encontradas em [8], [38], [39],[53], [63] e [64].

Camada de Interface de Rede

Esta camada controla o *hardware*, encapsulando e transmitindo os pacotes a serem enviados pela rede; aceitando e demultiplexando os pacotes que chegam da rede para processamento no equipamento. Ela permite ainda, a utilização de *softwares* de interface, geralmente *drivers*, para controlar os *bits* transmitidos na rede.

O TCP/IP, na camada de interface de rede, suporta todos os protocolos padrão e proprietários, não definindo nenhum protocolo específico de comunicação para esta camada, sendo o IEEE 802.3 mais utilizado.

Camada de Rede

Também conhecida como camada de ligação entre redes, a camada de rede trabalha com o protocolo IP que utiliza quatro outros protocolos auxiliares para suporte às suas operações. São eles: ARP (*Address Resolution Protocol*), RARP (*Reverse Address Resolution Protocol*), ICMP (*Internet Control Message Protocol*) e IGMP (*Internet Group Message Protocol*).

O protocolo ARP é utilizado para associar um endereço lógico a um endereço físico. A partir de um endereço lógico IP, ele encontra o endereço físico MAC, possibilitando assim a comunicação entre dois equipamentos. O RARP faz o processo inverso, ou seja, capacita a descoberta do endereço IP a partir do endereço MAC. Esta situação geralmente acontece na primeira vez que o equipamento conecta a rede, ou quando realizado o boot⁵⁴ de um equipamento sem disco. O protocolo ICMP fornece relatórios de erros à fonte original. Equipamentos como *gateways*⁵⁵, por exemplo, o utilizam para enviar mensagens de consulta e notificação de erros. O IGMP controla os membros de um grupo de *multicast* IP. Este protocolo pode ser utilizado para aproveitar melhor os recursos de uma rede de modo a informar os roteadores, para enviarem uma mensagem *multicast*, apenas para os hosts pertencentes aos grupos, podendo ser usado em jogos ou distribuição de vídeo pela rede. Os grupos são definidos por endereços da classe D de endereçamento IP.

IP - Internet Protocol

O protocolo IP é utilizado para endereçar logicamente uma rede permitindo o encaminhamento de pacotes. Este protocolo não é orientado à conexão, deixando este trabalho para protocolos de camadas superiores. O IP transporta datagramas que podem trafegar por diferentes rotas sofrendo alteração na sequência de recebimento ou estar duplicados no receptor, apesar disso, ele não acompanha as rotas e não verifica erros. Mesmo com as funcionalidades limitadas, o IP é considerado um dos principais protocolos do modelo oferecendo funções essenciais para a transmissão de dados.

Embora o IPv4, versão atual deste protocolo, tenha sido bem projetado, a comunidade de dados evoluiu desde o início da década de 70 e desde os anos 90 a pilha TCP/IP vem assumindo funções que não estavam previstas na sua concepção:

- grande parte das empresas começaram a criar suas redes empresariais utilizando a *Internet* como meio de transporte;
- a utilização de tecnologias *Web* para acessar informações corporativas;

⁵⁴ Processo de inicialização de um equipamento

⁵⁵ Porta de ligação da rede atual com uma rede externa.

- o comércio usando a *Internet* disseminou-se;
- a *Internet* sendo empregada nas indústrias de massa e entretenimento;
- difusão de material multimídia na *Internet*.

Segundo Forouzan [65] e Olifer [66] o IPv4 tem algumas deficiências como:

- o uso da faixa de endereços é ineficiente;
- não existe reserva de recursos como estratégia de atraso em transmissão de áudio e vídeo em tempo real;
- originalmente ele não oferece segurança, necessitando de protocolos adicionais em camadas superiores para implementá-la.

Os problemas supracitados vêm sendo resolvidos com o desenvolvimento de novos protocolos para o TCP/IP, porém, todos estes estarão executando sob o IP. Percebendo a sobrecarga neste protocolo, a comunidade da *Internet* desenvolveu a versão 6 do protocolo IP com os seguintes alvos:

- criar um método de endereçamento escalável;
- reduzir as operações executadas pelos roteadores;
- prover garantias de qualidade do serviço de transporte;
- proporcionar proteção dos dados transmitidos na rede.

As novas versões de sistemas operacionais incorporam o suporte a IPv6, onde a transição da versão 4 para a 6 tende a ocorrer gradativamente, permanecendo as duas versões do protocolo na rede por um bom tempo. A Figura 78 ilustra como funciona a comunicação com os dois tipos de endereçamento.

Figura 78 - Tunelamento IPv6 IPv4.

A mudança no sistema de endereçamento é uma das inovações desta nova versão, que passa a ter 128 *bits*. Porém, não é a mais importante, afinal, o objetivo principal de sua criação está no estender das funcionalidades deste protocolo com a introdução de novos campos.

Camada de Transporte

A camada de transporte cuida da comunicação fim a fim, orientadas a conexão ou não, sendo os principais protocolos dessa camada o TCP, UDP (*User Datagram Protocol*) e o SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*) concebido para atender às necessidades de aplicações recentes da *Internet* como: M2UA e M3UA que são sinalizações de telefonia; H.248 *media gateway protocol*; H.323 e SIP que referem à telefonia IP [8].

TCP

O TCP é um protocolo de transmissão de dados confiável que utiliza o *timeout*⁵⁶ com retransmissão para alcançar confiabilidade. Nesse tipo de conexão, ambas as partes entram em acordo sobre a forma de trocarem informações. Antes de transmitir os dados, o protocolo estabelece uma conexão entre os equipamentos, num processo chamado “*three-way handshake*”, ou, apresentação em três vias, do seguinte modo:

- o equipamento que inicia a conexão envia um segmento com o *flag* SYN⁵⁷ ativado;
- o equipamento de destino responde com outro segmento, com os flags SYN e ACK⁵⁸ ativados;
- o equipamento que iniciou a conexão confirma o estabelecimento da conexão enviando um segmento com o *flag* ACK ativado. A Figura 79 ilustra o estabelecimento da conexão TCP entre dois equipamentos.

Figura 79 - Estabelecendo conexão TCP.

Uma vez estabelecida a conexão, os dados são trafegados de forma que toda a troca de informações seja controlada, garantindo a entrega dos pacotes. Encerrada a troca e a transmissão dos dados, a conexão é finalizada conforme ilustra a Figura 80.

Figura 80 - Finalizando conexão TCP.

⁵⁶ Tempo excedido, corresponde a um controle realizado por controle de tempo [62]

⁵⁷ *Flag* do protocolo TCP utilizado para sincronizar origem e destino [53].

⁵⁸ *Flag* do protocolo TCP utilizado para confirmar o sincronismo entre a origem e o destino [53].

Para transmitir os dados, o pacote TCP é dividido em segmentos menores, que são numerados e enviados ao destino. O receptor recompõe o pacote original, reordenando segmentos que chegarem fora de ordem, ou solicitando o reenvio de segmentos perdidos [64].

UDP

O protocolo UDP proporciona comunicação sem conexão entre programas. O padrão do protocolo especifica uma abstração conhecida como o número de porta de protocolo que programas aplicativos utilizam para identificar os pontos terminais da comunicação. Quando um programa aplicativo encontrado na máquina A deseja se comunicar com um aplicativo encontrado na máquina B, cada aplicativo precisa obter um número de porta de protocolo junto a seu sistema operacional local, ambos precisam usar estes números de portas de protocolo quando se comunicam. O uso de números de portas em vez de identificadores específicos de sistema, como identificadores de processo ou tarefa, mantém os protocolos independentes de um sistema específico e possibilita a comunicação entre aplicativos em um conjunto heterogêneo de sistemas de computador [64].

Por não ser orientado à conexão, este protocolo não garante a entrega do pacote conforme ilustra a Figura 81.

Figura 81 - Comunicação utilizando protocolo UDP.

Dentre os serviços mais comuns que utilizam o UDP para se comunicar, pode-se mencionar o DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) e o DNS (*Domain Name System*).

SCTP

O protocolo SCTP provê suporte para aplicações como voz sobre IP, combinando o que há de melhor no UDP e no TCP. É um protocolo confiável orientado a mensagens que, diferente do TCP, implementa serviços de transporte com múltiplos fluxos de dados entre o estabelecer da conexão e o seu fim. Este protocolo suporta serviços *multihoming*, que consiste na definição de uma associação de IPs em cada ponto final, emissor e receptor para o estabelecimento de conexão e troca de mensagens. Outras características deste protocolo são descritas em [8].

Camada de Aplicação

A camada de aplicação permite que os *softwares* de rede tenham acesso às camadas inferiores através de portas⁵⁹ TCP e UDP, por exemplo, HTTP porta 80; Telnet porta 23; FTP porta 20 para comandos e 21 para dados; tais portas definem os protocolos utilizados por essas aplicações para envio e recepção de dados. Além da comunicação de *softwares* em rede, ela fornece interfaces com o usuário e suporte para serviços como correio eletrônico, acesso e transferência de arquivos, acesso a recursos do sistema, navegação na *Web* e gerenciamento de redes.

Segundo [38] aplicações de rede são a razão de ser de uma rede de computadores. A possibilidade de criação de aplicações úteis movimentou o mercado, o entretenimento, as relações interpessoais e todos os serviços de uso habitual na *Internet*. Além dos serviços supracitados, existem ainda muitas aplicações a serem desenvolvidas, como a transmissão de vídeo em tempo real, rádio, telefonia por internet e videoconferência. Podem-se destacar nas últimas décadas, duas aplicações de sucesso como a troca de mensagens instantâneas e o compartilhamento de arquivos não hierárquico ponto a ponto.

Confiabilidade e Segurança

Uma rede deve ser capaz de atender a certo número de critérios. Os mais importantes são: desempenho, confiabilidade e segurança [8]. O desempenho pode ser medido pelo tempo de trânsito. Este é a quantidade de tempo necessária para uma mensagem trafegar de um dispositivo a outro. O tempo de resposta é o tempo decorrido entre uma solicitação e sua resposta. O desempenho de uma rede depende de uma série de fatores, incluindo o número de usuários conectados, os tipos de meios de transmissão, as capacidades do *hardware* conectado e a eficiência do *software*.

O desempenho é normalmente avaliado por duas métricas da rede: capacidade de vazão (*throughput*) e atraso (*delay*). Em geral, precisa-se de mais capacidade de vazão e menos atraso. Entretanto, esses dois critérios são contraditórios. Se houver um aumento de envio de dados para a rede, pode-se aumentar o *throughput*, mas aumenta o *delay* em razão do congestionamento de tráfego na rede. Além da precisão na entrega, a confiabilidade das redes é medida pela frequência de falhas, pelo tempo que um *link* leva para se recuperar de uma falha e pela robustez da rede em caso de uma catástrofe. Existem mecanismos que aumentam

⁵⁹ São endereços de serviço que identificam uma aplicação no servidor, as portas na faixa de 0 a 1023 são reservadas a serviços específicos, de 1024 a 49151 podem ser registradas para outros serviços e 49152 a 65535 são dinâmicas, podem ser utilizadas por qualquer aplicação [8].

a confiabilidade da rede através de redundância dos canais, distribuição do processamento, gerenciamento da rede e sistemas de detecção de falhas. Quando a confiabilidade é analisada em nível de serviço, utiliza-se o QoS (*Quality of Service*) para aumentar sua confiabilidade. Esta técnica consiste em reservar para o serviço em questão, parte da banda utilizada pela rede, de forma que o tráfego de outros aplicativos não influencie na banda deste serviço [57].

Entre as principais questões de segurança de rede, tem-se: proteção ao acesso não autorizado de dados, proteção dos dados contra danos, o desenvolvimento e a implementação de políticas e procedimento para a recuperação de violações e perda de dados. A segurança perpassa três conceitos relacionados a equipamentos e informações: confidencialidade, integridade e disponibilidade. Deve-se também ter em mente três conceitos relacionados com as pessoas que usam a informação: autenticação, autorização e irrevogabilidade [67].

Quando informações são lidas ou copiadas por alguém não autorizado a fazê-lo, o resultado é conhecido como perda de confidencialidade. Para alguns tipos de informações, confidencialidade é um atributo indispensável.

Quando uma informação é modificada de uma forma não esperada, o resultado é conhecido com perda de integridade. Isso significa que mudanças não autorizadas são realizadas nas informações, seja por erro humano ou de forma intencional. Integridade é particularmente importante para informações de segurança crítica.

A informação também pode ser apagada ou tornar-se inacessível, resultando na falta de disponibilidade. Isto significa que pessoas autorizadas a acessar a informação não podem fazê-lo. Disponibilidade é, frequentemente, o atributo mais importante quando há uma dependência da informação. Disponibilidade de uma rede é importante quando se depende da conexão para realização de atividades essenciais à execução das tarefas.

Para tornar a informação disponível para aqueles que precisam e são autorizados a acessá-la, organizações usam autenticação e autorização. A autenticação é utilizada para provar que o usuário é quem diz ser. Autorização, por sua vez, é o ato de determinar se um usuário particular tem o direito de executar certa atividade. Autenticação e autorização são processos empregados em conjunto. A segurança torna-se mais forte quando o resultado de uma autenticação não pode ser negado posteriormente, onde um acesso não autorizado torna-se irrevogável [67].