

SISTEMA DE APOIO A PREVENÇÃO DE FALHAS HUMANAS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM TEMPO REAL

Trabalho de Conclusão de Curso

Engenharia da Computação

Bruno Henrique Montenegro Ferreira
Orientador: Prof. Sérgio Campello Oliveira



**Universidade de Pernambuco
Escola Politécnica de Pernambuco
Graduação em Engenharia de Computação**

**BRUNO HENRIQUE MONTENEGRO
FERREIRA**

**SISTEMA DE APOIO A PREVENÇÃO DE
FALHAS HUMANAS NA OPERAÇÃO DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA
EM TEMPO REAL**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia da Computação pela Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco.

Recife, Dezembro 2011.

MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

Avaliação Final (para o presidente da banca)*

No dia 19 de Dezembro de 2011, às 9:00 horas, reuniu-se para deliberar a defesa da monografia de conclusão de curso do discente BRUNO HENRIQUE MONTENEGRO FERREIRA, orientado pelo professor Sérgio Campello Oliveira, sob título Sistema de apoio a prevenção de falhas humanas na operação de sistema elétrico de potência em tempo real, a banca composta pelos professores:

Joabe Bezerra de Jesus Júnior

Sérgio Campello Oliveira

Após a apresentação da monografia e discussão entre os membros da Banca, a mesma foi considerada:

Aprovada Aprovada com Restrições* Reprovada

e foi-lhe atribuída nota: 9,0 (nove)

*(Obrigatório o preenchimento do campo abaixo com comentários para o autor)

O discente terá 07 dias para entrega da versão final da monografia a contar da data deste documento.

JOABE BEZERRA DE JESUS JÚNIOR

SÉRGIO CAMPELLO OLIVEIRA

*A Severina Barbosa Montenegro (in memoriam), cujo desejo de me ver “formado”
não pode ser realizado em vida.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por proporcionar a conclusão deste curso. Gostaria de enaltecer também o meu agradecimento a minha mãe Albany Maria Montenegro e ao meu pai Humberto Gomes Ferreira pelo total apoio a conclusão do meu curso. Agradeço a minha mulher amada pelo companheirismo e presença constante durante essa caminhada na Escola Politécnica. Gostaria também de ressaltar meus agradecimentos a meus familiares, que sempre acreditaram em meu trabalho.

É dever mencionar profundo agradecimento aos companheiros do Ministério Público de Pernambuco, nas figuras de Antônio de Pádua e Antônio Carlos pelos inúmeros atrasos decorrentes da correria entre Universidade e o trabalho, bem como, eventuais faltas em épocas de prova. Agradeço também a Eugênio Antunes que permitiu o gozo de minhas férias para dedicação exclusiva a elaboração deste trabalho.

É de extrema importância também engrandecer o apoio inestimável recebido pelos amigos: Professor Domingos Sávio Beserra, Daniel Barlavento Gomes e Roberto Barreto Sampaio que acreditaram na ideia do projeto, tema desse trabalho de conclusão e que em conjunto pudemos transformar um esboço de quadro branco em realidade.

Aproveito a oportunidade também de mencionar os meus agradecimentos ao Professor Sérgio Campello por ter aceitado orientar o meu trabalho, ao Professor Joabe Jesus pela grande ajuda nesse trabalho e ao Professor Sérgio Murilo por contribuir diretamente na elaboração de trabalho de conclusão.

Registro também a minha gratidão aos professores do curso que contribuíram com a minha formação na Universidade e, em destaque, ao Professor Mêuser Valença, por ensinar aos seus alunos o verdadeiro significado da palavra Engenharia. Por fim, agradeço a convivência saudável dos amigos e colegas sempre presentes durante essa caminhada.

Resumo

A operação do sistema elétrico de potencia (SEP) isenta de falhas não é tarefa simples. Vários fatores interligados ou isolados podem desencadear em graves falhas no SEP. Dentre estes fatores um de fundamental importância é o fator humano. Os operadores de instalação (OPI) desempenham papel vital na correta operação do SEP. Um das principais atividades do OPI é a execução de manobras em tempo real, seguindo ao estabelecido pelos documentos oficiais da operação – o roteiro de manobra (RTM). No entanto, devido à natureza repetitiva desta atividade os OPIs estão sujeitos a cometerem falhas operacionais, tais eventos podem ocorrer através de uma mera desatenção na execução ou a total negligência aos RTMs. Igualmente, a operação de equipamentos com nomenclaturas similares, bem como, a proximidade física de seus comandos também contribui para a ocorrência de falhas humanas. Neste trabalho é proposto um sistema baseado em hardware e software que auxilie o OPI na prevenção de falhas em tempo real. Tal sistema atuará de forma preventiva alertando o OPI, através de um aviso sonoro, de que ele está se desviando da correta execução de seu RTM.

Palavras chave: prevenção de falhas humanas, sistemas em tempo real, sistema elétrico de potência, sistemas embarcados.

Abstract

The operation of the electric power grid (EPG) fault-free is no simple task. Several interrelated or isolated factors may trigger in serious flaws in the EPG. Among these factors one of fundamental importance is the human factor. The facility operators (FO) play a vital role in the correct operation of the EPG. One of the main activities of the FO is to perform maneuvers in real time, following the established official documents of the operation - the script for maneuver (SM). However, due to the repetitive nature of their activity FOs are subject to commit operational failures, such events can occur through mere carelessness in the execution or total neglect of SM. In the same way, the operation of equipments with similar nomenclatures, as well as the physical proximity of their commands also contributes to the occurrence of human failures. This paper proposes a system based on hardware and software that will assist the FO in the prevention of failures in real time. Such a system will act in a preventive warning the OPI through an audible message, that he is deviating from the correct execution of his SM.

Keywords: prevention of human failures, real time systems, electric power grid, embedded systems.

Sumário

Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Taxonomia e Conceitos Aplicados sobre Sistemas Elétricos de Potência	4
2.1 Sistema Elétrico de Potência	4
2.1.1 Estrutura Simplificada do SEP	5
2.1.2 Sistema Interligado Nacional (SIN)	6
2.2 Definição de termos	7
2.3 Operação do sistema elétrico de potência	9
2.3.1 Normatização	11
2.3.2 Pré-operação	12
2.3.3 Tempo real	12
2.3.4 Pós-operação	13
2.4 Operação de instalações do SEP	14
2.4.1 Codificação operacional dos equipamentos de uma instalação	15
2.4.2 Procedimentos de manobra	18
Capítulo 3 Trabalhos Relacionados	21
3.1 Motor de simulação baseado em modelos CPN aplicado a um sistema de treinamento de operadores	21
3.2 O Contexto de trabalho, as IHMs e o erro humano na operação de sistemas elétricos	22
3.3 <i>Discovering vulnerabilities in control system human–machine interface software</i>	22
3.4 <i>Abstractions for operator support in energy managements systems</i>	23

3.5	Sistema inteligente para a detecção de falhas de manobras em seccionadores de subestações de potência	24
3.6	<i>Wireless multimedia sensor and actor networks for the next generation power grid</i>	25
3.7	Considerações finais	25
Capítulo 4 Do Sistema Proposto		27
4.1	Visão Geral	27
4.2	Funcionalidades do sistema	29
4.2.1	Modos de funcionamento do sistema	30
4.3	Enlace de comunicação	32
4.3.1	Introdução	32
4.3.2	Arquitetura do <i>Bluetooth</i>	34
4.3.3	Processo de conexão	36
4.4	Módulo de Aquisição	39
4.4.1	Fonte de alimentação	40
4.4.2	Sensor	41
4.4.3	Módulo de comunicação serial <i>Bluetooth</i>	42
4.4.4	Microcontrolador	43
4.4.5	Simulação da execução do módulo de aquisição	45
4.5	Módulo monitor	46
4.5.1	CPU	47
4.5.2	Programa residente	48
4.5.3	Simulação da execução do servidor remoto	50
4.6	Desenvolvimento da solução	52
4.6.1	Sistema embarcado produzido	52
4.6.2	Software desenvolvido	55

4.7	Análise preliminar de desempenho dos módulos <i>Bluetooth</i>	59
Capítulo 5 Conclusão e Trabalhos Futuros		60
5.1	Trabalhos futuros	61
5.1.1	Melhorias de hardware	61
5.1.2	Melhorias de software	62
Bibliografia		63
Apêndice A Diagrama Unifilar Típico		66
Apêndice B RTM Fictício		67

Índice de Figuras

Figura 1.	Representação esquemática do fluxo de energia elétrica [15].	5
Figura 2.	Representação do SIN [12].	7
Figura 3.	Representação da estrutura da operação do SEP brasileiro.	10
Figura 4.	Trecho de um diagrama unifilar típico.	15
Figura 5.	Foto de um painel de comando de uma instalação típica do SEP.	18
Figura 6.	Gráfico comparativo entre as causas humanas de falhas operacionais, retirado de [13].	19
Figura 7.	Diagrama geral do sistema computacional.	27
Figura 8.	Diagrama do sistema proposto.	28
Figura 9.	Exemplos de <i>piconet</i> [19].	33
Figura 10.	Estrutura da pilha de protocolo <i>Bluetooth</i> .	34
Figura 11.	Estrutura dos estados do <i>Bluetooth</i> .	37
Figura 12.	Diagrama de estados do processo de conexão dos dispositivos <i>Bluetooth</i> .	38
Figura 13.	Diagrama em blocos do módulo de aquisição.	40
Figura 14.	Esquema elétrico do regulador de tensão utilizado no projeto.	41
Figura 15.	Esquema elétrico do sensor utilizado no projeto.	42
Figura 16.	Esquema elétrico do módulo <i>Bluetooth</i> .	42
Figura 17.	Esquema elétrico do microcontrolador utilizado no projeto.	44
Figura 18.	Fluxograma de funcionamento do módulo de aquisição.	45
Figura 19.	Diagrama em blocos do módulo monitor.	47
Figura 20.	Diagrama das camadas de software do módulo monitor.	48
Figura 21.	Diagrama em blocos das funcionalidades presentes programa residente.	49

Figura 22.	Fluxograma de funcionamento do servidor remoto.	51
Figura 23.	Leiaute da PCI do bloco de controle e alimentação.	53
Figura 24.	PCI construída do bloco de controle e alimentação.	54
Figura 25.	Leiaute da PCI do bloco do sensor.....	54
Figura 26.	PCI construída do bloco do sensor.....	55
Figura 27.	PCI consolidada do projeto de hardware.....	55
Figura 28.	Tela inicial do sistema.	56
Figura 29.	Tela de busca de módulos sensores.	56
Figura 30.	Tela de cadastro de um módulo sensor.	57
Figura 31.	Tela de mensagem de dispositivo cadastrado com sucesso.....	57
Figura 32.	Tela de mensagem de nenhum dispositivo a ser cadastrado.....	57
Figura 33.	Tela resultante da funcionalidade do botão de teste <i>link</i>	58

Índice de Tabelas

Tabela 1.	Tabela de codificação do tipo de equipamento	16
Tabela 2.	Tabela de codificação da tensão de operação de equipamento	16
Tabela 3.	Tabela de codificação da função ou nome de equipamento	17
Tabela 4.	Tabela de codificação da finalidade da chave seccionadora.....	17
Tabela 5.	Tabela de contendo trecho de um RTM fictício.	31
Tabela 6.	Tabela de comparação de desempenho de latência de conexão.	59

Tabela de Símbolos e Siglas

ACK – *Acknowledge*

ACL – *Assynchronous Connection Less*

API – *Application Programming Interface*

APP – Análises Preliminares de Perigo

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

CPN – *Colored Petri Net*

CPU – *Central Process Unit*

DIP – *Dual In-line Package*

FHS – *Frequency Hopping Synchronization*

FHSS – *Frequency Hopping Spread Spectrum*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

IHM – Interface Homem Máquina

IP – *Internet Protocol*

IR – Infrared (Infravermelho)

ISM – *Industrial Scientific and Medical*

L2CAP – *Logical Link Control and Adaptation*

LED – *Lightning Emitting Diode*

LMP – *Link Manager Protocol*

LT – Linhas de Transmissão

MAC – *Media Access Control*

Mbps – *Megabit por segundo*

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

OPI – Operador de Instalação

OPS – Operador de Sistema

PCI – Placa de Circuito Impresso

PDCF – Programa Diário de Carga e Frequência.

PDE – Programa Diário da Operação Eletroenergética

PDF – Programa Diário de Defluências

PDI – Programa Diário de Intervenções

PDO – Programa Diário de Operação

PDP – Programa Diário de Produção

PGM – Programas de Manobras

PPP – *Point-to-Point Protocol*

RAM – *Random Access Memory* (Memória de Acesso Aleatório)

RF – Rádio Frequência

RFCOMM – *Radio Frequency Communication* (Comunicação em Rádio Frequência)

RTM – Roteiros de Manobras

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition* (Controle Supervisório e Aquisição de Dados)

SCO – *Synchronous Connection Oriented* (Conexão Orientada a Sincronismo)

SDP – *Service Discovery Protocol* (Protocolo de Descoberta de Serviços)

SIG – *Special Interest Group* (Grupo de Interesse Especial)

SIN – Sistema Interligado Nacional

SMD – *Surface Mounting Device* (Dispositivo com Montagem em Superfície)

TCP – *Transmission Control Protocol* (Protocolo de Controle de Transmissão)

TDD – *Time Division Duplex* (Duplexação na Divisão do Tempo)

TTL – *Transistor Transistor Logic* (Lógica Transistor Transistor)

UART – *Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*

WAP – *Wireless Application Protocol*

WMSAN – *Wireless Multimedia Sensor and Actor Network*

Capítulo 1

Introdução

Na operação do Sistema Elétrico de Potência (SEP), os operadores de instalação (OPI) de subestações e usinas têm a complexa tarefa de executarem manobras observando os requisitos de segurança física pessoal, bem como, os requisitos funcionais dos procedimentos de manobra. Entende-se por manobra uma ação ou conjunto de ações efetuadas com a finalidade de se atingir uma determinada configuração para o SEP, usina ou instalação. Assim, os Roteiros de Manobras (RTM) são procedimentos que contemplam ações padronizadas para liberação e normalização de equipamentos e linhas de transmissão (LT) e os Programas de Manobras (PGM) são procedimentos que contemplam ações não padronizadas para liberação e normalização de equipamentos e LT [1], enquanto que as Análises Preliminares de Perigo (APP) definem quando realizar as manobras.

Os operadores do SEP nacional possuem em tempo real os PGMs e RTMs – para livre consulta – facilitando assim a liberação e normalização dos equipamentos em condições programadas e de urgências. No entanto, devido à característica cíclica e rotineira da atividade de operação de subestações [2], [3], os OPI's enfrentam problemas relacionados a erros de manobras, causando transtornos à população em geral, bem como grandes prejuízos à empresa do setor elétrico responsável pelo SEP em questão. Dentre esses episódios um dos mais recentes em escala nacional foi o de furnas em 2009 [4]. Em sistemas críticos como o SEP, falhas são inadmissíveis e podem causar danos não só para população, mas prejuízo financeiro para própria geradora de energia (PREVOST, AUBIN, *et al.*, 2007).

As falhas mais frequentes são derivadas de negligência aos documentos formais de manobras citados anteriormente, PGM e RTM, ou até mesmo pela proximidade sintática dos equipamentos que perfazem uma subestação ou usina elétrica. Por outro lado, a total automatização da operação do SEP torna-se inviável, pois nas primeiras tentativas desse processo [5] o número de falhas em manobras aumentou significativamente devido a problemas que a eletrônica ou a computação não conseguiram identificar, como o de chaves que não abriam totalmente e

problemas relacionados à mecânica de alguns equipamentos do SEP [5]. Assim a presença do ser humano é imprescindível na rápida identificação desses incidentes, podendo o mesmo sugerir ou interferir numa solução para o problema.

A operação de uma SEP constitui uma tarefa complexa que envolve muitos parâmetros e pode ser comparada a um sistema de controle de tráfego aéreo (GEUS e DOMETERCO, 2004). As decisões de engenheiros e operadores podem ter impacto, por exemplo, no mercado financeiro. As soluções envolvidas devem ser providas rapidamente, geralmente em questões de horas ou minutos, já que o sistema funciona em tempo real.

Semelhante aos sistemas desenvolvidos para outros setores industriais, a automação do setor elétrico resulta em equipamentos mais sofisticados e que demandam mais atenção dos operadores, que passam a monitorar e operar um conjunto cada vez maior de equipamentos. Esta situação resulta no aumento da carga cognitiva e em ambientes mais propícios ao erro (LIMA, DEC, *et al.*, 2006).

O objetivo desse trabalho é desenvolver um sistema de apoio à operação de subestações [6]. Esse sistema é baseado em hardware/software, tendo como meta auxiliar o OPI antes que o mesmo possa cometer uma falha operacional na realização de manobras em instalações elétricas.

O presente trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 – neste capítulo é realizada a contextualização do funcionamento do SEP, bem como, a abordagem dos problemas enfrentados no dia a dia da operação do SEP;
- Capítulo 3 – neste capítulo são apresentados outros trabalhos relacionados à otimização da operação do SEP, é realizado um breve resumo de cada trabalho, e ao final do capítulo um estudo comparativo dos trabalhos estudados;
- Capítulo 4 – no capítulo 4 é apresentado o sistema proposto, utilizando uma abordagem geral sobre o sistema e ao longo do capítulo é realizado o detalhamento de cada unidade do sistema; os produtos resultantes do projeto, ao final é realizada também uma ponderação acerca dos resultados obtidos;

- Capítulo 5 – neste capítulo é avaliado o que foi feito durante todo o trabalho, são apresentados às limitações do projeto e a sugestão de melhorias através dos trabalhos futuros.

Capítulo 2

Taxonomia e Conceitos Aplicados sobre Sistemas Elétricos de Potência

Neste capítulo são abordados todos os conceitos relativos ao sistema proposto, vale salientar que ao longo dessas definições é necessário restringir o escopo de cada tema, tendo em vista que o sistema proposto envolve várias áreas de conhecimento, a saber: engenharia elétrica, ergonomia (mais precisamente no tema interface humano máquina), estudo de falhas, sistemas de tempo real, interface hardware-software dentre outros.

Considerando que o tema do trabalho é desenvolvido no ambiente do Sistema Elétrico de Potência (SEP), nada mais natural do que começar a partir dessa definição.

2.1 Sistema Elétrico de Potência

A seguir têm-se várias formulações, propostas por vários autores sobre o SEP.

“Um sistema elétrico de potência é uma rede de componentes interconectados projetados para converter continuamente energia não-elétrica em energia elétrica, transportar a energia elétrica por distâncias potencialmente grandes.” [8]

“Os sistemas elétricos podem ser categorizados como sistemas críticos - sistemas nos quais falhas podem resultar em perdas econômicas significativas, danos físicos ou ameaças à vida humana. Nestes sistemas, uma interface com o operador que se apresente confusa pode resultar em uma interpretação errada e induzir erros durante a tomada de decisões.” [13]

Verifica-se então que o SEP é um circuito complexo composto por uma cadeia de equipamentos, cujo produto – energia elétrica - é consumido pela sociedade moderna em vários níveis de utilização, tais como industrial, comercial e residencial. Considerada pelo Estado Brasileiro no artigo 6º da LEI N. 2.597 – DE 12 DE SETEMBRO DE 1955 – como área de segurança nacional, as instalações do SEP são de fundamental importância para o desenvolvimento de uma nação.

Sendo assim, na próxima subseção é abordada a estrutura simplificada dos componentes que perfazem o SEP, ressaltando que o seu entendimento facilitará a compreensão da solução proposta.

2.1.1 Estrutura Simplificada do SEP

A Figura 1 representa, de forma sucinta, os elementos essenciais para um SEP.

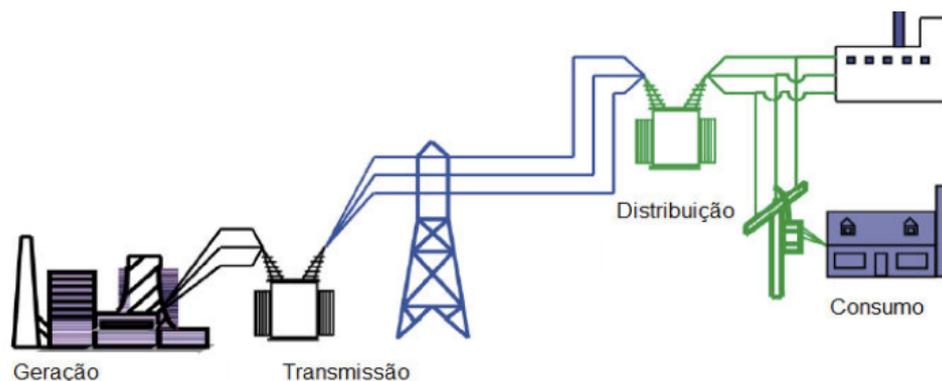


Figura 1. Representação esquemática do fluxo de energia elétrica [15].

É necessário fazer algumas considerações sobre o diagrama acima, associando também a nomenclatura utilizada no fluir do texto.

- Geração – local onde se encontra todo o maquinário responsável pela transformação da energia que pode ser de várias fontes, hidráulica, nuclear, eólica dentre outras, em energia elétrica. Também denominada de usina, a geração é composta por subestação geradora, sala de comando e controle que condicionam a energia elétrica gerada pelos geradores para níveis que possam ser utilizados na transmissão;
- Transmissão – compreende a subestação transmissora, sala de comando e controle associados pelas diversas torres e cabos condutores de

energia, responsáveis por fazer a interligação elétrica entre a geração e o sistema de distribuição.

- Distribuição – composta por subestação distribuidora, sala de comando e controle também é associada pelos diversos postes e cabos condutores, geralmente é o último local de tratamento de energia antes de chegar aos consumidores.
- Consumo – última instância do circuito de um SEP, representado pelos consumidores em suas várias classes, como: industrial, comercial e residencial.

O elemento de maior interesse para esse trabalho é a sala de comando e controle, quer seja ela uma subestação de distribuição e transmissão ou de uma usina, tendo em vista que nela reside toda a operação do SEP e os seus problemas associados. A partir deste momento definindo a nomenclatura do trabalho, quaisquer subestações são tratadas no texto como instalações, ou no singular, como instalação.

2.1.2 Sistema Interligado Nacional (SIN)

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários [12]. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país não está ligado ao SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.

A representação do SIN, pode ser vista na Figura 2 a seguir. Como visto anteriormente, a região do país que o SIN tem menor presença é a região norte, devido à floresta amazônica. No entanto, verifica-se que há projetos de expansão para esta região, conforme indicado nas linhas pontilhadas da Figura 2.

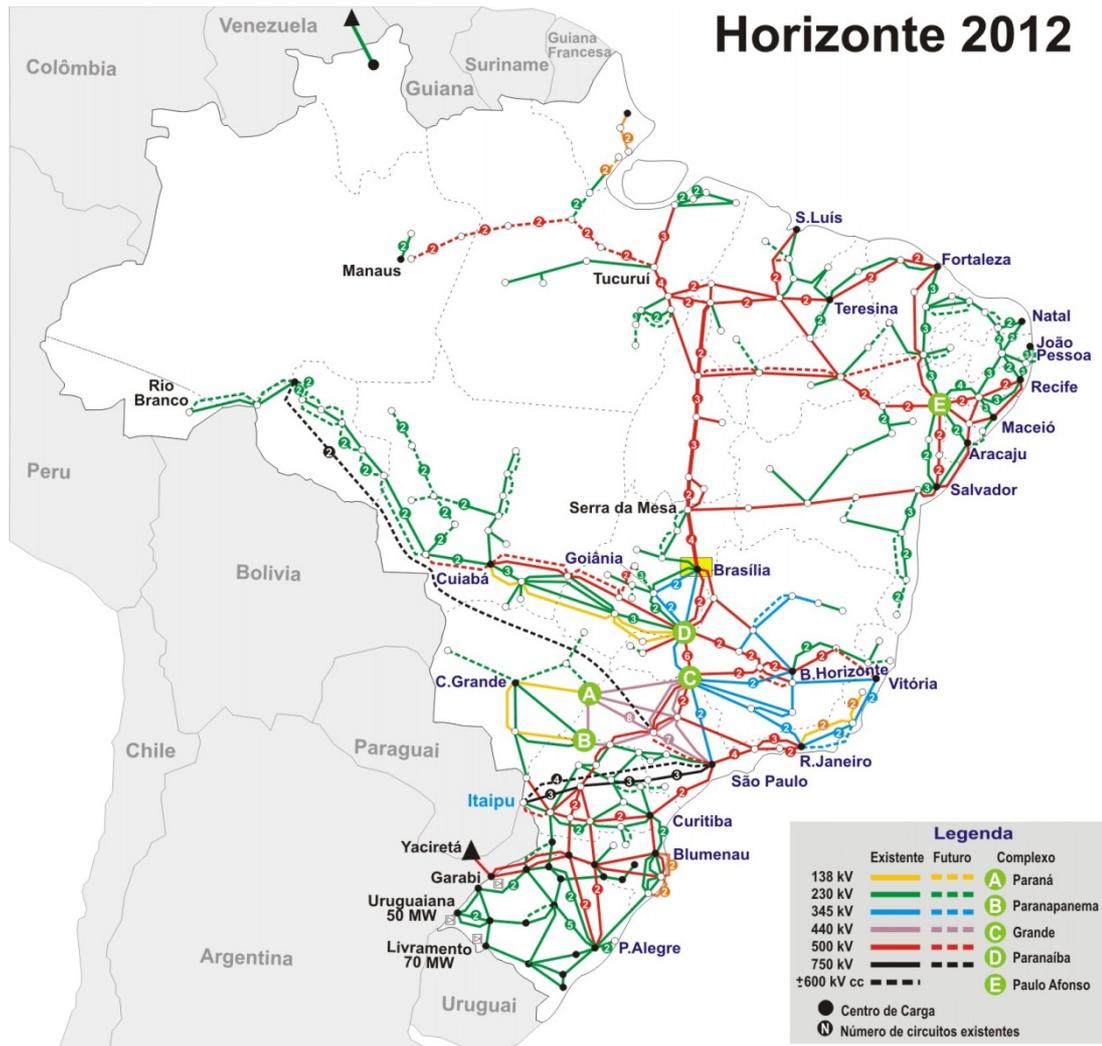


Figura 2. Representação do SIN [12].

2.2 Definição de termos

Uma vez definido o campo básico de aplicação do sistema proposto se torna obrigatório a definição de vários conceitos cuja assimilação é de suma importância para a compreensão do projeto.

- Manobra - Entende-se por manobra uma ação ou conjunto de ações efetuadas com a finalidade de se atingir uma determinada configuração para o SEP, usina ou instalação [1]. Podem ser do tipo programadas ou não programadas.

- Roteiro de manobras (RTM) - São procedimentos que contemplam ações padronizadas para liberação e normalização de equipamentos e linhas de transmissão [1].
- Programa de manobras (PGM) - São procedimentos que contemplam ações não padronizadas para liberação e normalização de equipamentos e linhas de transmissão [1].
- OPI – operador de instalação, é o profissional responsável pela operação dos sistemas de controle de uma instalação em tempo real.
- OPS – operador de sistema, é o profissional responsável pelo monitoramento e coordenação de várias instalações, tendo a visão geral do SEP como um todo, também acompanha em tempo real as execuções de manobras nas instalações.
- Falha¹ Operacional - É todo desvio na execução de um procedimento operacional, normatizado ou esperado, que resulte em tempo, risco ou configuração operacional indesejada [9].
- Risco de Falha Operacional - É a probabilidade de ocorrer uma falha operacional durante a execução de um procedimento operacional [9].
- Agravantes do Risco de Falhas Operacionais - É qualquer condição existente no sistema físico ou de procedimento operacional normatizado ou esperado, em uma instalação que agrave o risco nominal (inerente) a este, predispondo à falha operacional [9].
- Anomalia - É o desvio de um padrão existente, no sistema físico ou de procedimento operacional, normatizado ou esperado, que agrava de forma moderada o risco nominal de falha operacional [9].

¹ Neste trabalho é utilizado a nomenclatura de falha operacional proveniente de [9], tendo em vista, que neste caso o projeto está mais alinhado as necessidades das empresas que integram o SEP brasileiro, apesar de [11] ser a taxonomia dominante para o tema.

- Quase-Falha – É todo desvio identificado e inibido durante a execução de um procedimento operacional normatizado ou esperado, que não resulte em tempo, risco ou configuração operacional indesejada [9].
- Mecanismo Anti-Falha Operacional – É qualquer recurso específico utilizado para coibir a desatenção, minimizar ou eliminar ações do operador que resultem em falha operacional [9].
- Mecanismo Anti-Boqueira – É qualquer recurso específico utilizado para coibir a desatenção do operador na execução operacional [9].
- Mecanismo de Redução de Agravante de Risco – É qualquer recurso específico utilizado para minimizar ou eliminar um agravante de risco de falha operacional [9].

Termina a explanação dos conceitos importantes, cabe agora prosseguir o estudo com a apresentação da operação do sistema elétrico de potência.

2.3 Operação do sistema elétrico de potência

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) define operação do sistema como:

“A operação do sistema consiste na, programação, normatização, coordenação, supervisão, controle, análise e estatística da operação integrada do SIN, com a finalidade de garantir seu funcionamento de forma otimizada, confiável, segura e com qualidade” [12].

As relações entre a operação do sistema e a operação das instalações caracterizam-se por uma hierarquia bem definida, pela interdependência e complementaridade de ações, bem como por atividades específicas em que os requisitos da operação do sistema devem ser observados na operação das instalações [12]. Nesse contexto, é apresentado à estrutura hierárquica entre o ONS e os agentes de operação, de forma sucinta, o que irá proporcionar um melhor entendimento da operação do SEP brasileiro como um todo. A seguir tem-se a Figura 3 que detalha essa estrutura.

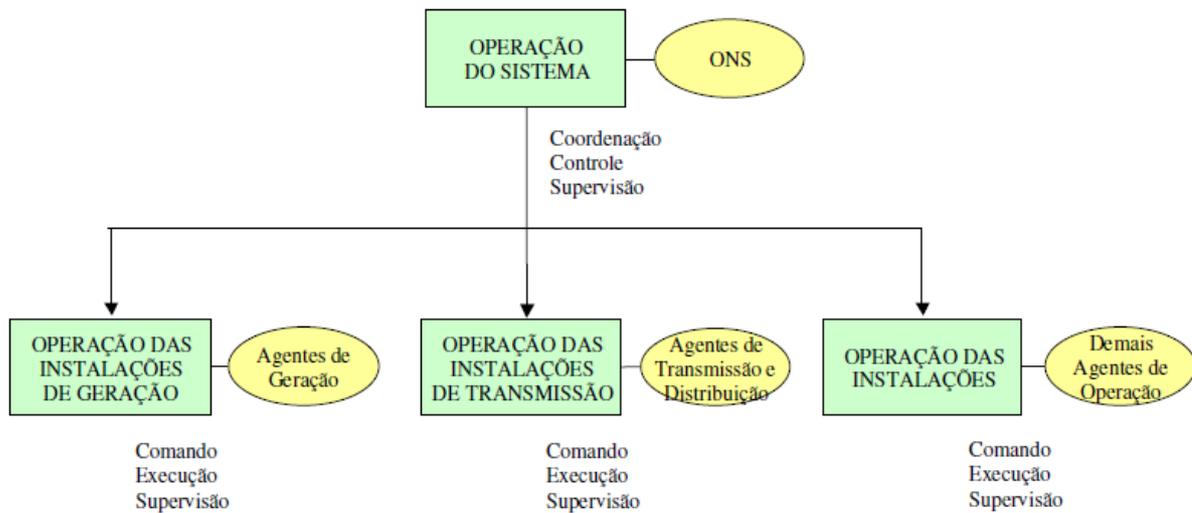


Figura 3. Representação da estrutura da operação do SEP brasileiro.

A estrutura acima, da Figura 3 acima, delimita os centros de operação do ONS nos seguintes centros:

- Centro Nacional de Operação do Sistema (CNOS) – representado pelo bloco Operação do Sistema – é o centro de operação de mais alto nível hierárquico do ONS, que opera diretamente sobre os demais centros de operação do ONS e é responsável pela coordenação, supervisão, e controle da rede de operação, das interligações internacionais e do despacho de geração das usinas despachadas de forma centralizada;
- Centro Regional de Operação do Sistema (COSR) – representados no diagrama por Operação das Instalações de Geração, Operação das Instalações de Transmissão e Operação das Instalações – são os centros de operação de propriedade do ONS, responsáveis pela coordenação, supervisão e controle da rede de operação regional/local, pela supervisão e controle do despacho de geração das usinas despachadas via central única e da rede de operação sistêmica.
- Centro de operação dos agentes da operação (COAO) – representados no diagrama por Agentes de Geração, Agentes de Transmissão e Distribuição e Demais Agentes de Operação – são os centros de operação de responsabilidade do agente de operação ou sob delegação desse agente, responsáveis pela supervisão, comando e execução da operação de suas

instalações, em parte delas ou em sua totalidade, inclusive daquelas que fazem parte da rede de operação.

O ONS separa as atividades de operação do sistema em normatização, pré-operação, tempo real e de pós-operação [12]. As atividades de pré-operação, tempo real e pós-operação seguem uma ordem cronológica bem definida e sequencial, o que não acontece com a normatização, tendo em vista que devido ao seu caráter normativo pode gerar documentos a qualquer momento. Abaixo segue uma breve descrição de cada atividade.

2.3.1 Normatização

Responsável pela elaboração, revisão e atualização dos documentos necessários à operação do sistema. Tais documentos obedecem às diretrizes estabelecidas pelo ONS. Dentre as atividades inerentes a fase de normatização, o ONS destaca as seguintes [12]:

- i. Elaboração das instruções de operação e das mensagens operativas contendo os procedimentos para o controle da transmissão e da geração, em condição normal e sob contingência; o restabelecimento de equipamentos em desligamento simples; a recomposição da rede de operação após perturbação geral ou parcial; o gerenciamento de carga e a operação hidráulica dos sistemas de reservatórios, para subsidiar as atividades de tempo real;
- ii. Elaboração do cadastro de informações operacionais dos equipamentos da rede de operação;
- iii. Elaboração dos regulamentos internacionais;
- iv. Elaboração dos ajustamentos operativos;
- v. Treinamento das equipes de operação;
- vi. Elaboração e revisão dos diagramas unifilares do sistema para a rede de operação e rede de supervisão.

2.3.2 Pré-operação

Consiste na elaboração do Programa Diário de Operação (PDO), que é a programação de todas as intervenções necessárias para a operação do SEP brasileiro, nesse programa, são asseguradas as condições elétricas, energéticas e hidráulicas da programação diária da operação e minuciados os procedimentos operacionais e as ações a serem desenvolvidas na operação em tempo real. Dentre as atividades mais importantes da pré-operação, destacam-se:

- i. O processamento operacional das solicitações de intervenções – compreendida na análise operacional das solicitações de intervenção, no treinamento das intervenções sem desligamento e, por fim, nas intervenções solicitadas no dia anterior à realização da mesma.
- ii. O processamento operacional das diretrizes elétricas, energéticas e hidráulicas – consiste na definição das ações a serem observadas no tempo real, a partir de diretrizes emanadas pelo ONS, bem como, das condições operacionais da rede de operação.
- iii. A consolidação e elaboração da programação – composta pela validação final dos processamentos operacionais anteriores e na consolidação do Programa Diário de Produção (PDP), do Programa Diário de Intervenções (PDI) e do Programa Diário de Defluências (PDF), que constituem o Programa Diário da Operação Eletroenergética (PDE) e na elaboração do Programa Diário de Carga e Frequência (PDCF).

2.3.3 Tempo real

A operação do sistema em tempo real é formada pela coordenação, supervisão e controle – realizados em tempo real pelos centros de operação do ONS – de todos os processos operacionais dos sistemas hidráulicos, energéticos e elétricos do SEP brasileiro. Da operação em tempo real derivam as determinações para os agentes de operação efetuar as manobras, supervisão e execução da operação das instalações. As atividades dessa fase compreendem:

- i. Execução de intervenções;
- ii. Controle da geração em operação normal;

- iii. Controle da transmissão em operação normal;
- iv. Operação hidráulica dos sistemas de reservatórios;
- v. Operação em contingência;
- vi. Gerenciamento da carga;
- vii. Recomposição da rede de operação após ocorrências;

2.3.4 Pós-operação

A pós-operação consiste na apuração e triagem dos dados da operação, no acompanhamento, avaliação e divulgação de informações e resultados, no tratamento estatístico dos resultados da operação do sistema, bem como no armazenamento dos dados e informações referentes às operações realizadas no anteriormente na fase de tempo real. A fase de pós-operação é formada pelas seguintes atividades:

- i. Apuração dos dados: obtenção de dados e informações consistentes sobre a operação realizada, através de atividades de coleta de dados e informações a partir dos recursos disponíveis para seleção do que melhor representa a operação realizada, de classificação e de interação com os agentes da operação para maior consistência desses dados e informações. Os resultados apurados são armazenados na Base de Dados Técnica (BDT) do ONS para emissão de relatórios, consultas e simulações;
- ii. Triagem de ocorrências e perturbações, com identificação, segundo critérios preestabelecidos, das ocorrências e perturbações que devem ser objeto de análise e posterior emissão de relatórios específicos;
- iii. Elaboração de relatórios estatísticos; ou seja, relatórios periódicos para divulgação dos resultados da operação realizada e para realimentação dos demais processos relacionados à operação, elaborados a partir da apuração e análise de dados e informações, os quais são confrontados com os valores programados ou esperados;
- iv. Elaboração de relatórios de análise de ocorrências; de análise de perturbações; de análise da operação e gestão das correspondentes

recomendações, esta atividade compreende da documentação dos procedimentos realizados da fase tempo real para posterior análise;

- v. Obtenção de dados e informações para contabilização, com a estruturação e a classificação desses dados e informações apurados para produção de relatórios específicos, para fins de contabilização com base em critérios estabelecidos;
- vi. Cálculo e análise dos indicadores de desempenho, ou seja, cálculo de indicadores, com base nos dados e informações apurados, que permitem o acompanhamento e a análise do desempenho da operação e do sistema.

Uma vez identificadas às etapas de operação do SEP, bem como, sua estrutura hierárquica e funcional, pode-se, detalhar o funcionamento de uma instalação do SEP apresentando as dificuldades encontradas na sua operação em tempo real.

2.4 Operação de instalações do SEP

O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema de apoio à operação de subestações, para tal, é necessário conhecer alguns conceitos e as rotinas de operação de uma instalação, em tempo real, seja ela subestação ou usina do SEP.

A representação básica de uma instalação do SEP é dada por um esquema elétrico chamado diagrama unifilar. Tal diagrama é equivalente ao circuito elétrico trifásico presente no pátio da instalação, utilizando uma notação que simplifica o esquema trifásico para um sistema monofásico (unifilar). Neste esquema o operador tem as informações dos equipamentos presentes na instalação, cada um com uma nomenclatura específica e única que o identifica plenamente sem haver ambiguidade.

A estrutura básica de um circuito numa subestação é composta por um conjunto de chaves seccionadoras de entrada de linha, disjuntores, seccionadora de barramento, conforme Figura 4 abaixo. Por ora, não há necessidade de detalhar todo o diagrama unifilar, o interessante nesse momento é perceber que equipamentos que possuem mesma finalidade em circuitos diferentes possuem

nomenclaturas similares, o que se demonstra a seguir ser um fator preponderante ao índice de falhas [13]. Ainda na Figura 4, tem-se um trecho de um diagrama unifilar de uma subestação, cujo diagrama completo está representado no apêndice A, que é utilizado para ilustrar a nomenclatura vigente.

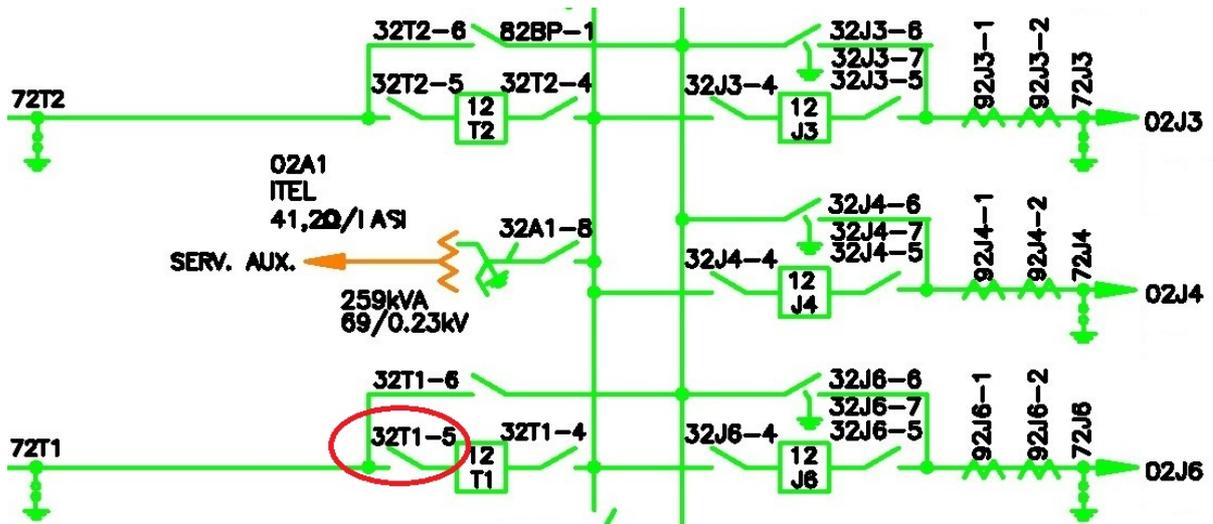


Figura 4. Trecho de um diagrama unifilar típico.

2.4.1 Codificação operacional dos equipamentos de uma instalação

Observando a Figura 4 anterior, nota-se que cada equipamento possui uma codificação própria e única, que o identifica de maneira clara e objetiva no diagrama. Essa codificação obedece a algumas regras, conforme exemplo abaixo.

O equipamento com o código 32T1-5, que está evidenciado pela elipse vermelha, apresenta a seguinte característica:

O primeiro dígito – 3 – indica o tipo de equipamento, que segundo Tabela 1 a seguir, verifica-se que o mesmo é uma chave seccionadora.

Tabela 1. Tabela de codificação do tipo de equipamento

Código	Equipamento
0	Linha de transmissão, Transformador ou Barramento
1	Disjuntor
2	Religador ou seccionizador
3	Chave seccionadora
7	Para-raios
8	Transformador de tensão (medidor de tensão)
9	Transformador de corrente (medidor de corrente)

O segundo dígito – 2 – indica o nível de tensão que o equipamento opera, de acordo com a Tabela 2 seguinte, no caso em tela 69 kV.

Tabela 2. Tabela de codificação da tensão de operação de equipamento

Código	Tensão de Operação
1	13,8 kV
2	69 kV
3	140 kV
4	230 kV
5	500 kV

O terceiro e quarto dígito indicam o circuito que o equipamento está associado, conforme Tabela 3 abaixo. A chave se refere neste exemplo em particular ao transformador T1.

Tabela 3. Tabela de codificação da função ou nome de equipamento

Código	Nome do equipamento	Sequência
A	Transformador de aterramento	A1 a A9
B	Barramento	B1 a B9
D	Equipamento de transferência	D1 a D9
E	Reator	E1 a E9
G	Gerador	G1 a G9
K	Compensador síncrono	K1 a K9
H	Banco de capacitor	H1 a H9
PO	Para-raios	PO-1 a PO-9
R	Regulador de tensão	R1 a R9
T	Transformador de força	T1 a T5
T	Transformador de força de serviço	T6 a T9
X	Conjunto de medição	X1 a X9
U	Transformador de potencial	U1 a U9
Z	Transformador de corrente	Z1 a Z9
W	Resistor de aterramento	W1 a W9

Por fim, o quinto dígito só é presente em chaves seccionadoras para indicar qual a finalidade da chave no circuito, no caso apresentado a chave é de saída de linha, conforme exibido na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4. Tabela de codificação da finalidade da chave seccionadora

Código	Finalidade
1	Chave de transferência de barramento
2	Chave de transferência de barramento
4	Chave de saída do barramento
5	Chave de saída de linha
6	Chave de bypass
7	Chave de aterramento

Outro item de fundamental importância para o entendimento do funcionamento de uma instalação é o painel de controle e comando. No painel tem-

se a representação do diagrama unifilar através de botões, chaves de manobra e medidores elétricos, ou seja, mediante o painel de comando o operador altera a configuração de funcionamento da subestação, ao fazer manobras usando os acionamentos do painel. Na Figura 5 abaixo, demonstra-se um painel real de uma instalação típica, com seus controles de comando.



Figura 5. Foto de um painel de comando de uma instalação típica do SEP.

2.4.2 Procedimentos de manobra

Depois de realizada a explanação sobre como a informação sobre os equipamentos é representada, se faz necessário descrever como é realizada uma manobra em uma instalação. Como descrito anteriormente, as manobras podem ser classificadas em programadas e não programadas. Dentre as programadas tem-se os RTM e os PGM, que através de um passo a passo, muitas vezes com o procedimento impresso e levado em prancheta, os operadores executam as manobras nos dispositivos presentes no painel de comando do sistema. Já as não programadas, podem executar total ou em parte todos os passos de um PGM, pois nesse tipo de manobra tem se um fator aleatório de um defeito na linha de transmissão ou equipamento, que o operador terá que contornar, em tempo real, para restabelecer o sistema no menor tempo possível.

Segundo estudo de caso observado por [13], onde foi realizado uma pré-seleção de um universo de 386 relatos de acidente na empresa Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) no período entre 1998 e 2005, donde foram extraídos 30 relatórios relacionados a erros e falhas operacionais. A pré-seleção do estudo baseou-se ainda nos seguintes critérios:

- i. Incidentes causados pelo erro humano;
- ii. Incidentes ocorridos na sala de comando ou no pátio de operação;
- iii. Incidentes ocorridos durante a realização de tarefas de controle ou supervisão;

A Figura 6 a seguir, retirada de [13], resume esse estudo realizado, observando que foi relacionado à quantidade de acidentes (eixo ordenadas) com vários atributos dos usuários (eixo das abcissas) que ocasionaram as falhas. Verificou-se que a maior taxa de falhas humanas na operação é dada, ainda conforme quadro demonstrativo da Figura 6, pela desatenção do operador na hora da execução de manobras e pelo descumprimento das normas seguido pelo excesso de autoconfiança na execução de suas tarefas.

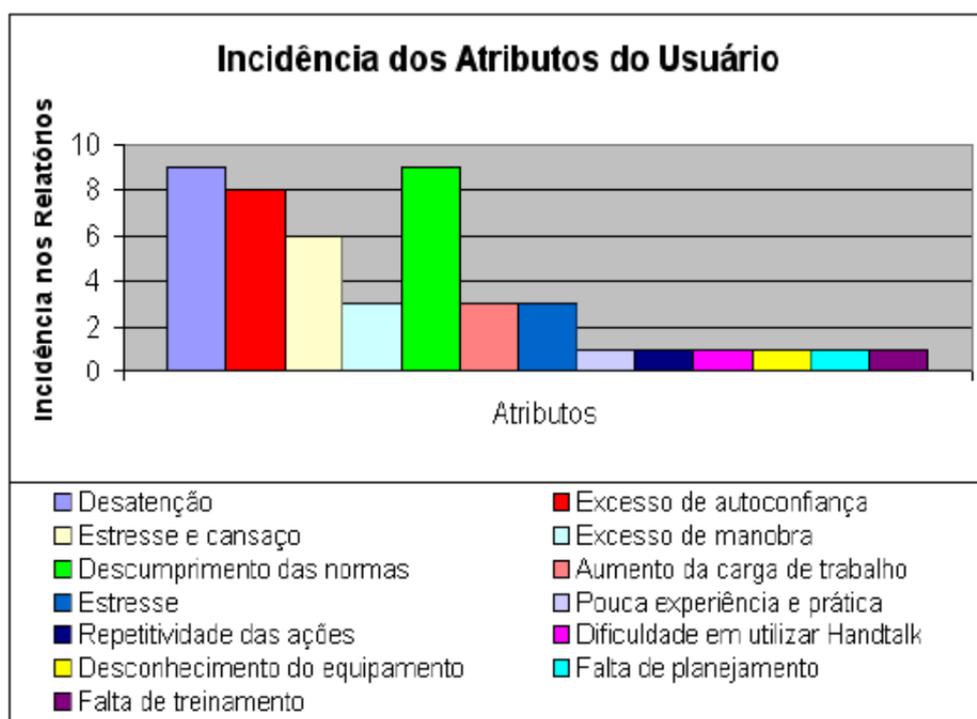


Figura 6. Gráfico comparativo entre as causas humanas de falhas operacionais, retirado de [13].

Ainda conforme o estudo [13], o mesmo aponta que o aspecto cognitivo (desatenção, estresse, cansaço) é um fator que apresenta forte relação com o erro durante a execução de tarefas (manobras). Sendo assim, a proposta do trabalho é justamente oferecer ao operador de instalação (OPI) um último aviso ou orientação antes da execução de uma manobra.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

O objetivo deste capítulo é analisar a proposta do trabalho, em relação ao que a academia vem desenvolvendo sobre o tema. Na pesquisa bibliográfica realizada, verifica-se que a maioria dos trabalhos encontrados é situada na área de interface homem máquina, no entanto, observa-se ainda um trabalho que trata especificamente de falhas em chaves seccionadoras.

Cada seção a seguir mostra de forma resumida propostas e estudos para reduzir as falhas humanas no ambiente de operação de sistema elétrico de potência (SEP). Após o resumo de cada trabalho é feita uma ponderação dos artigos analisados em relação ao trabalho proposto.

3.1 Motor de simulação baseado em modelos CPN aplicado a um sistema de treinamento de operadores

O trabalho proposto por [14] utiliza os recursos de *Colored Petri Net* (CPN) – do inglês, Rede de Petri Colorida – para modelar o comportamento dos equipamentos presentes em instalações do SEP. No trabalho foi proposto a criação de um motor de simulação, a partir de modelos formais, para integração em um simulador de realidade virtual da sala de controle e comando de uma instalação. Tal simulador provê treinamento dos operadores de instalação em situações semelhantes às encontradas na operação do SEP em tempo real.

O principal diferencial do trabalho é a modelagem da planta da instalação em conjunto com o modelo da interface dos painéis de controle e do sistema supervisorio utilizando CPN. Segundo o próprio autor [14], a notação matemática passível de verificação aliada à semântica simples e a notação gráfica presentes na Rede de Petri favorecem a verificação do comportamento do sistema, eliminando ambiguidades e erros de codificação.

Finalmente, ainda de acordo com o autor, foi possível viabilizar a construção do motor de simulação a partir de modelos de redes de petri, com possibilidade de verificação e validação dos modelos, integrando a comunicação entre os modelos dos painéis e de supervisor e o modelo da planta industrial (subestação).

3.2 O Contexto de trabalho, as IHMs e o erro humano na operação de sistemas elétricos

O artigo proposto por [13] sugere um processo que utiliza normas técnicas para a extração de informações sobre o contexto de trabalho de instalações do SEP. Ele tem como principal objetivo relacionar através do estudo da Interface Homem Máquina (IHM), a análise da relação do contexto de trabalho com a ocorrência do erro humano na operação do SEP.

O principal alicerce do trabalho é a aplicação da norma técnica ISO 9241 [26], precisamente na parte 11, que trata da identificação dos atributos do contexto relativos ao usuário, à tarefa, ao equipamento e ao ambiente do trabalho na operação de instalações. Aliado ao estudo da ISO 9241 o autor propõe também, a aplicação da norma técnica ISO 11064 [27] – que disserta especificamente do projeto de salas de controle e comando –, fechando assim uma análise completa a cerca do projeto da sala, bem como, do contexto de usabilidade como um todo.

O autor conclui que, após o estudo realizado, ficou constatado que o ambiente analisado não está em conformidade com as normas utilizadas como base para o estudo. Sugerindo ainda, a informatização de documentos utilizados como instrumentos na operação de instalações.

3.3 *Discovering vulnerabilities in control system human-machine interface software*

O artigo proposto por [10] faz uma análise, do ponto de vista da engenharia de software, de sistemas classificados com *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) – do inglês Controle Supervisório e Aquisição de Dados –, que são sistemas presentes em instalações do SEP. O trabalho tem como principal objetivo

avaliar um software SCADA, através dos princípios básicos da engenharia de software, tais como, segurança, interface com usuário entre outros.

O estudo de caso realizado por [10] é baseado na versão 4.5 do software *Fanuc's Proficy iFIX* da *General Electronics*. Tal estudo é baseado em dois pilares principais, o primeiro acerca da engenharia de software no fundamento da segurança de software; e o segundo realizado do ponto de vista educacional, pois as falhas encontradas no primeiro tópico serviram para elaboração de uma lista de práticas que devem ser evitadas no desenvolvimento de software.

Por fim, o autor conclui que é necessário que softwares baseados em SCADA tenham uma maior aproximação com os pilares da engenharia de software, sugerindo até a abordagem desses sistemas em currículos de cursos de engenharia de software e computação como um todo.

3.4 Abstractions for operator support in energy managements systems

O trabalho proposto por [6] faz uma análise das dificuldades encontradas pelos operadores de instalação (OPI) na operação em tempo real do SEP. O autor pondera que, mesmo com a presença de sistemas modernos de automação nas salas de comando e controle, tal sistema não é capaz de ajudar o operador na hora em que o mesmo mais precisa – em situações de ocorrências em tempo real – devido ao excesso de informação visual que é gerada pelo sistema.

A principal proposta do autor é desenvolver sistemas de apoio a operadores, utilizando o conceito de *abstracting mechanisms* [6]. Essa definição, de difícil tradução para o português, pode ser sintetizada como sistemas que simplifiquem a informação que precisa ser mostrada ao OPI. Sendo assim, o trabalho proposto tem como principal objetivo principal elaborar um sistema de apoio para operadores que na ocasião de ocorrências em tempo real, possa simplificar o número de alarmes visuais provenientes do sistema de automação, mantendo a precisão e o contexto da informação, para que o OPI consiga tomar decisões mais precisas para contornar o problema.

O autor concluiu que o projeto de interface com usuários de sistemas industriais, como salas de comando e controle do SEP, é tarefa árdua e requer a adoção de metodologia de design centrado no usuário [26]. Outro ponto de forte influencia no trabalho é a definição do quanto de informação pode ser minimizada para o OPI sem que haja perda de semântica do alarme disparado. Por fim, ressalta que após a geração de protótipos é necessário que haja uma validação com os operadores, para que se obtenha uma solução mais alinhada às necessidades dos usuários finais (operadores).

3.5 Sistema inteligente para a detecção de falhas de manobras em seccionadores de subestações de potência

O trabalho proposto por [5] visa elaborar um instrumento computacional capaz de determinar o comportamento de uma chave seccionadora, assim como supervisionar o seu funcionamento e detectar possíveis defeitos. Tal instrumento faz o uso de técnicas de processamento digital de sinais aliado a métodos de reconhecimento de padrões para classificar o padrão de funcionamento de uma chave seccionadora.

Na sua metodologia de trabalho, [5] utilizou dados adquiridos das curvas de torque dos motores que são utilizados para abrir\fechar chaves seccionadoras. A partir desses dados coletados, técnicas de redes neurais artificiais [28] são usadas para construir o classificador, que associa os padrões de torque do motor às tentativas de abertura\fechamento de chaves seccionadoras com sucesso ou não. Ainda segundo o autor [5], as informações fornecidas pelo sistema proposto permitem um aumento da eficiência das manutenções preditivas das chaves, baseada nas indicações de desajustes ou quebras dos componentes de uma seccionadora.

Por fim, o autor conclui que nos testes de validação do modelo proposto, surgiram erros de pequena ordem devido a mudanças nas curvas de validação do sistema. Finalizando que, apesar dos erros apresentados, o sistema foi validado e sugestões de trabalhos futuros para a melhoria do modelo são feitas.

3.6 Wireless multimedia sensor and actor networks for the next generation power grid

O trabalho proposto por [7] avalia a aplicação do modelo de *Wireless Multimedia Sensor and Actor Network* (WMSAN) [7] – do inglês, rede sem fio de sensores e agentes multimídia – no ambiente do SEP. Tal estudo sugere a aplicação desse modelo em toda cadeia do sistema elétrico, desde a geração (incluindo geração solar e eólica), transmissão, distribuição e até mesmo a inclusão dos consumidores finais, industriais, comerciais e residenciais. Nesse contexto, os autores definem o termo de *smart grid* – do inglês, rede inteligente –, resultante da interoperabilidade da cadeia.

No desenvolvimento de sua proposta, após a definição de campos de atuação para a WMSAN, os autores elencam vários desafios e requisitos que uma possível implementação desse tipo de rede deva atender. Dentre os requisitos mais significativos estão os relativos a qualidade de comunicação sem fio, exigência de funcionamento em tempo real, escalabilidade, baixo consumo de energia (vislumbrando a possibilidade de alimentação via baterias) e suporte a algoritmos de decisão, gerência eficiente de dados e por fim obedecer a rigorosos padrões de fabricação que uma eventual falha, não propague danos sérios ao SEP.

Por fim, de um lado, os autores listam as melhorias para o caso da adoção da WMSAN no sistema elétrico de potência; por outro lado, também evidenciam as dificuldades que são encontradas no desenvolvimento e implementação de sistemas baseados em WMSAN.

3.7 Considerações finais

Neste capítulo foram analisados vários trabalhos relacionados a mitigação de falhas na operação do SEP. Em cada trabalho observa-se grande contribuição para o tema.

Verificou-se ainda que os trabalhos realizados por [13], [10] e [6] estão situados na área de conhecimento de interface homem máquina (IHM), que estuda,

dentre outras matérias, técnicas para melhorar a representação da informação eletrônica para seres humanos, incluindo também conceitos de ergonomia [26]. No trabalho proposto por [10], tem-se a aplicação modelos formais, em CPN, com o intuito de oferecer um método de verificação para as ações realizadas pelo OPI em tempo real.

No trabalho proposto por [5] tem-se a aplicação de um sistema inteligente para detecção de falhas de manobras em seccionadoras motorizadas, tal ocorrência de falhas é resultante da constante automação do SEP. O trabalho é realiza um estudo sobre a influência da curva de torque do motor da seccionadora em falhas manobras.

Já o trabalho realizado por [7], propõe a utilização da WMSAN no contexto da operação do SEP. Em sua proposta, os autores ainda evidenciam vantagens e desafios que uma futura implementação dessa tecnologia venha desempenhar no futuro do SEP.

Neste trabalho são utilizados os conceitos delineados por [7] para implementar uma WMSAN no contexto da operação de instalações do SEP brasileiro. Em particular, irá ser desenvolvido um sistema baseado em hardware\software para realizar o monitoramento em tempo real das ações realizadas pelo OPI.

Capítulo 4

Do Sistema Proposto

Conforme mencionado no capítulo anterior, o presente trabalho utiliza os conceitos e diretrizes formulados por [7] para o desenvolvimento de uma WMSAN para o sistema elétrico de potencia (SEP). Neste capítulo é realizada uma abordagem do sistema, apresentando o diagrama geral do projeto proposto e ao decorrer das seções são apresentados os componentes do sistema isoladamente para facilitar o entendimento de toda a solução.

4.1 Visão Geral

Com o intuito de facilitar o entendimento do sistema proposto, foi elaborado um diagrama esquemático conforme Figura 7 abaixo.

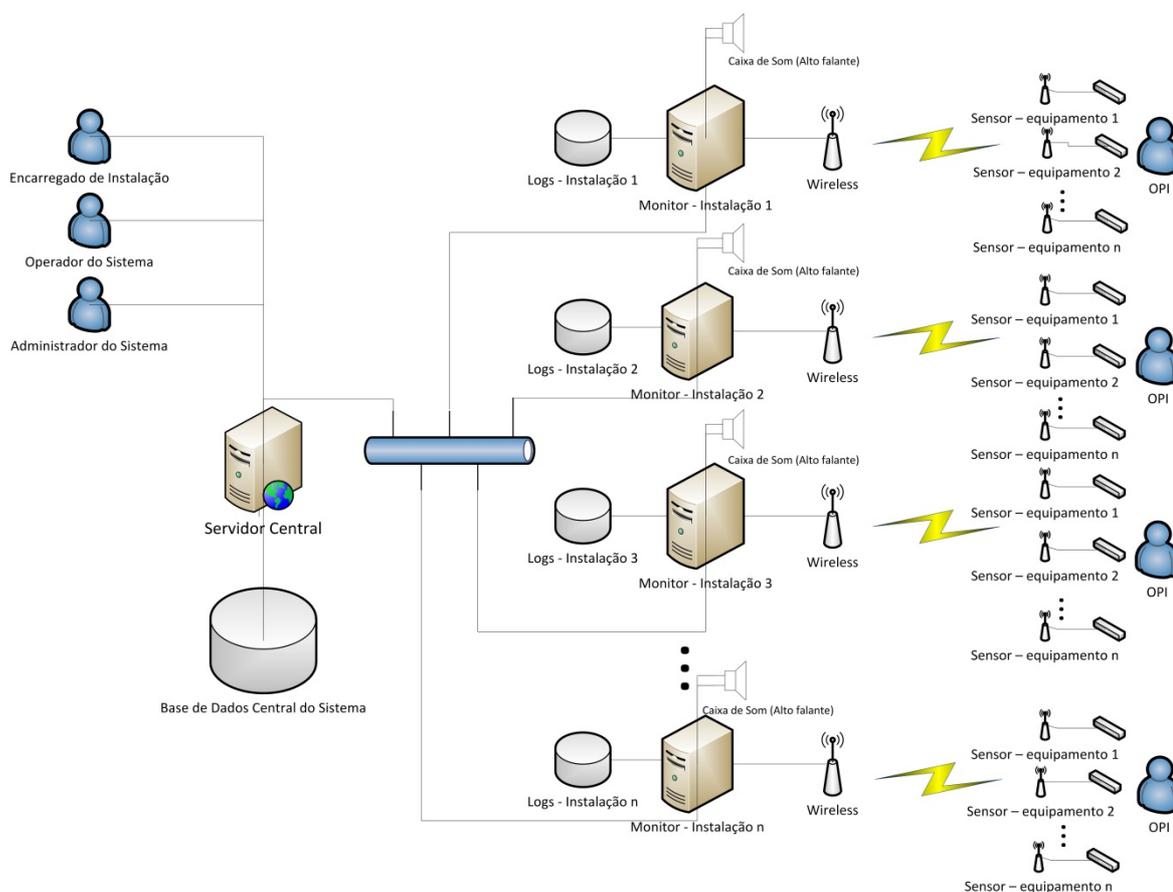


Figura 7. Diagrama geral do sistema computacional.

O sistema computacional proposto neste trabalho está em conformidade com as otimizações dos processos de negócio das instalações do SEP propostas em [16]. Tal sistema computacional não é o alvo de estudo desse trabalho. No entanto, servirá subsidiariamente para contextualizar a proposta dentro de um sistema computacional integrado, que envolve vários sistemas ligados a um servidor central.

A seguir, na Figura 8, tem-se um subdiagrama do diagrama geral anterior, que demonstra a estrutura do sistema de aquisição de dados proposto, representado em módulos para facilitar o entendimento.

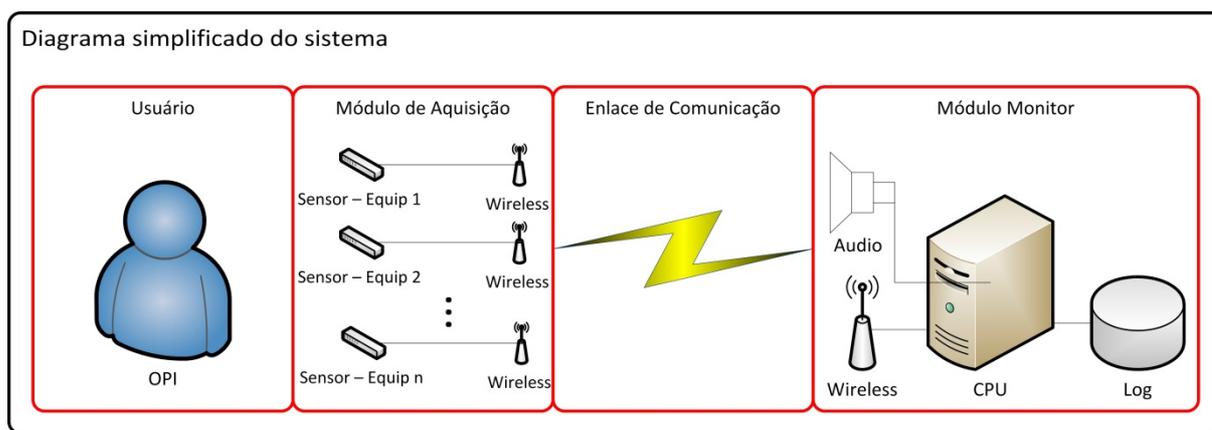


Figura 8. Diagrama do sistema proposto.

O sistema pode ser dividido em quatro partes principais, a saber: módulo monitor, enlace de comunicação, módulo de aquisição e usuário, ainda conforme a Figura 8 acima. Esta divisão é necessária para um melhor entendimento do sistema. Abaixo se tem uma breve descrição de cada uma das partes do diagrama, detalhadas nas próximas seções.

- i. Usuário – representado pelo operador de instalação (OPI), é o ator de interesse do sistema proposto;
- ii. Módulo de aquisição – representado pelo sistema embarcado, compreendido pelos submódulos sensor, microcontrolador e módulo de comunicação sem fio;
- iii. Enlace de comunicação – representado pela interação (elemento de comunicação) entre o módulo de aquisição e o módulo monitor;

- iv. Módulo monitor – compreendido por um CPU executando sistema operacional compatível com *Linux* ou *Microsoft Windows*, módulo Universal Serial Bus (USB) – do inglês, barramento universal serial – [29] de comunicação sem fio, caixas acústicas e o software residente de recepção de dados dos módulos de aquisição.

Para facilitar o entendimento da proposta, na seção 4.2 são demonstradas as funcionalidades do sistema sobre o ponto de vista do usuário, na seção 4.3 é descrito o enlace de comunicação do sistema, que trata da tecnologia empregada para a comunicação do módulo de aquisição com o monitor. Já na seção 4.4 é abordado o módulo de aquisição com todo o detalhamento do hardware empregado e na seção 4.5 é detalhada a aquisição dos dados pelo módulo monitor, bem como as funcionalidades do software de monitoramento dos módulos sensores. Por fim na seção 4.6 são mostrados os produtos de hardware e software e na seção 4.7 uma análise preliminar de desempenho do projeto.

4.2 Funcionalidades do sistema

O principal objetivo do sistema proposto é prover ao OPI um último aviso antes que ele execute uma manobra, ou seja, é despertar sua atenção sobre o que ele está prestes a fazer. Sendo assim, para cada chave no painel de controle da subestação há um dispositivo de hardware (módulo de aquisição) que identifica a proximidade da mão do operador numa distância de até 15 cm.

Quando o operador tenta manobrar uma chave seccionadora ou disjuntor, por exemplo, e a sua mão está no raio de alcance do sensor, o módulo de aquisição enviará uma sinalização ao módulo monitor, alertando que há uma provável tentativa de manobra no equipamento. Com isso, o monitor, ao receber a sinalização, irá disparar um aviso sonoro, através da execução de um arquivo MP3 previamente gravado no banco de dados do sistema, informando ao OPI – através de uma fraseologia padrão, a ser definida pela empresa – para que ele confirme se o equipamento a ser operado é o mesmo que consta no seu documento de manobras.

Ao receber a mensagem do módulo sensor, o monitor criará um *log* (registro) do evento recebido. Esse *log* é composto da data/hora do instante que o módulo de aquisição enviou a sinalização, acrescido da codificação do equipamento.

Ao passo que as manobras forem executadas, *logs* individuais de cada módulo de aquisição serão gerados, com isso, o monitor irá formatar um *log* único com todas as informações da instalação, acrescido do seu modo de funcionamento. Na próxima subseção, são apresentados os modos de funcionamento do sistema, para que possa ser delineado o contexto de uso do sistema.

4.2.1 Modos de funcionamento do sistema

O sistema possui três modos de funcionamento: modo alerta, modo otimizado e modo emergência. Cada modo tem suas particularidades de funcionamento, impactando na interação do sistema com o OPI. Para melhor ilustrar cada modo de funcionamento, é utilizado o diagrama unifilar fictício presente no apêndice A, bem como, um RTM válido para a mesma instalação fictícia. A seguir tem-se uma descrição de cada modo.

- i. *Modo alerta* – é caracterizado pela presença de avisos sonoros na execução de quaisquer comandos do painel de controle e comando da subestação. Considere que o OPI recebe do operador de sistema (OPS) um PGM ou RTM a ser cumprido, conforme trecho do modelo fictício da Tabela 5 a seguir, cujo modelo completo está descrito no apêndice B. Ao realizar uma manobra o OPI, será detectado pelo sensor do módulo de aquisição, que dará início a comunicação com o monitor, que por sua vez, dispara a mensagem de áudio relativa ao equipamento aproximado, não importando se ele faz parte de seu documento de manobras. No modo alerta não é necessário que o módulo monitor receba algum tipo de comunicação, do sistema computacional presente em [16] acerca do que o operador deve fazer, ou seja, não é informado ao módulo monitor qual o PGM ou RTM deve ser executado naquele momento. Sendo assim, no *log* de eventos gerado pelo monitor não constará o RTM ou PGM que o OPI executou.

Tabela 5. Tabela de contendo trecho de um RTM fictício.

Nº DE ORDEM	MANOBRAS	HORÁRIO EXECUÇÃO
1	LIBERAÇÃO:	
1.1	COAO – AUTORIZAR INST LIBERAÇÃO 14C1.	
1.2	INST – CONFIRMAR 14D1 ABERTO.	
1.3	INST – COLOCAR CHAVES CLT-14C1 E CLT-14D1 NA POSIÇÃO “ LOC ”.	
1.4	INST – FECHAR 34C1-6.	
1.5	INST – COLOCAR CHAVE 43-14C1 NA POSIÇÃO “ TRANSFERÊNCIA ”.	
1.6	INST – COLOCAR CHAVE 43-14D1 NA POSIÇÃO “ TRANSFERÊNCIA ”.	
1.7	INST – FECHAR 14D1.	
1.8	INST – ABRIR 14C1.	
1.9	INST – ABRIR 34C1-4 E 34C1-5.	
1.10	INST – ENTREGAR 14C1 ISOLADO AO RESPONSÁVEL.	
1.11	INST – COLOCAR CHAVE CLT-14D1 NA POSIÇÃO “ TEL ”.	
1.12	INST – INFORMAR COAO CONCLUSÃO LIBERAÇÃO 14C1.	

- i. *Modo otimizado* – nesta opção de funcionamento o sistema só irá alarmar caso o operador cometa algum possível desvio do RTM, ou seja, tomando como referência a Tabela 5 anterior, caso o OPI tenha executado os passos de 1.1 ao 1.7 corretamente e agora se dirija ao disjuntor 14C1, o alarme não soará indicando que o operador está correto em seu procedimento. Já no caso do OPI se desviar do RTM em questão, ou seja, se o mesmo ao invés de se aproximar do disjuntor 14C1 dirigir se ao 14C2 o alarme soará, pois o OPI está prestes a cometer uma falha operacional.
- ii. *Modo emergência* – É o modo de operação em que o sistema terá todos os alertas sonoros desligados pelo OPI, por tempo determinado pela configuração do módulo monitor. Essa opção é útil em casos de desligamento total da subestação, tendo em vista que numa ocorrência dessa magnitude a quantidade de dispositivos a serem manobrados é muito grande e o aviso sonoro, neste caso, prejudica mais do que auxilia. Note que neste caso o *log* de eventos é coletado sem haver

nenhuma interrupção durante o período de emergência. Assim, apenas os alarmes sonoros não serão executados.

4.3 Enlace de comunicação

Nesta seção, é apresentada o funcionamento da tecnologia de comunicação sem fios empregada no projeto: a tecnologia *Bluetooth*. Segundo [17], *Bluetooth* é um sistema de comunicação sem fios de curto alcance, planejado com o objetivo de substituir fios para conexão entre dispositivos eletrônicos portáteis ou fixos. As características-chaves da tecnologia de comunicação *Bluetooth* são: robustez de comunicação, baixo consumo de energia e baixo custo.

Em meados de 1994, a Ericsson iniciou o desenvolvimento da tecnologia, pesquisando uma forma de comunicação sem fio e de baixo custo entre o celular e seus acessórios. Tendo em vista o sucesso alcançado por essas pesquisas iniciais, ficou demonstrada a potencialidade dessa tecnologia de comunicação. Sendo assim, em 1998, cinco empresas: Ericsson, Intel, IBM, Toshiba e Nokia, realizaram um consórcio para utilizar essa forma de conexão em sua linha de produtos, formando então o chamado *Bluetooth Special Interest Group* (SIG) – do inglês, grupo de interesse especial. Atualmente, o SIG ultrapassa o número de 15.000 empresas consorciadas [18].

A tecnologia vem passando por várias especificações com o passar dos anos mostrando que a mesma está em constante evolução. Atualmente a tecnologia conta a especificação da versão 4.0. Nessa abordagem é utilizada especificação 2.0, tendo em vista, que os módulos de hardware utilizados implementam essa especificação.

4.3.1 Introdução

O núcleo de um sistema *Bluetooth* consiste de um transmissor de rádio frequência (RF), *Baseband* – camada intermediária do sistema *Bluetooth*, responsável pela interface entre RF – e uma pilha do protocolo. O sistema oferece serviços que permitem a interoperabilidade entre vários dispositivos, compatíveis com a tecnologia, fazendo troca de vários tipos dados.

A camada RF do *Bluetooth* opera na frequência aberta do tipo *Industrial Scientific and Medical* (ISM) – do inglês, Industrial Científica e Médica – a 2.4 GHz. O sistema de RF emprega uma técnica chamada de *frequency hop* para mitigar as interferências e o enfraquecimento do sinal, provendo vários portadores do tipo *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) – do inglês, Espalhamento Espectral por Saltos em Frequências. Na operação de RF utiliza uma modulação em frequência binária para minimizar a complexidade do transmissor. A taxa de transmissão básica do padrão é de 1 *Megabit* por segundo (Mbps) ou com o modo de taxa de transmissão aprimorada a taxa sobe para 2 Mbps ou 3 Mbps.

Durante a operação do sistema, um canal de rádio físico é compartilhado por um grupo de dispositivos que são sincronizados por um *clock* comum e um padrão de saltos de frequência. O dispositivo que provê esse a sincronização de referencia, *clock* comum, é denominado *master* – do inglês, mestre. Por outro lado, todos os outros dispositivos que são sincronizados através da referencia gerada pelo *master* são denominados *slaves* – do inglês, escravos. Esse grupo de dispositivos que são sincronizados nesse padrão é denominado *piconet*, na Figura 9 tem se três exemplos de *piconet*, essa é a forma de comunicação padrão do sistema *Bluetooth*.

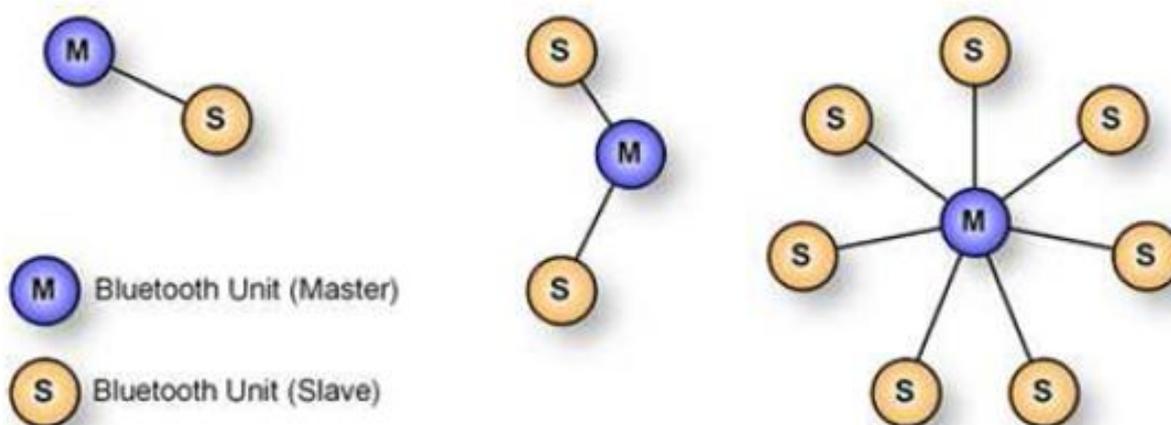


Figura 9. Exemplos de *piconet* [19].

Dispositivos em uma *piconet* utilizam um padrão de salto de frequência, que é determinado algoritmicamente pelo dispositivo *master*. O padrão básico de saltos é dado por uma ordenação pseudoaleatória de 79 frequências presentes na banda

ISM. O padrão de saltos é adaptado de tal forma, que exclua frequências que estão sendo utilizadas por dispositivos que operam na mesma banda, esta funcionalidade é extremamente útil quando o dispositivo *Bluetooth* opera em ambientes que outras tecnologias, como exemplo, a dispositivos baseados no padrão IEEE 802.11.

O canal físico é subdividido em unidades de tempo denominadas de *slots*. Os dados são transferidos entre os dispositivos *Bluetooth* em pacotes, utilizando os *slots*. O salto em frequências ocorre entre a transmissão e a recepção dos pacotes. A tecnologia *Bluetooth* possui uma comunicação do tipo *full duplex* realizada através da utilização de *Time Division Duplex (TDD)* – do inglês, *duplexação em divisão de tempo*–.

4.3.2 Arquitetura do *Bluetooth*

A especificação *Bluetooth* divide a pilha de protocolos em três grupos distintos. Tal divisão facilita o entendimento da tecnologia, os grupos podem ser classificados como protocolos de transporte, protocolos de middleware e aplicação, como ilustrado na Figura 10 a seguir.

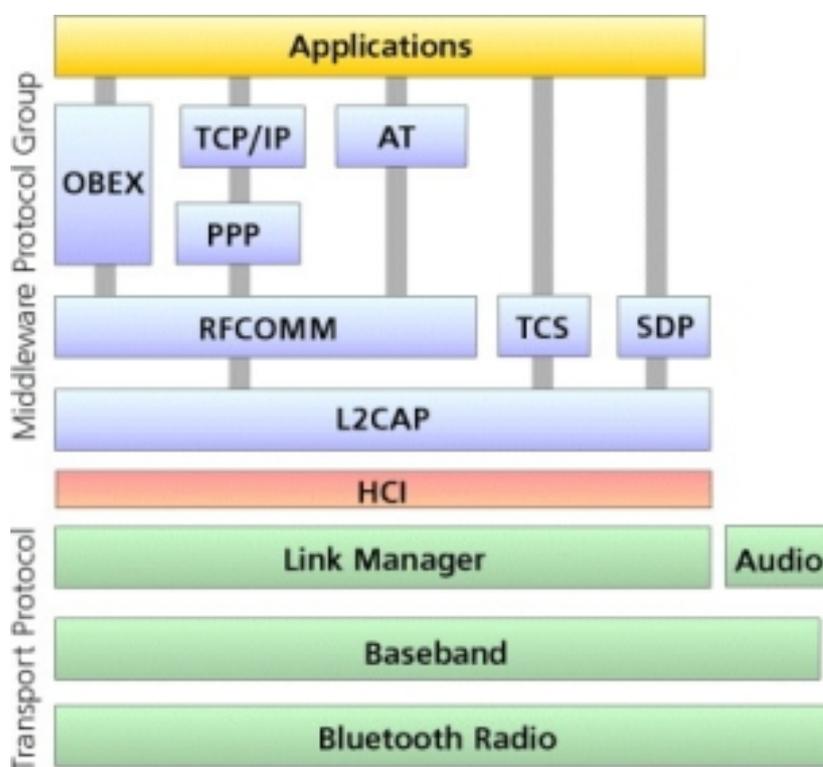


Figura 10. Estrutura da pilha de protocolo *Bluetooth*.

O grupo de protocolos de transporte permite que dispositivos *Bluetooth* possam localizar outros dispositivos e gerenciar links físicos e lógicos para as camadas superiores. As camadas de rádio frequência (RF), *Baseband*, *Link Manager*, estão inseridas no grupo de protocolos de transporte. Estes protocolos suportam tanto comunicação síncrona quanto assíncrona e todos estes são indispensáveis para a comunicação entre dispositivos *Bluetooth*.

O grupo de protocolos de *middleware* inclui o *Logical Link Control and Adaptation* (L2CAP) que é responsável pela interface entre a camada de transporte e a camada de aplicação e dos próprios protocolos de *middleware* que são protocolos de terceiros e de padrões industriais. Estes protocolos permitem que aplicações já existentes e novas aplicações operem sobre links *Bluetooth*.

Protocolos de padrões industriais incluem *Point-to-Point Protocol* (PPP), *Internet Protocol* (IP), *Transmission Control Protocol* (TCP), *Wireless Application Protocol* (WAP). Outros protocolos desenvolvidos pelo próprio SIG também foram incluídos como o *Radio Frequency Communication* (RFCOMM), que permite aplicações com o padrão *Recommended Standard 232* (RS-232) operem sobre os protocolos de transporte *Bluetooth*, que é extremamente útil para o projeto e o *Service Discovery Protocol* (SDP) que permite dispositivos obterem informações sobre serviços disponíveis de outros dispositivos.

O grupo de aplicação consiste das próprias aplicações que utilizam links *Bluetooth*. Estas podem incluir aplicações legadas ou aplicações orientadas a *Bluetooth*. Pode-se resumir as características das camadas da pilha de protocolos como:

- i. Camada de Rádio: a especificação da camada de rádio corresponde essencialmente à transmissão *Bluetooth* vista na subseção anterior;
- ii. Camada *Baseband*: este nível define como dispositivos *Bluetooth* localizam e se conectam a outros dispositivos. Os papéis de mestre e escravo são definidos nesta camada, assim como os padrões de saltos de frequência utilizados pelos dispositivos. É neste nível também onde se definem os tipos de pacotes, procedimentos de processamento de pacotes, estratégias de detecção de erros, criptografia, transmissão e retransmissão de pacotes. Esta camada suporta dois tipos de links:

Synchronous Connection Oriented (SCO) e *Asynchronous Connection Less (ACL)*. Um dispositivo que estabeleceu um link SCO possui, em essência, determinados *slots* de tempo reservados para seu uso. Seus pacotes são tratados como prioritários e são processados antes de pacotes ACL. Já um dispositivo que opera sobre um *link* ACL pode enviar pacotes de tamanho variável, no entanto, este tipo de *link* não possui reserva de slots de tempo para seus pacotes;

- iii. *Link Manager*: esta camada implementa o *Link Manager Protocol (LMP)*, que gerencia as propriedades do meio de transmissão entre os dispositivos. O protocolo LMP também gerencia a alocação de taxa de transferência de dados, autenticação, segurança de dados, criptografia de dados e controle do gasto de energia;
- iv. Camada L2CAP: a camada L2CAP serve de interface entre os protocolos de camadas superiores e os protocolos de transporte de camadas inferiores. Esta camada também é responsável pela fragmentação e remontagem de pacotes.

Uma vez realizada a explicação da estrutura da pilha de protocolos *Bluetooth*, cabe agora entender como se dá o processo de conexão entre os dispositivos numa *piconet*, tal conhecimento facilitará a compreensão da interação entre o módulo sensor e o módulo monitor.

4.3.3 Processo de conexão

Os dispositivos *Bluetooth* seguem uma sequência de estados para se conectar a uma *piconet*, a saber: *standby* – do inglês, espera –, *inquiry* – do inglês, solicitação –, *page* – do inglês, página –, *connected* – do inglês, conectado –, *transmit* – do inglês, transmissão –, *sniff* – do inglês, escuta –, *hold* – do inglês, bloqueado – ou *park* – do inglês, estacionado –. A seguir, na Figura 11 abaixo, segue um gráfico mostrando todos os estados possíveis de um dispositivo *Bluetooth*, assim como a sequência de mudanças de estados, detalhadas a seguir.

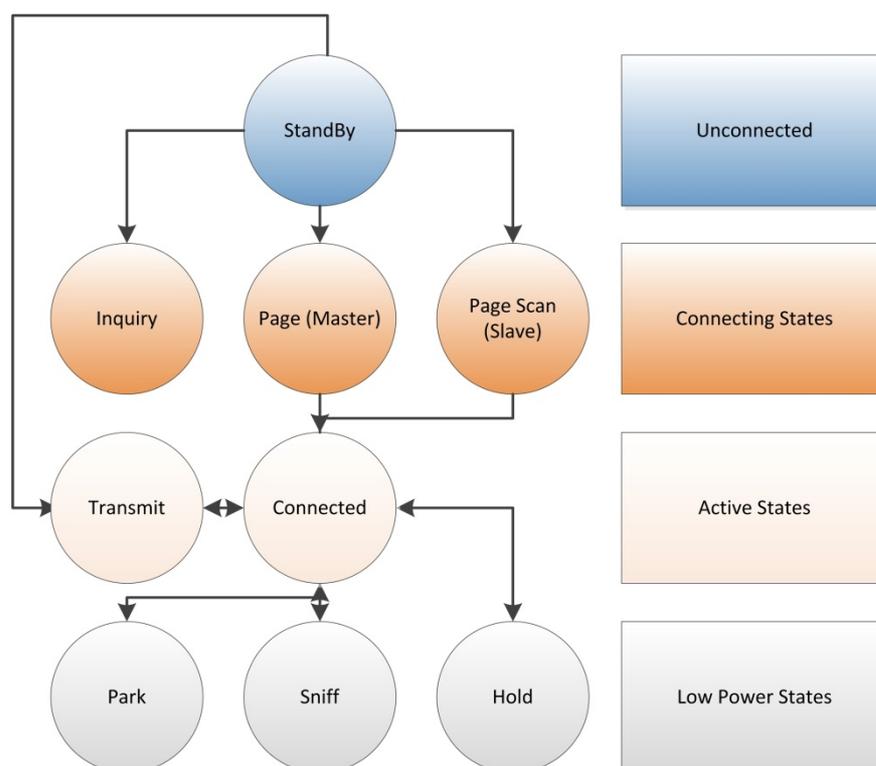


Figura 11. Estrutura dos estados do *Bluetooth*.

Assim que um dispositivo é ligado seu estado inicial está no modo *standby*, nesse estado o dispositivo não está conectado a nenhuma *piconet*. O estado *inquiry* é atingido quando o dispositivo envia requisições para encontrar outros dispositivos com os quais ele pode comunicar-se. Caso dispositivos estejam dentro do seu raio de alcance, com o estado de *inquiry scan* (do inglês, verificação de solicitações) ativado, cada um responde à solicitação com seu endereço.

Após verificar os dispositivos próximos, no estado de *page*, o mestre gera uma sequência de saltos baseada no endereço e *clock* estimado do dispositivo remoto a se conectar, sendo possível assim enviar mensagens de requisição de conexão aos dispositivos candidatos para juntar-se à sua *piconet*. Os dispositivos remotos entram periodicamente no estado de verificação de página de forma a receber as requisições de conexão. Ao recebê-las, respondem ao *master* com um pacote de resposta de página, que envia de volta uma *Frequency Hopping Synchronization* (FHS) – do inglês, sincronização de saltos de frequência – incluindo o endereço *Bluetooth* e *clock* do mestre. O dispositivo remoto envia então um aviso de *acknowledge* (ACK) – do inglês, reconhecimento – e o *master*, ao recebê-lo, gera

uma nova sequência de saltos de frequência baseada em seu próprio endereço e clock. O *slave* por fim utiliza o endereço e clock do *master* para recriar uma sequência de saltos idêntica. Nesse momento os dispositivos estão conectados e sincronizados e podem começar a comunicar-se através de consultas periódicas do *master*. A Figura 12 mostra a sequência dos estados possíveis durante o processo de solicitação e conexão explicados anteriormente.

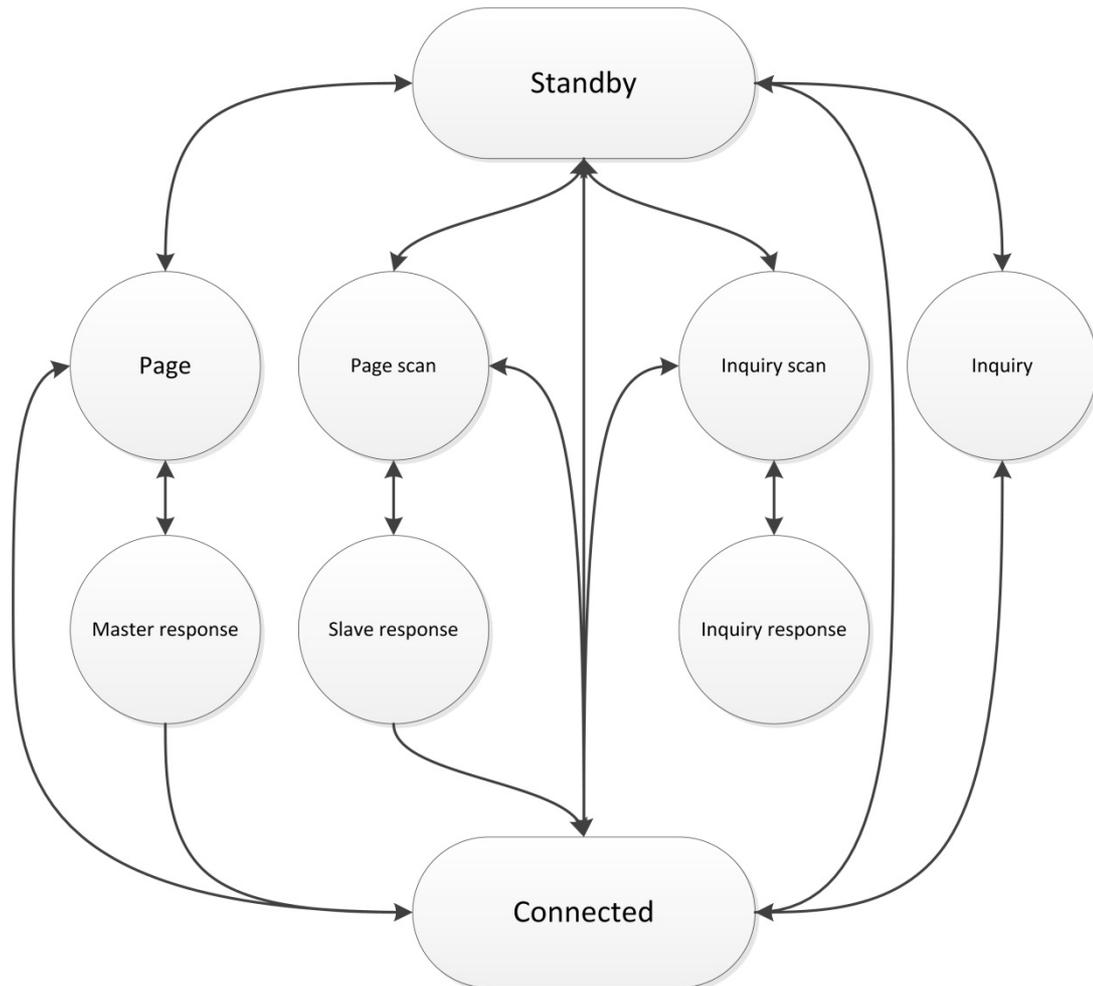


Figura 12. Diagrama de estados do processo de conexão dos dispositivos *Bluetooth*.

Quando ocorre uma conexão bem sucedida entre o *master* e um novo dispositivo – que automaticamente é *slave* –, entrando no estado *connected* e recebendo um endereço ativo que o identifica na *piconet*. Em seguida, escuta o slot de transmissão do *master* em busca de pacotes com seu endereço. Caso não existam pacotes com seu endereço, o mesmo fica inativo até a próxima escuta. O dispositivo *master* fica consultando os dispositivos *slave* regularmente. Enquanto

está conectado, o *slave* está apto a transmitir dados quando o *master* o solicitar, ou seja, quando verificar um pacote com seu endereço, passando assim ao estado de *transmit*. Ao final da transmissão, ele volta ao estado *connected*.

O estado *sniff* é um estado de baixo consumo de energia no qual o dispositivo fica inativo durante um número pré-determinado de slots de tempo, concordado entre o *master* e o *slave*. O dispositivo então volta a atividade no slot de tempo definido para a transmissão de dados e volta ao estado inativo até que o próximo slot designado chegue. O estado *hold* é outro estado de baixo consumo no qual o dispositivo fica inativo por um determinado período, sem transmitir dados. Após esse período o dispositivo *Bluetooth* reinicia as transferências instantaneamente.

Quando um dispositivo *slave* não possui dados para enviar ou receber, o *master* deve instruí-lo a entrar no estado *park*. Enquanto está neste estado, o *slave* renuncia a seu endereço, que poderá ser entregue a outro dispositivo reativado a partir do estado *park* ou a um novo dispositivo descoberto.

Uma vez assimilado como se dá o processo de conexão entre dispositivos *Bluetooth*, o trabalho prossegue, na próxima seção, com a definição do funcionamento do módulo sensor.

4.4 Módulo de Aquisição

Nesta seção são apresentados a arquitetura e os detalhes de funcionamento do módulo de aquisição. Tal módulo é responsável pela interface entre o operador de instalação (OPI) e o sistema embarcado, nesse sentido então este módulo é um ponto chave no sistema como um todo, pois a partir da detecção do OPI é que é desencadeado um conjunto de ações para evitar as falhas de manobras nas instalações do SEP.

A Figura 13 a seguir, tem-se um diagrama em blocos dos circuitos que integram o módulo de aquisição. Com o intuito de facilitar o entendimento, nas próximas subseções são descritos cada bloco independentemente e no final é realizado uma ponderação a respeito do funcionamento geral do sistema de hardware.

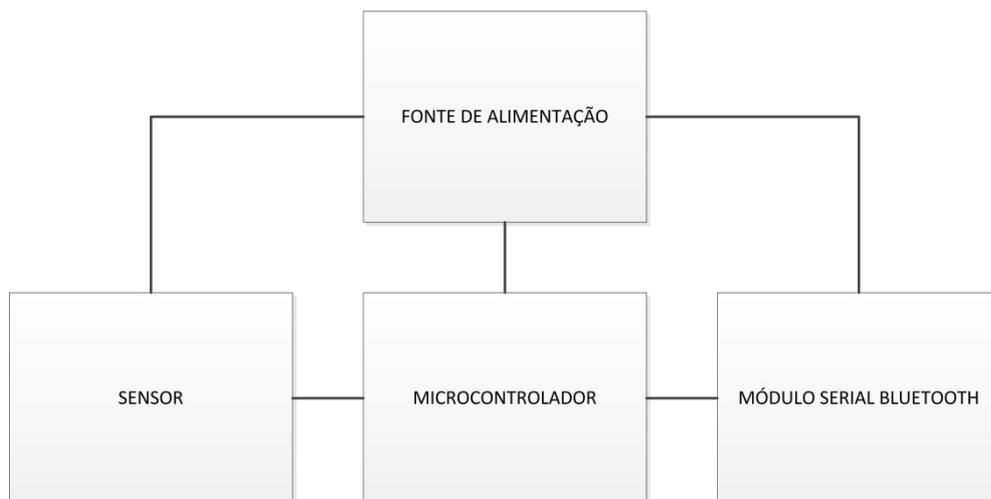


Figura 13. Diagrama em blocos do módulo de aquisição.

Como visto na Figura 13 acima, o sistema é composto de quatro blocos principais: fonte de alimentação, sensor, microcontrolador e módulo serial *Bluetooth*. A seguir tem-se uma breve descrição de cada bloco:

- i. *Fonte de alimentação* – responsável pela alimentação de todo o sistema de hardware;
- ii. *Sensor* – encarregado de realizar a detecção de proximidade do OPI a uma chave de manobra;
- iii. *Microcontrolador* – responsável pela leitura do sensor, validação do dado lido pelo sensor e envio dos dados lidos através de uma conexão entre o módulo serial *Bluetooth* e a aplicação residente no módulo monitor;
- iv. *Módulo serial Bluetooth* – módulo responsável em interpretar os comandos provenientes do microcontrolador, e fazer a ponte de comunicação entre o microcontrolador e a aplicação residente no módulo monitor.

4.4.1 Fonte de alimentação

Para a alimentação do sistema é utilizado um conversor DC/DC, na tensão de 115V para 5V, tendo em vista que nos painéis das salas de comando das instalações do SEP há um barramento de tensão DC responsável pela alimentação dos sistemas de proteção da subestação. No entanto como o microcontrolador

utilizado, bem como, modulo *Bluetooth* são alimentados com uma tensão de 3,3V, é necessário utilizar um regulador de tensão, o LM1117 [20] para efetuar essa operação. Na Figura 14 abaixo, tem-se o esquema elétrico utilizado no projeto. Vale salientar ainda que, nesse caso, foi utilizado o circuito recomendado pelo fabricante do semiconductor em seu *datasheet* acrescido de um circuito contra inversão de polaridade na entrada da fonte através do diodo D1 e o resistor R2.

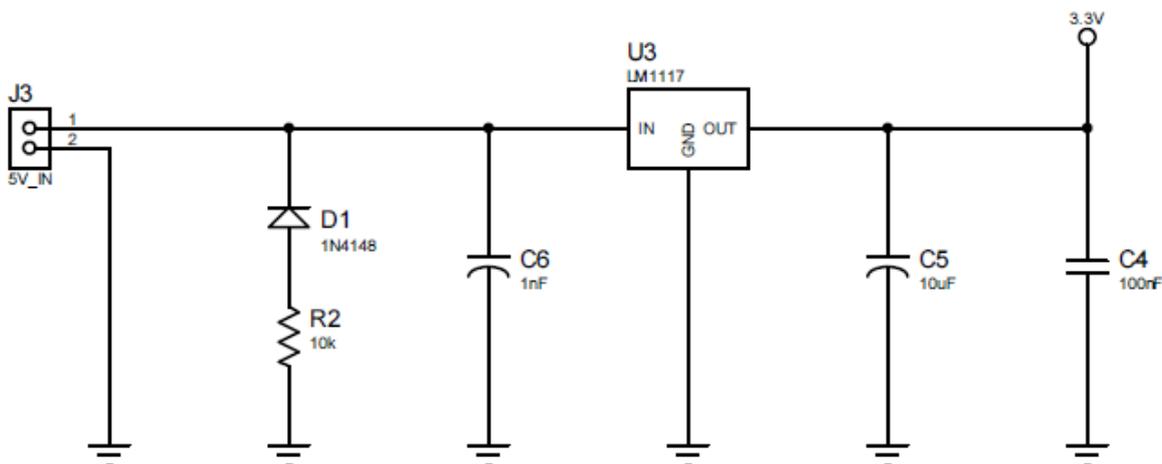


Figura 14. Esquema elétrico do regulador de tensão utilizado no projeto.

4.4.2 Sensor

Para a detecção do operador foi desenvolvido um sensor de proximidade utilizando um diodo emissor de luz (*led*) infravermelho (IR), em conjunto com receptor sintonizado na frequência de 38 kHz, o TSOP 34838 [21]. O receptor, comumente encontrado em aparelhos domésticos que utilizam controle remoto infravermelho, funciona através da recepção de um sinal de 833 Hz modulado numa portadora de 38 kHz.

O circuito completo sensor de IR pode ser visto na Figura 15 a seguir. Novamente, foram utilizados os diagramas recomendados pelo *datasheet* do módulo receptor. O circuito de emissão possui um *led* emissor de IR excitado por um transistor. Na base desse semiconductor liga-se, em série, um potenciômetro (RV1) que faz o ajuste do alcance do raio de detecção do OPI. Detalhes de funcionamento do sensor e do emissor de IR são vistos na subseção da simulação do modulo sensor.

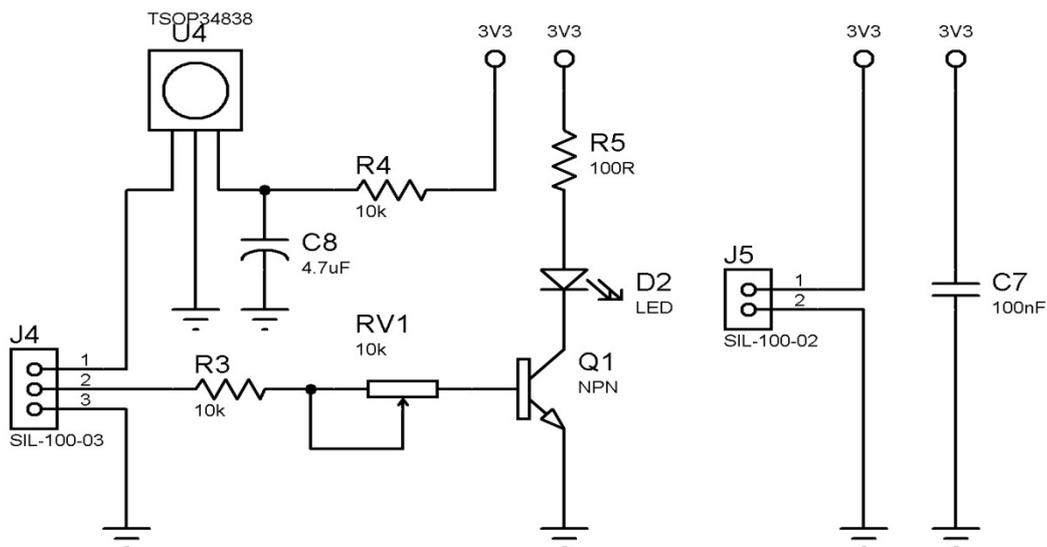


Figura 15. Esquema elétrico do sensor utilizado no projeto.

4.4.3 Módulo de comunicação serial *Bluetooth*

O módulo de comunicação serial *Bluetooth* é peça chave no enlace de comunicação entre o microcontrolador e o módulo monitor. Neste bloco foram utilizados três módulos *Bluetooth* diferentes [22], [23], [24] com o intuito de avaliar o desempenho de cada um individualmente. Nesta subseção os módulos *Bluetooth* são tratados de forma genérica, ou seja, os módulos são representados por seu circuito elétrico e as diferenças de desempenho e funcionalidades são vistas na seção 4.7, é apresentado uma tabela comparativa do desempenho de cada módulo individualmente. Na Figura 16 a seguir, segue o esquema elétrico básico para o módulo de comunicação *Bluetooth* serial.

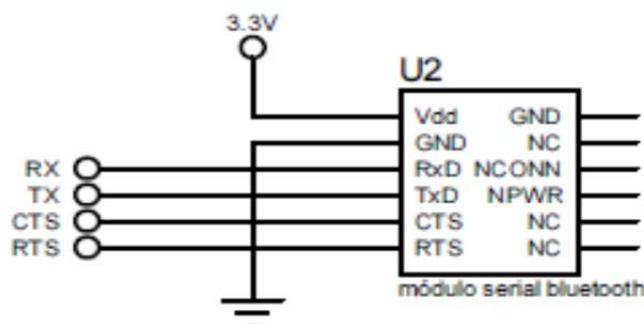


Figura 16. Esquema elétrico do módulo *Bluetooth*.

Os módulos *Bluetooth* utilizados possuem a mesma dinâmica de conexão descrita na seção anterior. No entanto, vale ressaltar que esses dispositivos possuem um controlador do protocolo *Bluetooth* aliado a um interpretador de comandos acessível através de envio/recepção de mensagens via canal de comunicação compatível com níveis de tensão *Transistor Transistor Logic* (TTL) – do inglês, lógica transistor transistor – e padrão de sinalização *Universal Asynchronous Receiver and Transmitter* (UART) – do inglês, transmissor e receptor assíncrono universal – de 8 bits.

Essencialmente, são utilizadas funcionalidades dos módulos *Bluetooth* que atendam aos estados previstos na máquina de estados vista na seção anterior.

4.4.4 Microcontrolador

O microcontrolador é responsável pelo controle do fluxo de dados do módulo de aquisição. Como visto anteriormente, tanto o sensor utilizado quanto o módulo serial *Bluetooth* necessitam de um elemento de controle que possa gerar os sinais necessários ao funcionamento geral da solução de hardware proposta.

O microcontrolador utilizado no projeto, o AT89S2051 [25], é compatível com a arquitetura da conhecida família 8051, lançada pela Intel em 1977 e fabricado pela Atmel Corporation. Os detalhes da arquitetura do controlador não são objeto de estudo deste trabalho, tendo em vista que o microcontrolador no contexto do sistema proposto é um elemento dentro de uma cadeia de maior complexidade. Resumidamente, o AT89S2051 [25] possui as seguintes características:

- Núcleo de processamento de 8 bits;
- 2 temporizadores de 16 bits;
- 15 pinos de entrada e saída digitais;
- Porta serial atendendo ao padrão UART;
- 256 bytes de memória *Random Access Memory* (RAM) – do inglês, memória de acesso aleatório –;
- 2K bytes de memória de programa;

- Modo de aceleração de hardware, habilitado por software através de um bit, que dobra a frequência de execução do sistema.

Este último recurso é de extrema importância para a geração da sinalização da frequência de 38 kHz necessária para o funcionamento do receptor, bem como, para a recepção do sinal de 833 Hz gerados pela portadora citada anteriormente. Na Figura 17 é apresentado o diagrama esquemático do microcontrolador utilizado no projeto de hardware.

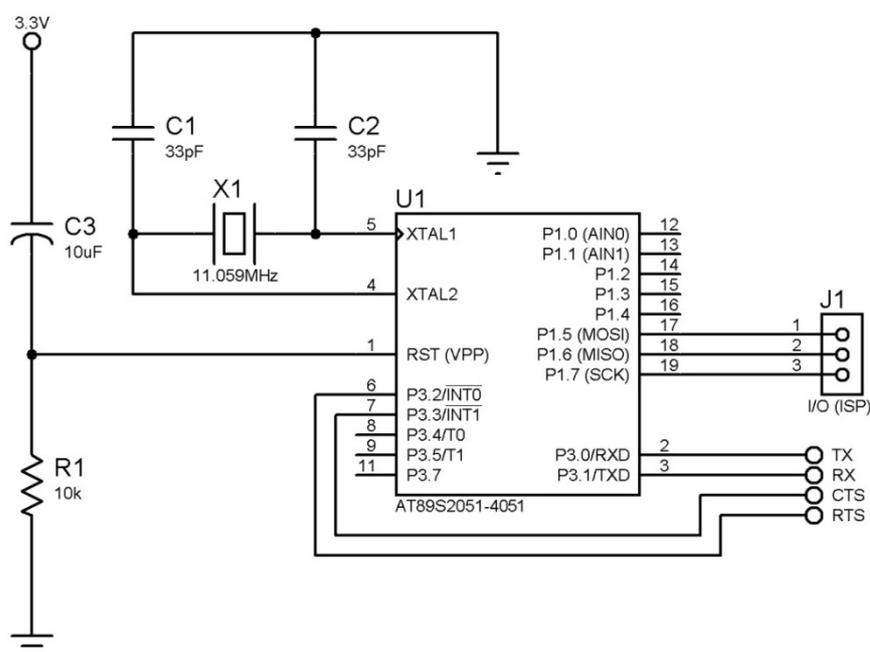


Figura 17. Esquema elétrico do microcontrolador utilizado no projeto.

O esquema elétrico do microcontrolador é composto pelo circuito de *reset*, que é responsável essencialmente por garantir ao circuito estabilidade na inicialização do sistema e circuito de *clock* – implementado através de cristal de quartzo – responsável em gerar os pulsos de sincronismo necessário para o pleno funcionamento do sistema. Para obter uma melhor modularização do sistema, foi posicionado o conector J1 que é utilizado para realizar a interface mecânica entre o microcontrolador e o sensor utilizado no projeto, foram definidos também os quatro pinos referentes à sinalização envolvida na comunicação serial entre o microcontrolador e o módulo *Bluetooth*.

4.4.5 Simulação da execução do módulo de aquisição

Nesta subseção apresenta-se um passo a passo da execução do programa residente no microcontrolador. Este acompanhamento é útil para um melhor entendimento da interação entre os blocos de hardware descritos nas subseções anteriores. Para facilitar o entendimento foi feito um fluxograma contendo os passos da execução do módulo de aquisição, conforme Figura 18.

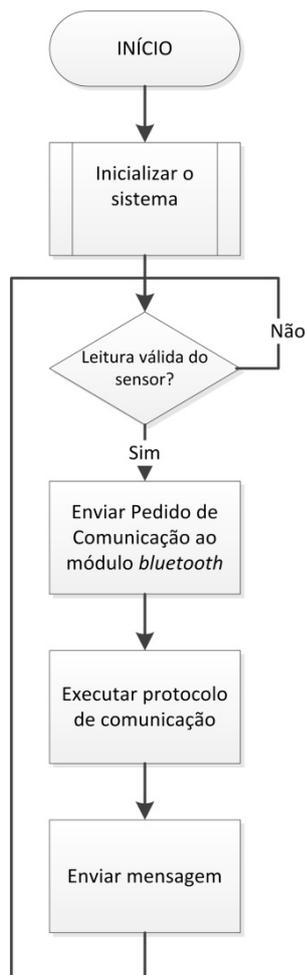


Figura 18. Fluxograma de funcionamento do módulo de aquisição.

Segue abaixo a sequência de funcionamento do sistema:

- i. *Inicializar o sistema* – neste ponto o microcontrolador irá executar a rotina de inicialização do sistema, ajustando os temporizadores para geração dos pulsos de 38kHz necessários ao funcionamento do sensor de proximidade, bem como, da frequência necessária a sinalização da porta serial e, por fim, realizar a configuração o módulo *Bluetooth* o

endereço de *Media Access Control* (MAC) – do inglês, Controle de Acesso à Mídia – para conexão módulo *Bluetooth* USB presente no módulo monitor;

- ii. *Leitura válida do sensor* – nesta fase o microcontrolador irá verificar se a rotina de geração e de leitura do sensor de proximidade gerou um evento válido, ou seja, se há realmente a proximidade de um obstáculo dentro do raio de cobertura do sensor, caso tenha efetuado uma leitura válida o fluxo segue para o próximo passo, caso contrário o programa fica “preso” aguardando um acionamento válido;
- iii. *Enviar pedido de comunicação* – após ter validado o dado proveniente do sensor, o microcontrolador irá solicitar conexão, através do módulo de comunicação *Bluetooth*, com o serviço publicado pelo módulo monitor;
- iv. *Executar protocolo de comunicação* – com o intuito de evitar falsos acionamentos, foi desenvolvido um protocolo com o intuito que apenas módulos de aquisição projetados conectem-se a aplicação. Sendo assim, nesta fase o microcontrolador envia o protocolo de comunicação para que seja autenticado no sistema de aquisição do módulo monitor;
- v. *Enviar mensagem* – É neste ponto que efetivamente o microcontrolador envia a mensagem útil para a aplicação do módulo monitor.

4.5 Módulo monitor

Nesta seção são debatidos a arquitetura e o modo de funcionamento do módulo monitor. Este módulo é encarregado em cadastrar os módulos sensores e, em seguida monitorá-los em tempo real, gerar o log de eventos a cada tentativa de manobra e executar os alarmes sonoros de acordo com o modo de funcionamento escolhido do sistema. Na Figura 19 a seguir, segue um diagrama em blocos contendo os itens que compõem o módulo monitor.



Figura 19. Diagrama em blocos do módulo monitor.

Como visto na Figura 19 acima, o módulo monitor é composto de três submódulos: caixas acústicas amplificadas, a *Central Process Unit* (CPU) – do inglês, unidade de processamento central – e módulo USB *Bluetooth*. A descrição sucinta da funcionalidade de cada submódulo vem a seguir:

- i. *Caixas acústicas amplificadas* – responsável pela amplificação dos sinais sonoros enviados pela CPU na execução de mensagens de alerta do sistema;
- ii. *CPU* – encarregado de executar o programa residente de aquisição de dados via *Bluetooth*, cadastro dos módulos e, geração de *log* de eventos, este módulo é alvo de estudo detalhado na próxima subseção;
- iii. *Módulo usb Bluetooth* – este módulo é a ponte de comunicação entre o módulo monitor e o módulo sensor, para a aplicação residente na cpu este módulo atuará de forma transparente, tendo em vista, que o próprio sistema operacional em conjunto com a biblioteca de comunicação *Bluetooth* cuidará dos comandos de comunicação;

4.5.1 CPU

Nesta subseção é descrita a arquitetura de software do sistema proposto. A CPU é representada por dois softwares principais: o sistema operacional e o sistema residente, esta representação se faz necessária para que não haja nenhum tipo de ambiguidade no entendimento do sistema proposto. A Figura 20 abaixo tem a representação da hierarquia de software utilizada.

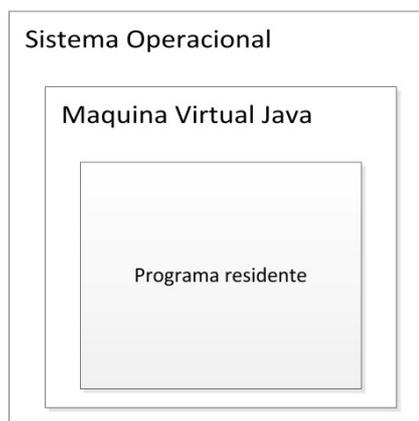


Figura 20. Diagrama das camadas de software do módulo monitor.

Observando a Figura 20 acima, verifica-se que a aplicação desenvolvida (programa residente) é executada em um sistema operacional compatível com a linguagem de programação Java [30], ou seja, para execução do programa residente o sistema operacional deve ter instalado a máquina virtual Java [30].

Foi utilizada a linguagem Java, tendo em vista a vasta documentação presente na rede mundial de computadores e devido à disponibilidade também de *Application Programming Interface (API)* – do inglês, interface de programação de aplicativos – para as duas principais tecnologias utilizadas a comunicação *Bluetooth* e a execução de arquivos mp3.

4.5.2 Programa residente

Nesta subseção é explorado somente o funcionamento do programa residente, sendo fora do escopo detalhes a respeito do sistema operacional utilizado, bem como, detalhes de funcionamento da linguagem de programação Java.

Uma vez descrito toda a hierarquia de software necessário ao funcionamento do sistema. Cabe agora detalhar o funcionamento do programa residente que é efetivamente, o programa que disponibilizara as funcionalidades ao sistema proposto. A Figura 21 abaixo, tem um diagrama em blocos das principais funções do sistema de software proposto.

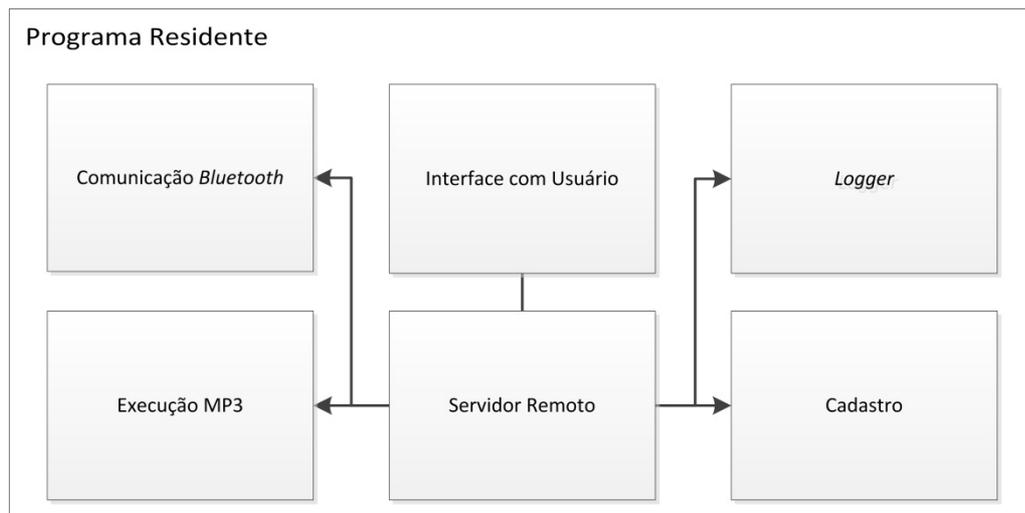


Figura 21. Diagrama em blocos das funcionalidades presentes no programa residente.

A seguir tem-se uma breve descrição da funcionalidade prevista em cada bloco do sistema:

- i. *Interface com usuário* – parte do programa responsável em apresentar aos usuários as funcionalidades do programa de cadastro de dispositivos sensores, atualização desse cadastro e acesso ao comando de teste link.
- ii. *Servidor remoto* – responsável pela comunicação entre os blocos principais do sistema, o servidor remoto é a entidade do programa que fica esperando a todo o tempo conexões provenientes dos módulos sensores.
- iii. *Comunicação Bluetooth* – realizada através de API para a linguagem Java, a saber: *Bluecove*. Que simplifica o uso da tecnologia *Bluetooth* para a linguagem de programação, fornecendo rotinas prontas para uso das funcionalidades chave da pilha de protocolos Bluetooth vista anteriormente.
- iv. *Execução MP3* – também realizada a partir de uma API que trata da manipulação de arquivos de áudio MP3, através da API *JLayer* o programa residente executa a MP3 referente a mensagem de áudio do equipamento que foi acionado.

- v. *Logger* – o *log* de eventos é gerado após cada acionamento com sucesso do módulo sensor ao módulo monitor. Em cada *log* é vinculado à data e hora do sistema do evento, bem como, a nomenclatura do equipamento que o módulo sensor monitora.
- vi. *Cadastro* – o cadastro é o bloco responsável em manter uma base de dados relacionando o endereço MAC de cada dispositivo sensor a nomenclatura operacional do equipamento monitorado, ou seja, o banco de dados é composto de uma relação de um para um da nomenclatura do equipamento da subestação para o endereço do dispositivo *Bluetooth*.

4.5.3 Simulação da execução do servidor remoto

Nesta subseção apresenta-se um passo a passo da execução da funcionalidade principal do sistema. Este acompanhamento é útil para um melhor entendimento da interação entre os blocos descritos na subseção anterior. Para facilitar o entendimento, foi feito um fluxograma contendo os passos da execução do servidor, conforme Figura 22 da próxima página.

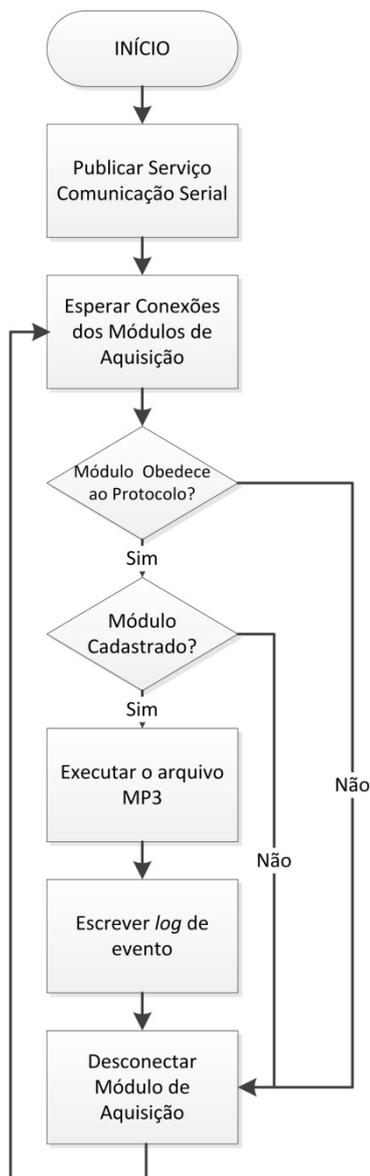


Figura 22. Fluxograma de funcionamento do servidor remoto.

Segue abaixo a sequência de funcionamento do sistema:

- i. Publicar serviço de comunicação serial – o módulo monitor publica um serviço do tipo RFCOMM, que é o perfil *Bluetooth* responsável pela emulação de portas seriais;
- ii. Esperar conexões dos módulos de aquisição – neste passo o servidor remoto, do módulo monitor, aguarda por tempo indefinido conexões dos módulos sensores;
- iii. Módulo obedece ao protocolo – neste ponto, o servidor remoto verifica se o módulo de aquisição obedece ao protocolo de comunicação

estabelecido, caso o módulo de aquisição não obedeça à sinalização o servidor remoto desconecta-o, caso contrário o fluxo segue para o próximo passo;

- iv. Sensor cadastrado – neste passo o servidor remoto, consulta o banco de dados se módulo de aquisição que requisitou conexão e que efetuou o protocolo de sinalização está cadastrado no banco de dados do sistema, se o módulo de aquisição não estiver cadastrado ele é desconectado pelo servidor remoto, caso contrário a sequência continua;
- v. Executar MP3 – uma vez verificado no banco de dados, no passo anterior, a existência do módulo de aquisição. Neste passo é executada a mensagem referente ao equipamento que o módulo de aquisição monitora;
- vi. Escrever *log* de evento – após a execução da mensagem, o sistema agora escreve no *log* de eventos, como descrito anteriormente o *log* é composto pela nomenclatura do equipamento que o módulo de aquisição monitora acrescido da data/hora do sistema;
- vii. *Desconectar sensor* – neste ponto o sistema desconecta o módulo de aquisição e reinicia o processo voltando para o passo ii.

4.6 Desenvolvimento da solução

Neste seção são apresentados os desenvolvimentos realizados tanto no que se diz respeito ao projeto de hardware (módulo sensor), quanto ao projeto de software (módulo monitor). Na subseção 4.6.1 tem se os resultados derivados do projeto de hardware e na seção 4.6.2 os frutos do projeto de software.

4.6.1 Sistema embarcado produzido

Seguindo o projeto proposto no capítulo anterior foram unificados os blocos da fonte de alimentação e do microcontrolador. Essa unificação facilitou o desenvolvimento da Placa de Circuito Impresso (PCI) do projeto. A Figura 23 apresenta o leiaute do circuito em questão.

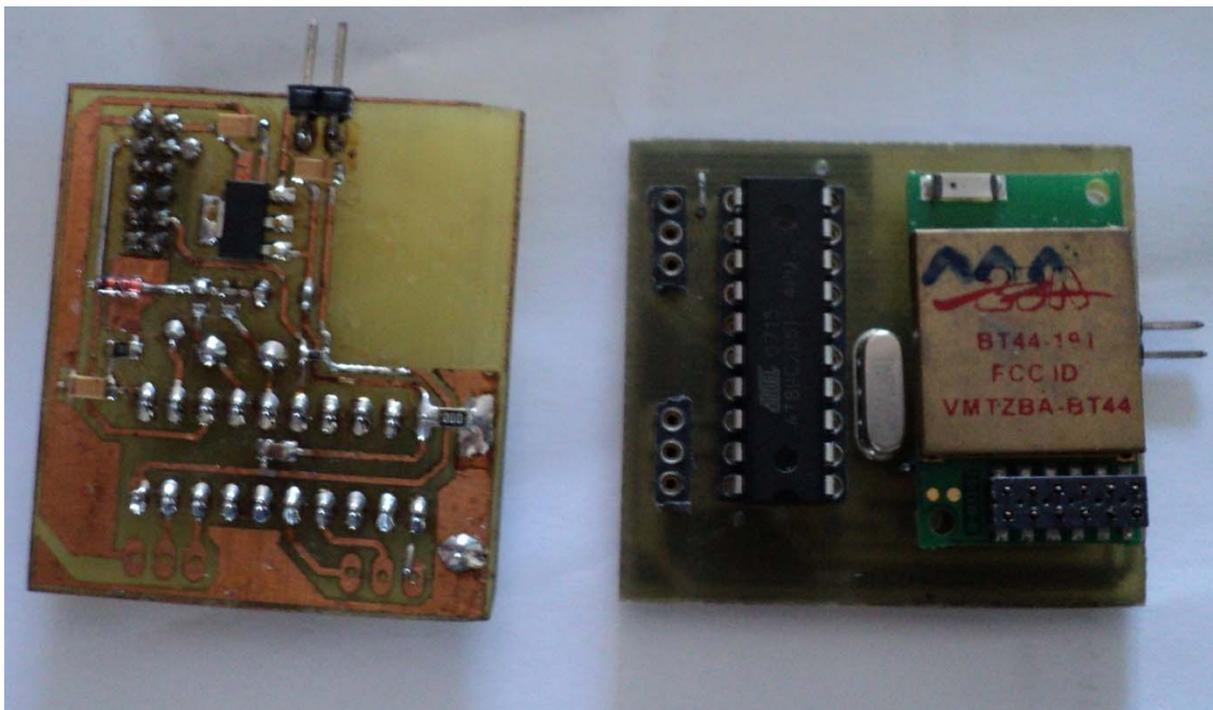


Figura 24. PCI construída do bloco de controle e alimentação.

Já na Figura 25 abaixo se tem o leiaute da PCI do circuito sensor. Novamente, por questões de economia de espaço foram utilizados componentes SMD.

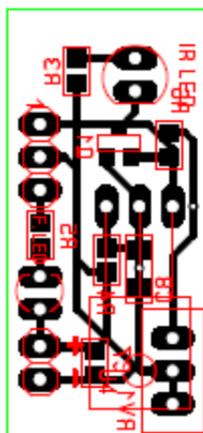


Figura 25. Leiaute da PCI do bloco do sensor.

Na Figura 26 a seguir é demonstrado a PCI do sensor desenvolvida. Após o processo de confecção detalhado anteriormente.

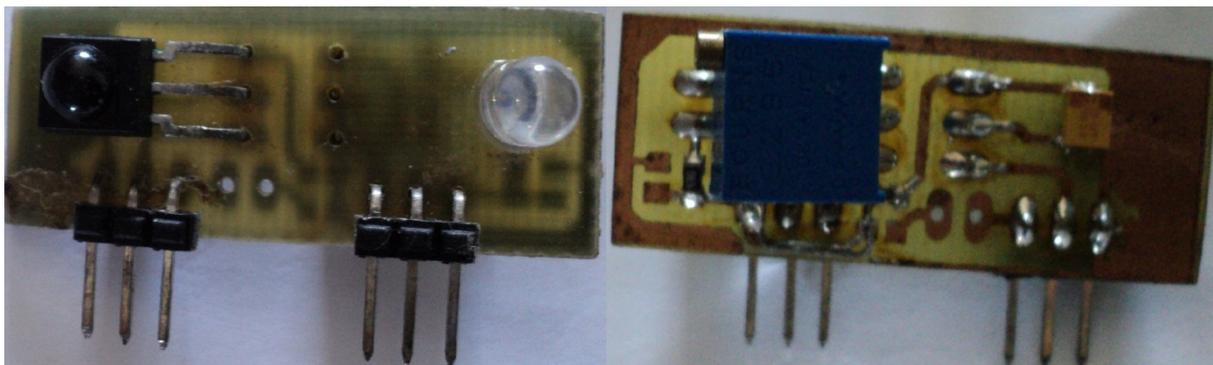


Figura 26. PCI construída do bloco do sensor.

Por fim, na Figura 27 segue uma foto do modulo sensor consolidado, com todas as placas soldadas.



Figura 27. PCI consolidada do projeto de hardware.

4.6.2 Software desenvolvido

Nesta seção são demonstrados as telas do programa do módulo monitor desenvolvido em Java. O modo de funcionamento trabalhado neste primeiro protótipo foi o *modo alerta*, tendo em vista que para a implementação dos modos de funcionamento otimizado e emergência é necessário haver a integração entre o sistema embarcado proposto ao sistema computacional proposto por [16].

A Figura 28 mostra a tela principal do módulo monitor. Nesse nível o módulo monitor já está apto a receber os dados dos módulos sensores, pois quando a mensagem “Esperando dados dos clientes” é exibida, o programa já está em executando o passo ii do fluxograma mostrado na subseção 4.5.3.

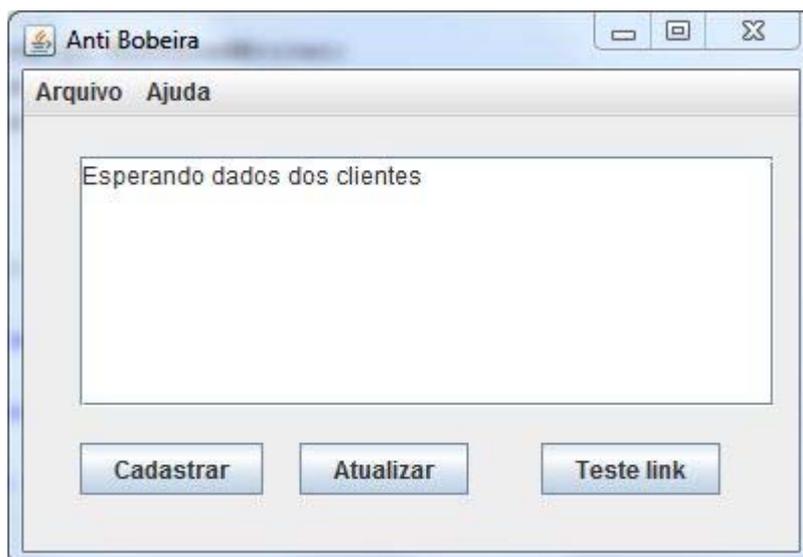


Figura 28. Tela inicial do sistema.

Analisando a Figura 28 acima verifica-se que há 3 botões disponíveis para o usuário, a saber: cadastrar, atualizar e teste *link*. Ao clicar no botão cadastrar o sistema exibirá uma tela intermediária, conforme Figura 29 a seguir, e enquanto que o programa acessa o hardware presente no módulo monitor a procura de todos os módulos de aquisição que estão no seu raio de alcance.

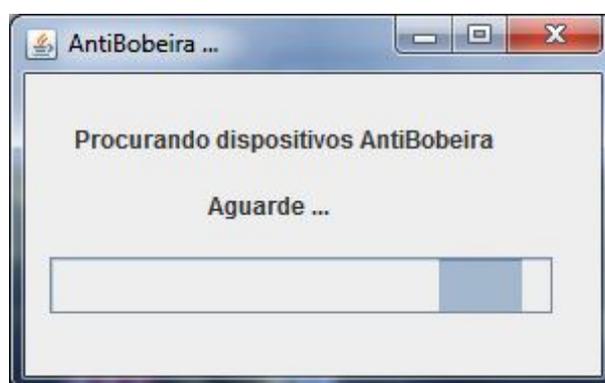


Figura 29. Tela de busca de módulos sensores.

No caso dos módulos de aquisição se encontrem no raio de influência do módulo monitor uma nova tela é gerada, conforme Figura 30. Nesta tela há um campo de preenchimento obrigatório, *Nome do Dispositivo*, que é a nomenclatura do equipamento que o módulo de aquisição monitora. Esse nome também é utilizado como índice dos diretórios das mensagens MP3 que são executadas após ocorrência de um evento (detecção do OPI).

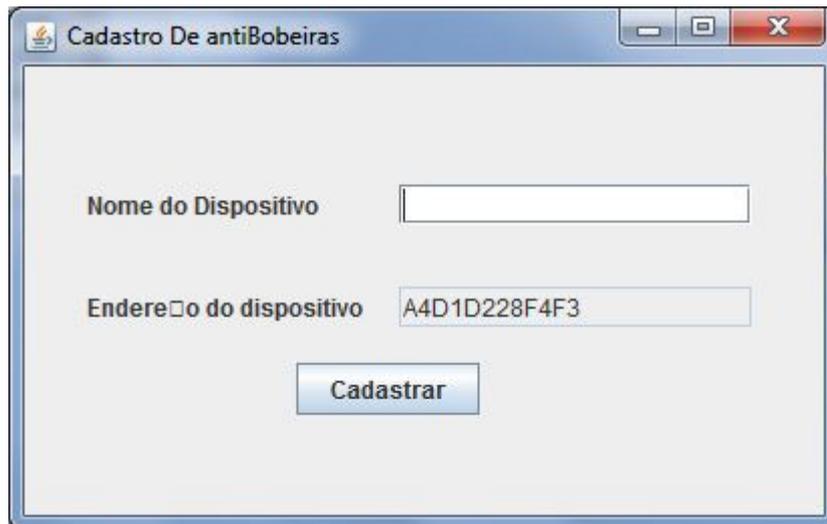


Figura 30. Tela de cadastro de um módulo sensor.

Após a digitação do nome do dispositivo, é armazenado no banco de dados do sistema e uma mensagem é gerada para o usuário, informando que o dispositivo foi cadastrado com sucesso, conforme Figura 31 a seguir.

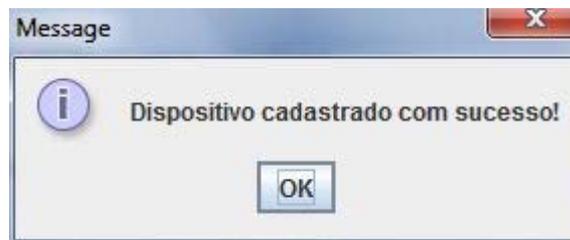


Figura 31. Tela de mensagem de dispositivo cadastrado com sucesso.

Este processo de cadastramento é repetido até que todos os dispositivos sensores sejam cadastrados. Ao final do cadastro é exibido uma mensagem ao usuário informando que não há mais nenhum dispositivo a ser cadastrado, conforme Figura 32.

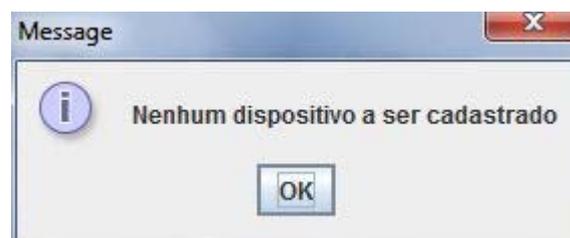


Figura 32. Tela de mensagem de nenhum dispositivo a ser cadastrado.

Seguindo a análise, o botão *atualizar* funciona de maneira análoga ao botão *cadastrar*. No entanto, esta funcionalidade permite a troca rápida de um dispositivo sensor com defeito, pois é só realizar a associação ao novo dispositivo. Como o processo é exatamente igual ao anterior, as telas exibidas são estritamente iguais as já apresentadas, por isso o passo a passo foi omitido.

O terceiro botão é o teste *link*, cuja funcionalidade principal é verificar se todos os módulos de aquisição cadastrados estão funcionando corretamente, ou seja, ao clicar no botão teste *link*, a mesma tela de busca de dispositivos da Figura 29 é exibida momentaneamente, indicando que o módulo monitor está realizando a pesquisa dos módulos de aquisição vizinhos. Uma vez termina a busca pelos dispositivos. Uma nova tela é exibida, conforme Figura 33 a seguir, relacionando através de uma tabela o endereço físico do módulo de aquisição, o equipamento que ele monitora e o estado de seu dispositivo *Bluetooth*.

Nome do dispositivo	Endereço do dispositivo	Situação
ipad	A4D1D228F4F3	Dispositivo com problemas
kc	00043E234BE7	Dispositivo com problemas
mult2	0011E0036ECC	Dispositivo com problemas
doido	75169E676601	Dispositivo com problemas
mult1	001B3502C3D9	Dispositivo com problemas
teste	001B3502C4EA	Dispositivo com problemas
rua	001D3BF0EA54	Dispositivo com problemas

Figura 33. Tela resultante da funcionalidade do botão de teste *link*.

Tal verificação é extremamente útil para manutenções preventivas e corretivas e, a partir do momento que for efetuada a integração deste sistema embarcado com o sistema computacional proposto por [16], esta verificação poderá ser feita a distância.

4.7 Análise preliminar de desempenho dos módulos *Bluetooth*

Nesta seção é apresentado um quadro comparativo do desempenho dos módulos *Bluetooth* utilizados no projeto. Esta comparação é extremamente necessária tendo em vista o propósito do sistema que é a prevenção de falhas humanas na operação do SEP.

Como visto no fluxograma de funcionamento geral do módulo sensor, na Figura 17 da seção anterior. Cada módulo sensor deve enviar dados ao módulo monitor quando ocorrer um acionamento válido no sensor de proximidade, a partir dessa sinalização o microcontrolador deverá enviar um comando para o módulo de comunicação serial *Bluetooth* para conexão com o módulo *USB Bluetooth* do módulo monitor. Sendo assim o tempo medido entre a detecção da proximidade do OPI e a execução do arquivo de áudio da mensagem é fator de extrema importância para o correto funcionamento do sistema embarcado proposto.

No projeto foram utilizados três módulos *Bluetooth* diferentes: o KC-21 [22] da *Kcwirefree*, o Parani ESD-1000 [23] da *Sena Technologies* e por fim o BT44-191C [24] da *ZBA Inc.*. Foram mensurados os tempos de conexão de cada componente aliados aos raios de alcance ao módulo monitor. Os resultados são apresentados na tabela 6 abaixo:

Tabela 6. Tabela de comparação de desempenho de latência de conexão.

Marca	Modelo	Tempo de conexão	Raio de alcance
Kcwirefree	KC - 21	Desprezível	10 m
Sena	Parani ESD-1000	3 segundos	100 m
ZBA Inc.	BT44-191C	3 segundos	10 m

Verifica-se que é necessário avaliar o desempenho dos módulos utilizados, fazendo um estudo mais aprofundado da arquitetura de cada módulo *Bluetooth* e reavaliar a proposta de funcionamento do servidor para adequação do sistema a realidade do SEP, tendo em vista que o tempo de conexão dos dois últimos módulos é inaceitável, pois inviabilizará o caráter preventivo da solução.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

Verificou-se que a abordagem utilizada conseguiu desenvolver uma WMSAN no contexto de uso da operação em tempo real do sistema elétrico de potência (SEP) brasileiro. No projeto foi utilizado um sistema de prevenção a falhas utilizando sensor de proximidade e geração de alertas sonoros antes que o operador execute uma manobra.

Na oportunidade, foi validado também através de testes experimentais um sistema embarcado dotado de sensor de proximidade via infravermelho, microcontrolador e módulo de comunicação *Bluetooth*. Com relação à detecção do operador através do sensor de proximidade, ponderou-se que foi efetuada com sucesso.

Verificou-se também que o desempenho do sistema reside fundamentalmente no tempo de conexão entre os módulos de comunicação *Bluetooth* e o servidor de aplicação, ou seja, para que o sistema funcione de forma satisfatória é necessário que o tempo de comunicação entre os módulos seja inferior a 500 ms. No entanto, só o módulo da *Kcwirefree* conseguiu apresentar este desempenho, com isso, se faz necessário ampliar o estudo dos módulos utilizados com relação à melhoria desse tempo de conexão. Uma possibilidade é verificar junto ao fabricante dos equipamentos se novas versões de *firmware* resolvem essa questão, ou se há a possibilidade do próprio usuário final elaborar um *firmware* com um conjunto reduzido de funcionalidades que permitam atingir o tempo desejado.

Devido a flexibilidade inerente ao projeto de software, tal fase apresentou os melhores resultados, com a geração de todos os *logs* de eventos para cada manobra, todos os cadastros no banco de dados local, execução dos arquivos de áudio e enlace de comunicação devido a vasta documentação na internet sobre o protocolo de comunicação *Bluetooth* e execução de arquivos MP3s implementado na tecnologia *Java*. No entanto, precisamente no protocolo de comunicação enfrentou-se uma dificuldade inicial na troca de mensagens entre o microcontrolador e a aplicação residente, pelo fato de o microcontrolador trabalhar com representação

dos dados em 8 bits enquanto que a linguagem de programação utilizada utilizar 32 bits.

5.1 Trabalhos futuros

O projeto necessita ser validado pelos usuários finais, ou seja, é de extrema importância que se façam testes de usabilidade com os operadores de instalação (OPI) e, verificar o impacto da tecnologia em suas atividades em tempo real. Após a realização dos testes de usabilidade, poderão ser feitos ajustes no projeto com os pontos de melhoria levantados pelos testes.

Como sugestão o projeto poderia ser utilizado em um ambiente de treinamento de OPIs que possuísse todas as características físicas uma sala de painel de controle e comando de uma instalação do SEP, para prover um ambiente propício à experimentação e observações, mas mantendo a criticidade encontrada na operação em tempo real.

Com relação às melhorias futuras pode se dividir em duas fases: uma fase relativa ao projeto de hardware e outra ao projeto de software. Nas duas subseções a seguir, tem indicativos de melhorias para cada fase do projeto.

5.1.1 Melhorias de hardware

Como sugestão para a execução de melhorias do projeto de hardware, enumera-se abaixo um conjunto de metas:

- Desenvolver outras opções de sensor de proximidade, tendo em vista, a criticidade da geração dos 38kHz no microcontrolador utilizado;
- Realizar um estudo aprofundado dos módulos Bluetooth utilizados, avaliando até a elaboração de um *firmware* dedicado as necessidades do projeto;
- Implementar o conceito de *scatternets* nos módulos *Bluetooth* de hardware, pois utilizando essa funcionalidade pode-se expandir a quantidade de dispositivos Bluetooth conectados simultaneamente;

5.1.2 Melhorias de software

Como sugestão para a execução de melhorias do projeto de software, enumera-se abaixo um conjunto de objetivos a serem alcançados:

- Integrar o projeto de hardware e software ao sistema computacional proposto por [16];
- Migrar o banco de dados de cada módulo monitor em um sistema de gerenciamento banco de dados (SGBD);
- Estudar a possibilidade de integração dos documentos de manobra – RTM ou PGM – em *tablets* com *Bluetooth* executando o sistema operacional *Android* [31];
- Utilizar técnicas de métodos formais, como as redes de *Petri*, para verificação formal da execução dos documentos de manobra;
- Utilizar uma linguagem de programação com suporte a tempo real, como exemplo a Java *Real Time System* [32].

Bibliografia

1 ARAUJO, A. S.; ROCHA, E.; LIRA, T. D. A. S. SISRTM - Sistema de Roteiro de Manobras. **Encontro para debates de assuntos de operação**, São Paulo, 09 a 13 Novembro 2008.

2 JIA, C.; SUN, Y.; LI, A. Human Error Rate Assessment for Power Company Based on Manegement by Objective. **IEEE**, Beijing, 2009.

3 KOVAL, D. O.; FLOYD, H. L. I. Human Element Factors Affecting Reliability and Safety. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, v. 34, n. 2, MARCH/APRIL 1998.

4 DA GAMA, M. **RELATÓRIO DE FISCALIZAÇÃO**. ANEEL. Brasília, p. 120. 2010.

5 CARRASCO, A. C.; LAMBERT-TORRES, G. Sistema inteligente para a detecção defalhas de manobras em seccionadoresde subestações de potência. **Revista ciências exatas**, Taubaté, v. v. 11, n. n. 1, p. p. 9-16, 2005.

6 M., A. N. Abstractions for Operator Support in Energy Manegement Systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 23, p. 333-341, 2011.

7 EROL-KANTARCI, M.; MOUFTAH, H. T. Wireless multimedia sensor and actor networks for the next generation power grid. **Ad Hoc Networks**, Ottawa, v. 9, n. 1, p. 542-551, August 2010.

8 GROSS, C. A. Power system analysis. **Wiley**, n. 2, p. 593 p., 1986. ISSN ISBN 0471862061, 9780471862062.

9 NASCIMENTO, A. R. L. et al. **GERÊNCIA DOS RISCOS DE FALHAS OPERACIONAIS**. Paulo Afonso: [s.n.].

10 MCGREW, R. W.; VAUGHN, R. B. Discovering vulnerabilities in control system human-machine interface software. **The Journal of Systems and Software**, v. 82, p. 583-589, 2009.

11 LAPRIE, J.-C.; AVIZIENIS, A.; RANDELL, B. DEPENDABILITY AND ITS THREATS.

12 OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Manual de Procedimentos da Operação: conceituação geral**. ONS. Brasília, p. 22. 2009.

13 LIMA, A. T. P.; TURNELL, M. F. Q. V. O Contexto de trabalho, as IHMs e o erro humano na operação de sistemas elétricos, 2006.

14 FILHO, F. T.; VIEIRA, M. D. F. Q. **MOTOR DE SIMULAÇÃO BASEADO EM MODELOS CPN APLICADO A UM SISTEMA PARA TREINAMENTO DE OPERADORES**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Bonito: [s.n.]. 2010. p. 1252-1259.

15 DA CUNHA, R. F. C. **OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO DO ESTADO DO CEARÁ**. UFCE. Fortaleza, p. 85. 2011.

16 SAMPAIO, R. B. **OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS E TAREFAS DAS INSTALAÇÕES DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**. UPE. Recife. 2011.

17 BLUETOOTH SIG. **Specification of Bluetooth System**. Bluetooth SIG. [S.I.]. 2004.

18 BLUETOOTH SIG. Bluetooth SIG. **Bluetooth SIG**, 2011. Disponível em: <<http://www.bluetooth.com/Pages/History-of-Bluetooth.aspx>>. Acesso em: 1 Dezembro 2011.

19 MICHAEL NIELSEN, A. J. G. F. S. A. A. G. Real-world Bluetooth MANET Java Middleware. **IT University of Copenhagen**, 2008. Disponível em: <<http://ows.edb.utexas.edu/site/collaborative-bluetooth-edumanet/bluetooth>>. Acesso em: 1 Dezembro 2011.

20 NATIONAL SEMICONDUCTOR. **LM1117/LM1117I 800mA Low-Dropout Linear Regulator**. National Semiconductor. [S.I.]. 2004.

21 VISHAY. **IR Receiver Modules for Remote Control Systems**. Vishay. [S.I.], p. 8. 2005.

22 KCWIREFREE. **Bluetooth OEM Module Datasheet**. KCWIREFREE. [S.I.]. 2008.

23 SENA TECHNOLOGIES. **Parani-ESD1000 User Manual**. Sena Technologies. [S.I.]. 2011.

24 ZBA INC. **integration of the BT44-191C Bluetooth assembly**. ZBA INC. [S.I.]. 2008.

25 ATMEL CORPORATION. **AT89S2051 datasheet**. [S.I.]. 2008.

26 INTERNATIONAL ORGANIZATION OR STANDARDIZATION. **ISO 9241, Ergonomic requirements for office work with visual display terminals**. Geneva: [s.n.], 1998.

27 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11064, Ergonomic design of control centres**. Geneva: [s.n.], 2003.

28 CYBENKO, G. V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function. **Mathematics of Control, Signals, and Systems**, v. 2, p. 303–314, 1989.

29 USB IMPLEMENTERS FORUM, INC. **USB Implementers Forum, Inc.**, 2011. Disponível em: <<http://www.usb.org/home>>. Acesso em: 2011.

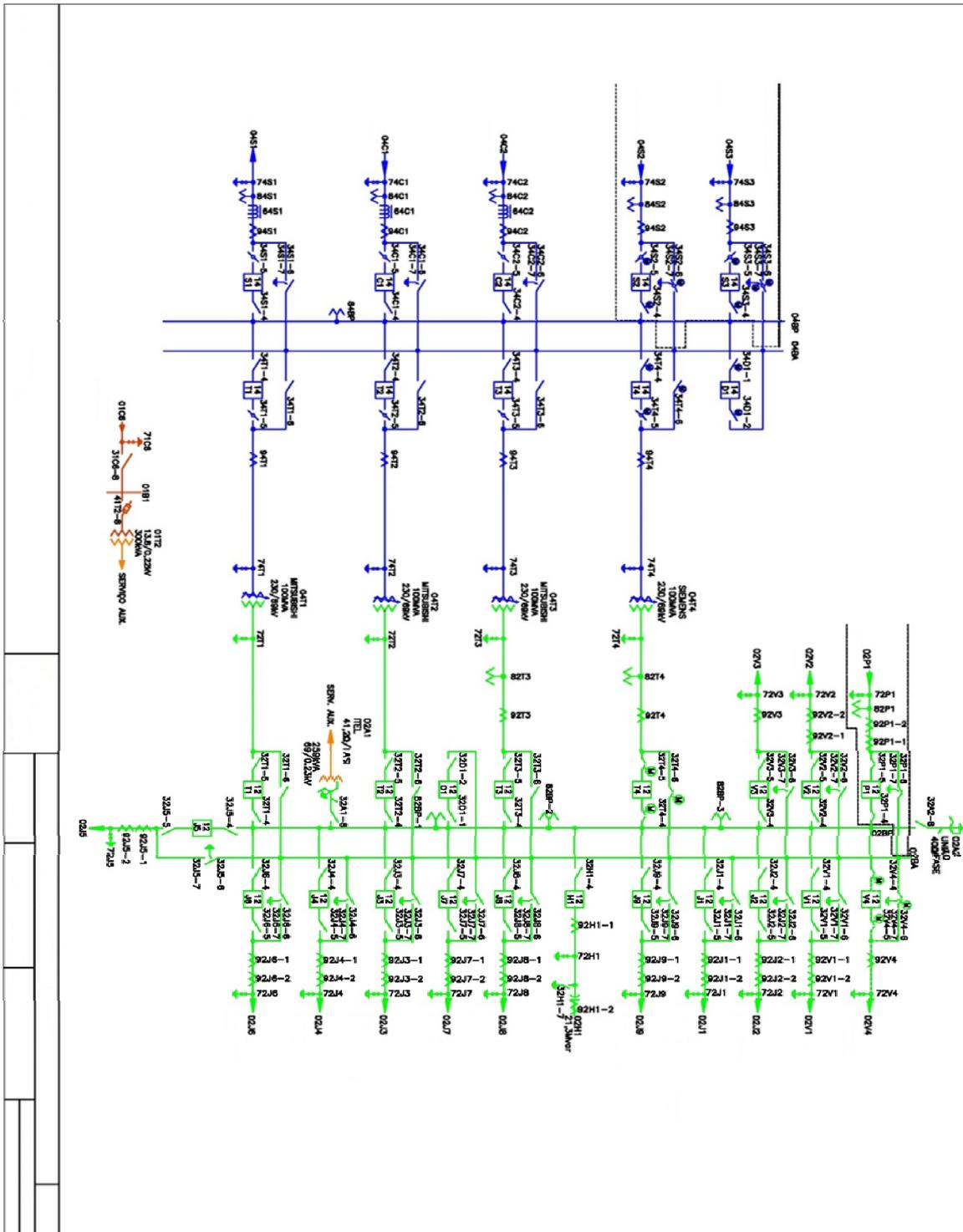
30 CAMPIONE, M. . W. K. About the Java Technology. Disponível em: <<http://docs.oracle.com/javase/tutorial/getStarted/intro/definition.html>>.

31 ANDROID.COM. About Android, 2011. Disponível em: <<http://www.android.com/about/>>.

32 ORACLE. Sun Java Real-Time System. **Oracle.com**, 2011. Disponível em: <<http://java.sun.com/javase/technologies/realtime/index.jsp>>.

Apêndice A

Diagrama Unifilar Típico



Apêndice B

RTM Fictício

ORDEM DE MANOBRAS	REFERÊNCIA: RTM 001	RESPONSÁVEL / ÓRGÃO:	Nº
FINALIDADE / EQUIPAMENTO:		PERÍODO:	
Nº DE ORDEM	MANOBRAS	HORÁRIO EXECUÇÃO	
	CONFIGURAÇÃO:		
	DISJUNTOR 14D1 ABERTO COM CHAVES ASSOCIADAS FECHADAS, DISJUNTOR		
	14C1 ENERGIZANDO BARRA 230 KV E TODAS AS CHAVES "BY-PASS" 230 KV ABERTAS.		
1	LIBERAÇÃO:		
1.1	COAO – AUTORIZAR INST LIBERAÇÃO 14C1.		
1.2	INST – CONFIRMAR 14D1 ABERTO.		
1.3	INST – COLOCAR CHAVES CLT-14C1 E CLT-14D1 NA POSIÇÃO "LOC".		
1.4	INST – FECHAR 34C1-6.		
1.5	INST – COLOCAR CHAVE 43-14C1 NA POSIÇÃO "TRANSFERÊNCIA".		
1.6	INST – COLOCAR CHAVE 43-14D1 NA POSIÇÃO "TRANSFERÊNCIA".		
1.7	INST – FECHAR 14D1.		
1.8	INST – ABRIR 14C1.		
1.9	INST – ABRIR 34C1-4 E 34C1-5.		
1.10	INST – ENTREGAR 14C1 ISOLADO AO RESPONSÁVEL.		
1.11	INST – COLOCAR CHAVE CLT-14D1 NA POSIÇÃO "TEL".		
1.12	INST – INFORMAR COAO CONCLUSÃO LIBERAÇÃO 14C1.		
2	NORMALIZAÇÃO:		
2.1	INST – RECEBER 14C1 LIVRE PARA OPERAÇÃO.		
2.2	COAO –AUTORIZAR INST NORMALIZAÇÃO 14C1.		
2.3	INST – COLOCAR CHAVE CLT-14D1 NA POSIÇÃO "LOC".		
2.4	INST – FECHAR 34C1-4 E 34C1-5.		
2.5	INST – FECHAR 14C1.		

2.6	INST – ABRIR 14D1.		
2.7	INST – COLOCAR CHAVE 43-14D1 NA POSIÇÃO “ NORMAL ”.		
2.8	INST – COLOCAR CHAVE 43-14C1 NA POSIÇÃO “ NORMAL ”.		
2.9	INST – ABRIR 34C1-6.		
2.10	INST – COLOCAR CHAVES CLT-14C1 E CLT-14D1 NA POSIÇÃO “ TEL ”.		
2.11	INST – INFORMAR COAO CONCLUSÃO NORMALIZAÇÃO 14C1.		
PROGRAMAÇÃO / PREPARAÇÃO		VISTO EXECUÇÃO	
DESPACHANTE / OPERADOR	LIBERAÇÃO:	NORMALIZAÇÃO:	
ENGENHEIRO / RESPONSÁVEL	DESPACHADOR OU OPERADOR	DESPACHADOR OU OPERADOR	