FÁBIO JOSÉ DE ANDRADE

ANÁLISE CRÍTICA DA ROTA TECNOLÓGICA ADOTADA NO
DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO SINALIZADOR DE FALTAS
PARA REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2012

FÁBIO JOSÉ DE ANDRADE

ANÁLISE CRÍTICA DA ROTA TECNOLÓGICA ADOTADA NO
DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO SINALIZADOR DE FALTAS
PARA REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Livre-Docente
Josemir Coelho Santos

São Paulo
2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de junho de 2012

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Andrade, Fábio José de

Análise crítica da rota tecnológica adotada no desenvolvimento de equipamento sinalizador de faltas para redes aéreas de distribuição de energia elétrica / F.J. de Andrade. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.

175 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Distribuição de energia elétrica 2. Projetos de produtos 3. Circuitos integrados I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

A todos que sempre acreditaram em mim e me deram forças e motivação para realização deste trabalho, em especial meus pais, minha irmã e minha adorada esposa Carol.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Josemir que me abriu as portas de seu laboratório quando eu ainda era aluno da graduação e, com sua infinita paciência e amizade, me ensinou a ser um pesquisador do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica.

À CPFL, que sempre acreditou na equipe de pesquisadores do sinalizador durante todos os anos de desenvolvimento e que investiu muito, através do programa de P&D da ANEEL, para que hoje tivéssemos um equipamento com tecnologia nacional, pronto para competir em pé de igualdade com equipamentos estrangeiros consagrados e pronto para contribuir para a melhoria da qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica prestado para a população como um todo.

Aos amigos da Expertise Engenharia e EXPERTEC, pelo companheirismo e ajuda ao longo de todos esses anos (mesmo nos momentos mais complicados), o que permitiu me tornar o profissional que sou hoje.

Aos amigos do LSO, que sempre foram minha referência e modelo dentro da USP, me ajudando de maneira muito significativa na caminhada para obtenção do título de Mestre.

Aos colegas do IEE/USP que nos permitiram, na segurança do laboratório de altas correntes, entender por completo o comportamento do sinalizador luminoso de faltas operando em situações muito próximas da realidade.

A todos meus familiares, amigos e colegas da FEEC UNICAMP. A todos os profissionais que se envolveram e colaboraram, direta ou indiretamente, no desenvolvimento do sinalizador luminoso de faltas e, conseqüentemente, na execução deste trabalho.

RESUMO

Um equipamento sinalizador luminoso de faltas foi desenvolvido pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) em parceria com a Escola Politécnica da USP e a empresa Expertise Engenharia Ltda., através de uma série de projetos de pesquisa incluídos no programa de pesquisa e desenvolvimento (P&D) regido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) brasileira. Neste trabalho é feita uma análise crítica da rota tecnológica adotada no desenvolvimento do sinalizador de faltas, apontando detalhes e justificativas das escolhas tecnológicas adotadas, além de novas possibilidades de melhoria do equipamento face aos avanços tecnológicos detectados nos últimos anos. Para tanto, é proposto e aplicado um novo método, associado a uma sistematização, para análise comparativa de tecnologias, que considera dados quantitativos, qualitativos e estratégicos diretamente comparáveis entre si. Ao longo do trabalho são analisados as escolhas dos princípios de detecção de faltas e funcionalidades agregadas, o desenvolvimento da eletrônica e dos circuitos integrados do detector de faltas, a fonte de alimentação, a sinalização luminosa e o gabinete do equipamento. Como resultado da linha de pesquisa do sinalizador luminoso de faltas foram obtidos protótipos de prova de conceito, cabeça-de-série e de lote pioneiro, estes últimos prontos e certificados para inserção no mercado. Obtiveram-se também diversas publicações em congressos nacionais, a geração de dois pedidos de patentes e um sistema computacional de alocação otimizada de sinalizadores de faltas em redes de distribuição aérea de energia elétrica.

Palavras-chave: Análise Crítica, Circuitos Integrados, Localização de Faltas, Projeto de Produto, Redes de Distribuição de Energia Elétrica, Sinalizador de Faltas.

ABSTRACT

Within the R&D program governed by the National Agency of Electric Energy of Brazil, a luminous faulted circuit indicator equipment (FCI) was developed by the Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) in partnership with the Escola Politécnica da USP and the company Expertise Engenharia Ltda. In this work it is presented a critical analysis of the technological route adopted for development of this new FCI, indicating details and justifications of technological choices adopted, and new detected possibilities for improvements, taken into account the technological advances in recent years. For such purpose, it is proposed a new method, associated to a practical systematization, for comparative analysis of technologies that accounts for quantitative, qualitative and strategic data directly comparable. The work presents analyses on the choices of fault detection principles and related functions, the development of integrated circuits and fault detector electronics, the power supply, the luminous signaling and the equipment case. As results of the research and development of the FCI there were obtained proof of concept, prototype and pilot equipments, the last ones certified and ready for sale. There were also obtained several publications in national conferences, submission of two patent applications and a software for optimization of FCIs allocation on overhead power distribution networks.

Keywords: Critical Analysis, Electric Power Distribution Network, Fault Location, Faulted Circuit Indicator, Integrated Circuit, Product Design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo real de pontos localizados por sistema de localização de faltas por medição centralizada de tensão e corrente de frequência fundamental, em comparação com o ponto real da ocorrência (Manassero et al.- 2005).	26
Figura 2 – Indicação do defeito na rede de distribuição utilizando o Sinalizador de Faltas.	35
Figura 3 – Campo Magnético ao redor do condutor retilíneo.	42
Figura 4 – Sensor de corrente do equipamento sinalizador luminoso de faltas.	42
Figura 6 – Chapa de cobre do sensor de tensão.	44
Figura 7 – Montagem do sensor de tensão, próximo ao condutor, abaixo do sensor de corrente.	44
Figura 8 – Equipamento Sinalizador Luminoso de Faltas.	45
Figura 9 – Sequência de eventos que é detectada pelo equipamento Sinalizador Luminoso de Faltas.	45
Figura 10 – Arranjo interinstitucional de desenvolvimento do projeto de Lote Pioneiro do equipamento sinalizador luminoso de Faltas (Ferreira, 2011b).	50
Figura 11 – Descrição lógica do primeiro protótipo do equipamento sinalizador luminoso de faltas.	58
Figura 12 – Circuito eletrônico discreto do primeiro protótipo de teste de viabilidade técnica do sinalizador de faltas.	58
Figura 13 – Microcontrolador MSP430F133 da Texas Instruments.	60
Figura 14 – Par de inversores lógicos para aumento do ganho do sinal de saída dos blocos analógicos.	64
Figura 15 – Encapsulamento tipo SMD do circuito microeletrônico do Sinalizador Luminoso de Faltas.	66
Figura 16 – Circuito Integrado do Sinalizador de Faltas montado através do sistema COB na Placa de Circuito Impresso.	67
Figura 17 – Encapsulamento microeletrônico tipo DIL/DIP.	68
Figura 18 – Exemplo de encapsulamento DIP-DIL protótipo. Notar ao centro a tampa de acesso à pastilha de silício contendo o circuito microeletrônico e as conexões internas com os terminais da capsula.	68
Figura 19 – Gráfico entre a relação da corrente do condutor e a tensão de saída do sensor de corrente do sinalizador luminoso de faltas.	77
Figura 20 – Gráfico da relação entre a corrente do condutor e a tensão de saída do sensor de corrente do sinalizador luminoso de faltas.	77
Figura 21 – Perfil de descarga da bateria ER26500M de 6.500 mAh nominais.	84
Figura 22 – Esquema de acionamento de flash de lâmpada de gás xenônio (David Johnson – 2000).	86
Figura 23 – Aplicação típica do A8732 (Allegro MicroSystems - 2010).	87

Figura 24 – Gráfico da relação entre tensão da bateria, corrente máxima e tempo de carregamento do capacitor de disparo do <i>flash</i> luminoso (Allegro MicroSystems - 2010).	88
Figura 25 – LED de Alto-Brilho, invólucro 5 mm redondo.	90
Figura 26 – LED de Alto-Fluxo, invólucro 5 mm piranha.	90
Figura 27 – Diagrama de irradiação luminosa do LED adotado no lote pioneiro do equipamento sinalizador luminoso de faltas.	92
Figura 28 – Exemplos de sinalizadores de faltas com fixação através de sistemas com garras e molas. Na ordem: Horstmann - Navigator; Cooper - S.T.A.R. Pathfinder; Linetroll - 110Eμ.	94
Figura 29 – Exemplos de sinalizadores de faltas com sistema de fixação por molas. Na ordem: SEL – AutoRanger; LOFA – RTA; FEBRÁS – Detecur.	94
Figura 30 – Exemplos de sinalizadores de faltas com sistema de fixação por grampo rosqueável. Na ordem: Fisher Pierce - 1548; ENGRO - IFTA 2000.	95
Figura 31 – Primeiros protótipos do sinalizador luminoso de faltas da CPFL com fixação por molas.	96
Figura 32 – Dispositivo Cabeça-de-série do sinalizador luminoso, sem proteção contra torque-excessivo. Verificaram-se casos com rachaduras no gabinete e consequente falha da estanqueidade do dispositivo.	97
Figura 33 – Sistema de catraca de proteção contra torque excessivo. Haste de fixação composta de 2 peças que possuem dentes e encaixes que limitam a força aplicada ao gabinete, evitando danificá-lo.	97
Figura 34 – Placa eletrônica redonda do primeiro protótipo de campo do sinalizador de faltas CPFL.	98
Figura 35 – Placa eletrônica redonda com um furo no meio, do protótipo cabeça-de-série do sinalizador de faltas CPFL.	98
Figura 36 – Novo gabinete comporta placa eletrônica quadrada, otimizando espaço útil e reduzindo custo de fabricação.	99
Figura 37 – Parte superior do gabinete em formato de gancho e haste de fixação deslocada do eixo central, com mordente de fixação no cabo em formato de “L”.	99
Figura 38 – Comparação entre tamanhos e formatos dos sinalizadores cabeça-de-série (esquerdo) com uma única bateria de tamanho médio e o sinalizador luminoso de faltas do Lote Pioneiro (direito), com espaço para duas baterias tamanho grande.	100
Figura 39 – Moldes de injeção protótipos do gabinete do sinalizador de faltas cabeça-de-série.	102
Figura 40 – Moldes definitivos de injeção do gabinete do equipamento sinalizador de faltas.	103
Figura 41 – Formato e tamanho necessário para a caixa de blindagem do equipamento sinalizador cabeça-de-série.	106
Figura 42 – Formato e tamanho necessário para a caixa de blindagem do equipamento sinalizador luminoso de faltas - final.	106
Figura 43 – Caixa de Blindagem Injetada em alumínio do Equipamento Sinalizador de Faltas.	110
Figura 44 – Desenvolvimento de molde de Injeção em alumínio da caixa de blindagem do equipamento sinalizador luminoso de faltas.	111

Figura 45 – Peças da caixa de blindagem injetadas em alumínio.....	111
Figura 46 – Primeiro protótipo de campo com eletrônica discreta.....	118
Figura 47 – Protótipo Cabeça-de-série com chip microeletrônico e tecnologia COB.....	118
Figura 48 – Equipamento sinalizador luminoso do Lote Pioneiro. Versão final para inserção no mercado.....	118
Figura 49 – Exemplo hipotético obtido de Ferreira et al. (2011c), de relação entre custo de instalação e manutenção de sinalizadores de faltas na rede elétrica e da END com o número de sinalizadores instalados. Existe um ponto ótimo onde o custo total é mínimo.....	138
Figura 50 – Modelo em ATP Draw de trecho de linha aérea de distribuição para estudo de abertura de proteção monopolar e bipolar da rede.	139
Figura 51 – Temporização dos eventos de simulação da abertura monopolar da chave fusível.....	141
Figura 52 – Gráfico da tensão no primário do transformador com abertura monofásica da fase A....	142
Figura 53 – Gráfico da tensão no primário do transformador com abertura bifásica da fase A e B. Nota-se que há 1 pu de tensão nas três fases no primário do transformador após a abertura e todas as tensões ficam em fase.	142
Figura 54 – Eletrônica dos protótipos para teste da bateria.	145
Figura 55 – Foto dos protótipos de sinalizadores utilizados no teste das baterias.	145
Figura 56 – Placa de aquisição utilizada no teste da bateria não recarregável.	146
Figura 57 – Tela de Interface com o usuário do programa de teste de perfil de descarga da bateria do sinalizador.	147
Figura 58 – Transdutor óptico-elétrico com fibras ópticas plásticas para monitoramento dos lampejos luminosos dos protótipos ao longo do teste da bateria.	148
Figura 59 – Curva de descarga da bateria do sinalizador luminoso de faltas.	150
Figura 60 – Diagrama de irradiação luminosa do LED LUR3333H/S46.....	152
Figura 61 – Cone de luz do LED utilizado no equipamento cabeça-de-série do sinalizador luminoso de faltas.	153
Figura 62 – Distância mínima, ótima e máxima de visualização da sinalização luminosa.....	154
Figura 63 – Cálculo dos limites geométricos do cone de luminoso (meia potência) do LED do equipamento cabeça-de-série.....	155
Figura 64 – Distância mínima, ótima e máxima de visualização da sinalização luminosa, considerando 25% da potência luminosa do LED com abertura de 30°.	156
Figura 65 – Cálculo dos limites geométricos do cone de luminoso (25% da potência) do LED do equipamento cabeça-de-série.....	156
Figura 66 – Zonas de luz (hachuradas) ao redor do equipamento, e áreas de sombra (em branco). Notam-se diversos pontos onde o observador teria dificuldades em determinar o estado de operação do equipamento.....	157
Figura 67 – Diagrama de irradiação luminosa do LED de alto fluxo típico.	158
Figura 68 – Distância mínima, ótima e máxima de visualização da sinalização luminosa, considerando meia potência luminosa do LED com abertura de 70°.....	158

Figura 69 – Cálculo dos limites geométricos do cone de luminoso (meia potência) do LED com abertura luminosa de 70° .	159
Figura 70 – Cálculo estimado da largura do cone de luz a 100 m do ponto de instalação do equipamento.	159
Figura 71 – Zonas de luz (áreas hachuradas) ao redor do equipamento, e áreas de sombra (em branco). Nota-se que não há pontos de sombra até 50 m do dispositivo e que há boa cobertura até os 100 m, permitindo até que a sinalização luminosa seja vista de alguns pontos mais distantes.	160
Figura 72 – Pontos de instalação dos sinalizadores atuados.	163
Figura 73 – Posicionamento dos sinalizadores e do ponto do defeito em relação à subestação de distribuição.	163
Figura 74 – Circuito da simulação computacional em PSCAD de defeito que causou atuação aparentemente errônea de sinalizadores.	165
Figura 75 – Resultado da simulação do cenário 4.	169
Figura 76 – Resultado da Simulação do cenário 6.	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre sinalizadores de faltas disponíveis no mercado.	30
Tabela 2 – Tabela de Exclusão da análise da escolha do encapsulamento.	69
Tabela 3 – Tabela de Comparação da análise de escolha da tecnologia de encapsulamento do chip do sinalizador cabeça-de-série.....	72
Tabela 4 – Resultado Final da análise da escolha da tecnologia de encapsulamento.	72
Tabela 5 – Resultado alternativo para a análise da escolha do encapsulamento.....	73
Tabela 6 – Especificação técnica dos LEDs utilizados no equipamento do lote pioneiro do sinalizador luminoso de faltas (OPTOSUPPLY – 2009).	92
Tabela 7 – Tabela de Exclusão da análise da escolha da caixa de blindagem.	107
Tabela 8 – Tabela de Comparação da análise de escolha da caixa de blindagem.	109
Tabela 9 – Resultado Final da análise da escolha da caixa de blindagem do sinalizador de faltas. ..	110
Tabela 10 – Parâmetros característicos utilizados para simulação de uma linha de distribuição típica.	140
Tabela 11 – Parâmetros de simulação das cargas.....	141
Tabela 12 – Resultado da caracterização dos sinalizadores utilizados nos testes de descarga das baterias.....	149
Tabela 13 – Apuração da carga total de cada bateria utilizada no teste.	150
Tabela 14 – Especificação técnica do LED utilizado no equipamento sinalizador luminoso de faltas cabeça-de-série.....	152
Tabela 15 – Comparação entre LEDs com aberturas luminosas de 30° e de 70°.	161
Tabela 16 – Consumo de corrente do microcontrolador MSP430F133	175

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital (Conversor)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transient Program - Simulação de transitório eletromagnético
BT	Baixa Tensão
COB	Chip On-Board – Chip direto na placa
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
COMTRADE	Common Format for Transient Data Exchange – Formato Comum para Troca de Dados de Transitórios
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
DIP/DIL	Dual In-Line Package – Encapsulamento em linha dual
END	Energia Não Distribuída
FCI	Faulted Circuit Indicator – Sinalizador de Falhas
GPS	Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global
IED	Intelligent Electronic Device – Dispositivo Eletrônico Inteligente
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LED	Light Emitting Diode – Diodo Emissor de Luz
MADM	Multi Attribute Decision Models – Modelos de Decisão de Múltiplos Atributos
MT	Média Tensão
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PC	Personal Computer - Computador Pessoal
PC/PBT	Polycarbonato com poli(tereftalato de butila)
PCI	Placa de Circuito Impresso
PLC	Power Line Communication – Comunicação via Rede Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de energia elétrica
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition – Controle Supervisório e de Aquisição de Dados
TMAE	Tempo Médio de Atendimento à Emergência

TMD	Tempo Médio de Deslocamento
TME	Tempo Médio de Execução
TMP	Tempo Médio de Preparação
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. <i>ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO</i>	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. <i>MÉTODOS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS NAS REDES DE ENERGIA ELÉTRICA</i>	20
2.1.1. <i>Métodos de localização de faltas com medição centralizada</i>	20
2.1.2. <i>Métodos de localização de faltas com medição distribuída</i>	27
2.2. <i>PROCEDIMENTOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS E RESTABELECIMENTO DO SERVIÇO</i>	32
2.2.1. <i>Sem a utilização do Sinalizador de Faltas</i>	32
2.2.1.1. <i>Redes Urbanas</i>	33
2.2.1.2. <i>Redes parcialmente ou totalmente Rurais</i>	34
2.2.2. <i>Com a utilização de Sinalizadores Luminosos de Faltas</i>	35
2.3. <i>TEMPO MÉDIO DE ATENDIMENTO A OCORRÊNCIAS EMERGENCIAIS – TMAE</i>	37
2.3.1. <i>Tempo Médio de Preparação – TMP</i>	38
2.3.2. <i>Tempo Médio de Deslocamento – TMD</i>	38
2.3.3. <i>Tempo Médio de Execução – TME</i>	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. <i>EQUIPAMENTO SINALIZADOR LUMINOSO DE FALTAS CPFL</i>	41
3.1.1. <i>Princípios de Funcionamento</i>	41
3.1.1.1. <i>Sensor Indutivo de Corrente</i>	41
3.1.1.2. <i>Sensor Capacitivo de Tensão</i>	42
3.1.1.3. <i>Princípios de Funcionamento do Sinalizador Luminoso</i>	44
3.2. <i>METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO SINALIZADOR LUMINOSO DE FALTAS CPFL</i>	46
3.3. <i>METODOLOGIA DE ANÁLISE DA ROTA TECNOLÓGICA ADOTADA</i>	51
3.4. <i>ANÁLISE CRÍTICA DA ROTA TECNOLÓGICA ADOTADA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SINALIZADOR LUMINOSO CPFL</i>	51
3.4.1. <i>Escolha dos Princípios de Detecção de Faltas e Funcionalidades Agregadas</i>	52
3.4.1.1. <i>Lógica de funcionamento</i>	52
3.4.1.2. <i>Funcionalidades</i>	54
3.4.1.3. <i>Estudo da operação após elos fusíveis e determinação do ajuste do detector de tensão</i>	55
3.4.2. <i>Desenvolvimento da Eletrônica do Detector de Faltas</i>	57
3.4.2.1. <i>Utilização de microcontroladores</i>	59
3.4.2.2. <i>Integração do circuito em ASIC</i>	61
3.4.2.3. <i>Análise da escolha do encapsulamento do circuito microeletrônico</i>	65
3.4.2.4. <i>Atualização de projeto e fabricação do chip definitivo</i>	74
3.4.3. <i>Fontes de Alimentação</i>	75

3.4.3.1. Estudo da utilização de sistema de captação de energia da rede	76
3.4.3.2. Estudo da Captação de Energia Solar	78
3.4.3.3. Estudos da Utilização de Ultracapacitores	80
3.4.3.4. Estudos da Utilização de Bateria Não Recarregável	82
3.4.4. Sinalização Luminosa	85
3.4.4.1. Estudo do uso de lâmpadas de gás xenônio.	86
3.4.4.2. Estudo do uso de LEDs.....	89
3.4.5. Gabinete.....	92
3.4.5.1. Fixação (evolução)	93
3.4.5.2. Formato geral e acomodação de componentes	98
3.4.5.3. Vedação e estanqueidade	101
3.4.5.4. Método de fabricação	102
3.4.5.5. Produção da caixa de blindagem eletromagnética	104
3.4.5.6. Material e durabilidade do gabinete	111
3.4.5.7. Escolha do Material.....	112
3.4.5.8. Aspectos ligados ao trilhamento elétrico	114
4. RESULTADOS.....	118
4.1. EQUIPAMENTOS.....	118
4.2. PUBLICAÇÕES	120
4.3. PROPRIEDADE INDUSTRIAL.....	122
4.4. SISTEMA COMPUTACIONAL	122
5. CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	123
6. BIBLIOGRAFIA.....	131
APÊNDICE A – Alocação Otimizada de Sinalizadores de Faltas na Rede de Distribuição	137
APÊNDICE B – Simulação de Abertura Monopolar e Bipolar da Rede de Distribuição.....	139
APÊNDICE C – Montagem, procedimentos experimentais e resultados dos testes de descarga da bateria de alimentação.	144
APÊNDICE D – Análise da utilização de LEDs de Alto Brilho e de Alto Fluxo no Sinalizador Luminoso.	152
APÊNDICE E – Análise de uma falsa atuação do sinalizador luminoso causada por problemas na proteção do alimentador.....	162
ANEXO A – Tabela de Consumo de Corrente do microcontrolador MSP430F133	175

1. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de energia elétrica são, por natureza, susceptíveis a falhas. Essas falhas podem ocorrer por diversos motivos, sendo que os mais frequentes são as intervenções e erros humanos, as influências da natureza e de fenômenos climáticos e o desgaste dos materiais causado pela ação do tempo e do clima.

Por mais que se tenha investido no desenvolvimento de novas tecnologias para melhorar a suportabilidade da rede de energia elétrica aos fatores causadores de falhas, ainda não se chegou a uma solução economicamente viável para se proteger totalmente os elementos de rede, ou para se ter elementos de rede totalmente protegidos contra a ocorrência de falhas. Assim, as falhas permanecem inevitáveis.

A maioria das falhas da rede elétrica provoca curtos-circuitos. O curto-circuito pode ser entendido como “uma conexão anormal (incluindo um arco voltaico) de baixa impedância relativa, feita acidentalmente ou intencionalmente, entre dois pontos de potenciais diferentes” (IEEE, 1992). Pela aplicação direta da Primeira Lei de Ohm, a queda na impedância provoca um aumento de corrente, sendo este um dos principais sintomas observados numa rede de distribuição de energia elétrica quando ocorre um curto-circuito.

A rede de distribuição de energia elétrica conta com equipamentos de proteção que isolam o trecho defeituoso e extinguem no menor tempo possível a corrente de curto circuito, protegendo assim a própria rede elétrica. Entretanto, os consumidores de energia elétrica conectados ao trecho de rede que foi isolado do restante do circuito pelos equipamentos de proteção serão afetados com a interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Interrupções no fornecimento de energia afetam diretamente os indicadores da qualidade do serviço prestado pelas concessionárias distribuidoras, o que pode acarretar, em casos mais graves, em multas e sanções por parte do órgão regulador do setor elétrico nacional (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL). Portanto, tanto a frequência das interrupções do fornecimento quanto a duração dessas interrupções devem ser reduzidas ao mínimo.

No caso da ocorrência de uma falha na rede de distribuição de energia elétrica, em que haja a atuação de um equipamento de proteção e nenhuma das tentativas de religamento automático seja bem sucedida, é necessário consertar a rede antes de religá-la novamente ao sistema.

Parte importante da tarefa de consertar a rede elétrica é localizar o ponto exato do defeito. Essa tarefa não é simples. A inspeção visual de cada trecho da rede em busca do ponto exato do defeito é muito lenta e muitas vezes é também infrutífera, pois nem todos os defeitos ocasionam marcas ou deixam sinais facilmente observáveis e identificáveis na rede, tornando-se proibitivo que ela seja a única maneira de localizar defeitos na rede elétrica. A partir desse fato é que se tornam importantes as técnicas de localização de defeitos nas redes de distribuição de energia.

Voltando as atenções exclusivamente para as redes primárias de distribuição aérea em média tensão (que abrangem redes aéreas de 11,9 kV até 69 kV), as técnicas de localização do defeito incluem métodos tradicionais e mais modernos, que podem ser divididos em duas categorias básicas: métodos de localização de faltas a partir de medições centralizadas e métodos de localização de faltas a partir de medições distribuídas.

Nenhum desses métodos, isoladamente, permite alcançar o objetivo de redução máxima do tempo de localização de defeitos na rede aérea de distribuição de energia. A utilização conjunta de mais de uma técnica é o caminho para reduzir ao mínimo o tempo de localização do defeito na rede e minimizar o tempo de interrupção do fornecimento de energia elétrica para a população de consumidores afetados.

Neste trabalho se analisa o desenvolvimento de um equipamento detector de curto-circuito, realizado no âmbito do programa de Pesquisa e Desenvolvimento do setor elétrico nacional, regido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL - art. 4º, II da Lei 9.991/2000, alterado pela Lei 10.848, de 15/03/2004), numa parceria entre a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), Expertise Engenharia Ltda. e o Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas (PEA), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

O equipamento foi desenvolvido a partir de uma demanda da diretoria da empresa distribuidora de energia elétrica, elaborada aproximadamente no ano de

2002, que pedia um equipamento de sinalização luminosa de faltas, com autonomia de funcionamento de dez anos e mais barato que as soluções importadas de detecção e localização de defeitos na rede de distribuição de energia, com mais funcionalidades e maior confiabilidade do que os equipamentos similares produzidos no Brasil até então, e que fosse desenvolvido com tecnologia nacional, justificando sua inclusão no programa de P&D ANEEL.

O equipamento desenvolvido atendeu os requisitos básicos impostos pela demanda da diretoria da concessionária e foi bem aceito nos testes de campo já realizados, estando agora em fase de licenciamento para produção industrial e inserção no mercado.

O equipamento sinalizador luminoso de faltas consiste num dispositivo monofásico (exige a instalação de um dispositivo por fase, num total de três equipamentos em cada ponto da rede aérea de distribuição de energia elétrica que se deseje monitorar), de fácil instalação, com grande autonomia e vida útil, com custo relativamente baixo (se comparado com equipamentos similares importados), robusto e que se adapta automaticamente a várias redes de distribuição de energia sem necessidade de ajustes.

Sua funcionalidade básica é a seguinte: o equipamento sinalizador luminoso de faltas, composto por sensores de corrente e tensão, detecta a passagem de uma corrente de curto-circuito pelo ponto de instalação, seguida de uma queda de tensão causada pela interrupção do fornecimento de energia (devido à atuação de um equipamento de proteção da rede), sinalizando luminosamente a passagem de uma corrente de curto-circuito por aquele ponto.

A indicação do caminho da passagem da corrente de curto-circuito, a partir do equipamento de proteção atuado, leva a equipe de eletricitas de manutenção da rede diretamente até o ponto de defeito da rede elétrica. Utilizada ou não em conjunto com uma ou mais das técnicas de localização de defeitos com medições centralizadas, uma quantidade não muito grande de sinalizadores de faltas pode trazer grandes contribuições para a redução do tempo de localização de defeitos na rede aérea de distribuição de energia elétrica.

1.1. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica dos métodos de detecção e localização de faltas nas redes de distribuição de energia elétrica, dos procedimentos adotados pelas concessionárias distribuidoras para localização de faltas e restabelecimento do serviço em redes urbanas e rurais (com e sem a utilização dos sinalizadores de faltas) e da definição do indicador de qualidade de prestação de serviço TMAE, que é diretamente afetado pela utilização de sinalizadores luminosos de faltas nas redes de distribuição de energia.
- O Capítulo 3 (Materiais e Métodos) apresenta em detalhes a aplicação prática e o funcionamento do equipamento sinalizador luminoso de faltas desenvolvido pela CPFL. Apresenta também a metodologia adotada no desenvolvimento do sinalizador, todo o histórico desse desenvolvimento e uma análise crítica das rotas tecnológicas adotadas, com os seguintes focos principais: funcionalidades do equipamento; parte eletrônica; fonte de alimentação; sinalização luminosa; gabinete.
- O Capítulo 4 aborda todos os resultados obtidos nos projetos da linha de pesquisa de desenvolvimento do sinalizador de faltas da CPFL, sendo divididos em equipamentos, publicações, propriedade industrial e sistema computacional.
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões e comentários finais acerca das análises realizadas e elenca algumas sugestões de trabalhos futuros que complementam o desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso de faltas e o trabalho ora apresentado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MÉTODOS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS NAS REDES DE ENERGIA ELÉTRICA

Basicamente há dois enfoques básicos para a solução do problema de localização de faltas na rede de distribuição de energia elétrica: a determinação do trecho provável da ocorrência da falta através de medições centralizadas na saída do alimentador e/ou em pontos específicos da rede, e através de medições distribuídas em pontos espalhados ao longo do alimentador. Cada método de localização da falta tem suas vantagens e desvantagens, de maneira que podem se complementar num único sistema de localização de defeitos com resultados mais precisos e confiáveis.

A seguir são tratados detalhes obtidos na literatura a respeito de ambos os métodos, de modo a contextualizar a aplicação e a utilidade do sinalizador luminoso de faltas no processo de localização de defeitos nas redes aéreas de distribuição de energia elétrica.

2.1.1. Métodos de localização de faltas com medição centralizada

A rede de distribuição de energia elétrica, conforme descrita em IEEE (2005), apresenta algumas características peculiares que podem afetar a precisão e a confiabilidade da localização de faltas a partir de métodos baseados em medições centralizadas na subestação, principalmente se comparado com os sistemas de localização de faltas similares utilizados em redes de transmissão de energia elétrica. Em sua grande maioria, as redes de distribuição são radiais e muito ramificadas. A topologia ímpar de sistemas de distribuição solidamente aterrados apresenta muitos desafios para sistemas localizadores de faltas baseados em medições na subestação, sendo eles (IEEE, 2005; SINGER, 2005):

- A seção do condutor e a configuração da rede variam, tornando não lineares os cálculos de impedância e, por consequência, a relação entre a impedância da linha e a distância entre a subestação e o defeito.
- Múltiplas ramificações, produzindo medições idênticas de corrente e tensão na subestação para curtos-circuitos ocorridos em posições geográficas distintas.
- Modelos e dados do sistema imprecisos e configurações dinâmicas que podem afetar os resultados.
- É impossível estimar as correntes instantâneas de carga com exatidão e a corrente medida na subestação durante a falta inclui a contribuição da soma das correntes de cargas presentes ao longo do alimentador.
- Efeitos das impedâncias das faltas podem ser significativos.
- Há menos energia para estabelecer arcos “limpos”, ou seja, em geral os arcos voltaicos resultantes do defeito são intermitentes e irregulares.
- As evoluções das características e magnitudes das correntes de falta podem enfraquecer a habilidade dos equipamentos em determinar o tipo correto da falta.

As redes de distribuição de energia elétrica podem ter diferentes tipos de aterramento, que afetam as maneiras de determinar a localização da falta. Os tipos de aterramento são:

- Solidamente aterrada
- Redes Subterrâneas
- Peterson's Coil (através de indutor)
- Através de Resistências

Dos tipos listados acima a rede solidamente aterrada é a mais usual. A rede subterrânea requer transformadores de aterramento, que são distribuídos pela rede, resultando em menos fontes de corrente de terra. O efeito prático desse e dos outros dois tipos de aterramento é a redução da magnitude da corrente de terra. Isso pode ser visto como um aumento na impedância de sequência zero da fonte. Técnicas para localizar faltas nessas redes não vão diferir daquelas aplicadas em

redes solidamente aterradas, exceto pela redução de precisão das técnicas computacionais.

Apesar disso, sistemas de localização de faltas baseados em medições centralizadas na subestação são muito utilizados e contribuem significativamente para a redução no tempo da localização da falta, uma vez que restringem o universo de busca do ponto de defeito da rede para alguns trechos ou ramos do alimentador. Na literatura é possível obter informações sobre uma série de metodologias e técnicas que estão sendo utilizadas para detecção e localização de faltas baseados em medições centralizadas em redes de distribuição. As mais importantes são discutidas na sequência.

Um primeiro método de localização de faltas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica que se utiliza de medições centralizadas é o método de detecção de ondas viajantes. Lee e Mousa (1996) descrevem em seu trabalho a onda viajante como sendo o impulso eletromagnético criado pela abrupta mudança na magnitude da tensão no local do defeito, e que viaja pelo condutor em ambas as direções a velocidades próximas da velocidade da luz. A detecção na subestação dessas ondas viajantes e de suas reflexões permite determinar a distância até o defeito com boa precisão. O próprio trabalho de Lee e Mousa (1996) apresenta aplicação desse método em redes de transmissão de energia elétrica. Tang et al. (2000) analisam o fato dessa técnica de detecção ter sido adotada por diversas empresas distribuidoras de energia para superar as imprecisões e limitações dos tradicionais métodos de localização baseados em medições na frequência fundamental, mas relata a gradual perda de interesse e confiança neste método devido a problemas de manutenção e confiabilidade.

Outro método baseado em medições centralizadas é a detecção de sinais de altas frequências gerados por um defeito. Um exemplo de sistema de detecção de faltas que aplica esse método é apresentado por Bo; Weller e Redfem (1999). As vantagens descritas desse sistema são a precisão relativamente alta, o fato da precisão não depender da condição prévia do sistema e a boa precisão para localização de faltas de alta impedância. Uma desvantagem clara é o alto custo do equipamento necessário pela necessidade da alta taxa de amostragem dos sinais monitorados (acima de 20 MHz).

A localização da falta através da medição na subestação dos sinais de alta frequência de tensão se baseia na existência de sinais transitórios gerados na

falta, pela ocorrência de arcos elétricos e centelhamento. Os tempos de viagem das componentes de alta frequência são utilizados para determinar a posição da falta. Fazendo uma comparação com sistemas que se baseiam na medição de ondas viajantes, este sistema apresenta uma vantagem significativa: sempre que ocorrem arcos voltaicos existe a geração de componentes de alta frequência, independente do ponto da onda em que a falta ocorre. O mesmo não é válido para as ondas viajantes, que praticamente não existem quando a falta ocorre no momento que a tensão passa por 0°. Outra limitação do método de localização por ondas viajantes em comparação com o método de detecção de sinais de alta frequência são as ocorrências de faltas próximas à subestação, que dificultam a diferenciação entre a onda incidente e a onda refletida. Esse problema não afeta o método de detecção de componentes de alta frequência.

A utilização destes dois métodos em redes ramificadas pode gerar uma indicação de múltiplos trechos de provável localização do defeito, exigindo uma técnica complementar para determinação do ponto exato da falta, mas, mesmo sem a utilização de técnicas complementares de localização já existe um ganho significativo para as equipes de campo, que tem o universo de busca reduzido a alguns trechos específicos da rede. O isolamento, por meios manuais ou telecomandados, desses trechos (que deverão ser averiguados posteriormente em busca do defeito) permite o restabelecimento do fornecimento da energia elétrica para os trechos de rede sabidamente não afetados.

Outros tipos de métodos de localização de faltas, que operam de maneira centralizada na subestação ou no centro de supervisão e controle da rede de distribuição de energia elétrica, são fundamentados em sistemas “inteligentes”, baseados em regras e em bases de dados de conhecimento, operando através de redes neurais com aplicação ou não de lógica *fuzzy* para tratamento de incertezas. As vantagens básicas desses sistemas apoiam-se no fato deles serem auto-adaptativos e de alta precisão, e no fato de sua precisão não depender da condição do sistema.

Esses sistemas “inteligentes” de localização de faltas, de maneira geral, necessitam de uma base de dados completa sobre os componentes do sistema de distribuição de energia e sobre a topologia da rede de distribuição, contendo o estado operativo de chaves ao longo dos alimentadores e na subestação, além dos registros de alarmes do sistema supervisorio da rede. Todas

essas informações são utilizadas para realizar simulações, calcular fluxos de carga e fazer a estimação de estado do alimentador, visando determinar o provável ponto de defeito da rede. Uma desvantagem deste tipo de sistema é a necessidade dessas informações estarem sempre disponíveis e atualizadas para as análises que são realizadas no momento da falta. Informações inexistentes, imprecisas ou desatualizadas sobre a rede e seu estado operativo podem acarretar na falha do sistema em determinar o correto trecho de rede onde deve ter ocorrido o defeito.

Em Zhu; Lubkeman e Girgis (1997) é feita a identificação precisa do local da falta a partir da sua ocorrência, baseada na integração de informações disponíveis nos registradores de perturbações com o conhecimento contido na base de dados do alimentador de distribuição. O algoritmo é baseado na análise de regime permanente da rede de distribuição em falta. Para lidar com as incertezas inerentes ao modelamento do sistema e à estimação de fasores, o algoritmo de localização de faltas foi adaptado para estimar regiões de falta baseadas num modelo probabilístico e análises. É citada a existência de múltiplos candidatos para o local da falta, quando o alimentador é radial e ramificado. Por isso foi implementado um método de ranqueamento dos pontos candidatos a local da falta, baseados na integração de evidências colhidas do sistema.

Em Pereira et al. (2008) é apresentado um sistema baseado na análise de arquivos COMTRADE dos oscilógrafos da rede, junto com a topologia da rede e os ajustes da proteção. A partir dos valores RMS e ângulos de fase das tensões e correntes nos períodos de pré-falta, durante a falta e pós-falta calculados a partir do registro de oscilografias e, com base na topologia da rede, das informações das cargas instaladas no alimentador e nos ajustes dos dispositivos de proteção, foram feitas várias rotinas cuja decisão de localização de falta é a composição dos vários critérios, entre eles as perdas de potência, o nível de corrente de curto, o cálculo da reatância da linha durante o curto, a avaliação do religamento e o tempo de atuação das proteções. Cada uma dessas rotinas tenta definir, por critérios de peso (indicadores de probabilidade), quais são os dispositivos de proteção com maior probabilidade de terem atuado devido à falta. Quando se combinam as várias rotinas, os pesos (probabilidades) são somados, de modo a evidenciar o dispositivo de proteção da rede com maior probabilidade entre todos.

Em Oliveira et al. (2010) e Jarvetausta et al. (1994) são abordadas técnicas que se utilizam de lógica *fuzzy* para tratamento das incertezas dos

parâmetros envolvidos no sistema de distribuição de energia elétrica. No diagnóstico computadorizado de faltas nas redes de distribuição, o conhecimento heurístico dos operadores do centro de controle pode ser combinado com informações da base de dados da rede e do sistema SCADA. Contudo, a natureza do conhecimento heurístico é inexata e incerta. Além disso, as informações obtidas do sistema de monitoramento remoto contêm incertezas e podem estar incorretas, conflitantes ou inadequadas. Mesmo a utilização de detectores de faltas instalados ao longo do alimentador (medição distribuída) pode ser uma fonte de incerteza, pois os dispositivos espalhados pela rede não são totalmente confiáveis, podem estar quebrados ou desajustados. Por isso, os dois trabalhos propõem a utilização de lógica *fuzzy* para tratar as incertezas envolvidas no processo de localização de faltas.

Uma das maneiras mais utilizadas e mais diretas de se determinar prováveis localizações do defeito numa rede de distribuição de energia elétrica a partir de medições centralizadas na subestação é através do cálculo da impedância. Os equipamentos instalados na subestação que se utilizam deste método para localização de faltas são relativamente simples e baratos, pois necessitam de uma baixa taxa de amostragem do sinal, uma vez que o método se baseia em medições na frequência fundamental. Como desvantagens desses sistemas apresentam-se o fato da precisão depender da boa modelagem da rede e da precisão dos dados e parâmetros registrados sobre o sistema elétrico (incluindo sua topologia), a baixa precisão para localização de faltas de alta impedância e a baixa precisão para sistemas com chaveamento de cargas.

Existem trabalhos que apontam maneiras de tornar mais eficiente este tipo de método de localização, como o de Das, Sachedev e Sidhu (2000), que considera não-homogeneidades da linha, ramificações, bancos de capacitores e chaveamento de cargas. A base desta técnica de localização é a usual, consistindo na medição das tensões e correntes de falta e pré-falta no terminal da linha, além da análise de dados da linha e da carga presentes numa base de dados, utilizados num modo *off-line* para estimar a localização da falta. Se houverem bifurcações na rede, podem ser gerados múltiplos trechos onde se estima estar localizado o defeito.

Em Senger et al. (2005) e Manassero et al. (2005) é apresentado o desenvolvimento de um sistema automatizado para localização de faltas em redes de distribuição. O sistema é baseado em medições das grandezas elétricas nas

subestações, oscilografias dos sinais de tensão e corrente na ocorrência de eventos de sobrecorrente, base de dados com os parâmetros elétricos dos alimentadores de distribuição e sua topologia georreferenciada. O algoritmo de localização de faltas utilizado submete todos os trechos do alimentador investigado a um procedimento para determinar se um dado trecho delimitado por dois nós possui um possível ponto de falta. Isso é feito através da estimativa da distância ao nó inicial onde um curto-circuito produziria as mesmas tensões e correntes registradas na subestação. Caso essa distância, calculada pelo algoritmo, seja inferior ao tamanho do trecho em análise, este trecho possui um possível ponto de falta. Um resultado da aplicação prática em campo desse sistema foi apresentado no referido trabalho e é reproduzido na Figura 1 abaixo:

Figura 1 – Exemplo real de pontos localizados por sistema de localização de faltas por medição centralizada de tensão e corrente de frequência fundamental, em comparação com o ponto real da ocorrência (Manassero et al.- 2005).

Em resumo, existem diversos métodos de localização de faltas a partir de medições centralizadas para as redes de distribuição de energia elétrica, alguns mais caros, complexos e com maior precisão, outros mais baratos, rápidos e com menor precisão, mas nenhum que possa, em todo e qualquer caso, estimar um único ponto da rede onde deve ter ocorrido o defeito, permanecendo quase sempre a necessidade da equipe de campo patrulhar múltiplos trechos de rede. Isso ocorre pela natureza da topologia da rede de distribuição, que é ramificada e não uniforme. Por esse motivo, o uso de técnicas de localização de faltas a partir de medições

distribuídas, onde se insere a técnica de utilização dos detectores e sinalizadores de faltas estrategicamente posicionados ao longo da rede, é importante para evitar os problemas dos métodos de localização com medição centralizada, ou ainda para operar em conjunto com os métodos de localização com medição centralizada, melhorando a precisão e eficiência da localização do defeito e maximizando os benefícios de melhoria dos indicadores de qualidade da prestação do serviço das empresas distribuidoras de energia.

2.1.2. Métodos de localização de faltas com medição distribuída

Os métodos de localização de faltas com medição distribuída também podem ser baseados em detecção de componentes de altas frequências, como o método já citado no item anterior deste trabalho. Em Ei-Hami et al. (1992) tem-se a proposta de um sistema baseado na inserção estratégica e em intervalos convenientes ao longo da linha aérea de distribuição de energia de equipamentos de medição e monitoramento para observar componentes de alta frequência gerados devido a ocorrências de faltas e prover a localização dos defeitos. As faltas induzem um ruído de banda larga na linha e o equipamento, que possui um circuito de armadilha sintonizado, detecta a ocorrência da falta e a direção da seção faltosa. Com essas informações, provenientes de cada equipamento instalado ao longo da rede, é possível determinar o trecho do alimentador onde ocorreu o defeito. O detector de alta frequência presente no equipamento permite inclusive a apuração da ocorrência de vazamento de corrente em isoladores, o que não é possível com outras tecnologias.

Entretanto, o método mais usual de localização de faltas com medição distribuída é o de utilização de detectores e sinalizadores de faltas com sensores de campo elétrico e magnético, que monitoram a frequência fundamental de 60 Hz. Sua função principal não é determinar a localização da falta, mas sim indicar se a falta ocorreu ou não à jusante de seu ponto de instalação. Alguns equipamentos possuem funções diferenciadas, como detecção direcional de faltas e detecção de faltas de alta impedância.

Na literatura técnica foram encontrados alguns trabalhos que descrevem equipamentos dessa natureza e são apresentados na sequência do texto.

Em Krajnak (2000) é feita uma análise da aplicação de sinalizadores de faltas nas redes de distribuição de energia e o impacto positivo na confiabilidade do sistema. É dito que os sinalizadores sozinhos podem não prevenir desligamentos e outros problemas de confiabilidade do sistema elétrico, mas a aplicação de sinalizadores de faltas pode ajudar na identificação de áreas problemáticas da rede de distribuição de energia elétrica, bem como reduzir o tempo de patrulhamento das equipes de manutenção na localização de faltas, reduzindo assim a duração dos desligamentos. Utilizando menos tempo para identificar e localizar os defeitos, a produtividade da equipe cresce permitindo que mais tempo seja gasto na operação produtiva do sistema e implantação de melhorias na rede. Além da diminuição real do custo e aumento de produtividade para as concessionárias, a redução da duração dos desligamentos pelo uso do sinalizador de faltas pode aumentar a satisfação do consumidor. Visto que consumidores comerciais e industriais podem sofrer com significativa perda de receita pela produção perdida quando do desligamento de energia, minimizar a duração do desligamento pode levar a uma redução do prejuízo do consumidor causado por esses desligamentos.

Em Muench e Wright (1982) é apresentada uma variedade de equipamentos antigos de detecção de faltas, a maioria para redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica. Neste trabalho, os equipamentos foram classificados segundo seu tipo de rearme (manual, a partir da alta tensão, a partir da baixa tensão e a partir da corrente). Hoje em dia praticamente todos os equipamentos possuem rearme automático com restabelecimento da tensão, da corrente e por tempo, apresentando rearme manual apenas como método alternativo.

Em Abreu et al. (2008) é apresentado um equipamento detector de faltas desenvolvido para redes rurais de distribuição aérea de energia elétrica, alimentado por energia solar, posicionado no poste, que monitora campo elétrico e campo magnético das três fases da rede de distribuição. O campo elétrico é utilizado apenas para determinar a presença de tensão em uma, duas ou três fases da rede monitorada. O campo magnético é monitorado visando identificar um valor máximo, a partir do qual é considerada a existência de uma sobrecorrente de defeito, mas levando em conta também a forma de variação desse campo magnético. Esses

equipamentos possuem também um módulo de comunicação remota, informando seu estado operativo para uma central (detecção de falta – sobrecorrente e queda de tensão – ou detecção de queda de tensão).

Em Zambenedetti et al. (2010) é apresentado o desenvolvimento de um equipamento e sistema para detecção e localização de faltas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. O equipamento como um todo consiste em um IED e três sensores monofásicos de corrente. O IED, preso ao poste, retira sua energia de alimentação da rede BT, enquanto que os sensores de corrente, presos aos fios da rede de distribuição, retiram sua energia do campo magnético do próprio cabo. Os sensores se comunicam com o IED através de módulos de comunicação de curta distância e os IEDs, por sua vez, se comunicam com o sistema central através de PLC ou rádio. O sensor é composto por dois módulos, um indutivo e outro capacitivo, para medição de corrente (com certa exatidão) e tensão (com baixa exatidão). Mede-se também o ângulo entre corrente e tensão, viabilizando a detecção de manobra na rede, inversão do fluxo de potência ou alguns tipos de faltas. O circuito interno do sensor é basicamente composto de uma fonte, estágios de condicionamento do sinal, microcontrolador com A/D e módulo de comunicação. Esse detector faz parte do sistema de localização de faltas da COELBA, descrito em Santana; Almeida e Costa (2008) e Santana e Otaciano (2010).

Existem também diversos equipamentos comerciais disponíveis no mercado, que cumprem esse mesmo papel dos dispositivos citados acima. É possível fazer uma comparação entre os dispositivos, levando-se em conta alguns critérios e funcionalidades básicas, comuns a todos eles:

- Tipo de alimentação
- Classe de tensão para aplicação
- Tipo da sinalização
- Tipos de faltas detectadas
- Modo de rearme
- Tipo de Fixação

Baseando-se em catálogos de diversos equipamentos nacionais e importados e que estão disponíveis para compra no Brasil, foi possível montar a Tabela 1, a seguir, onde existe uma comparação entre dados indicativos sobre esses equipamentos feita a partir dos critérios citados acima e outros:

Tabela 1 – Comparação entre sinalizadores de faltas disponíveis no mercado.

Marca:	Linetroll	ENGRO	Febras	LOFA	Fisher Pierce	Edison Control	Schweitzer	Horstmann	CPFL
Modelo:	110Eu	IFTA 2000	Detectur	ICO	RFCl - 1548	EC-14	AR4	Navigator	Sin. Luminoso
Bateria									
<i>Tipo</i>	Lítio	Lítio	Eletromec.	Lítio	Lítio	Aliment.pela linha	Lítio	Óxido de lítio	Lítio
<i>Tensão / Carga</i>	3,6 V / 16,5 Ah	3,6 V / 6,5 Ah	-	3,6 V / 5,2 Ah	9 V	-	3,6 V / 8,5 Ah	4 x 3 V / 1,2 Ah	3,6 V / 6,5 Ah
<i>Troca / Vida útil</i>	7 a 8 anos	5 anos	-	10 anos	10 anos	-	15 anos	10 a 15 anos	10 anos
<i>Tempo de sinalização</i>	1200 h	400 h	-	?	800 h	-	2500 h	300 h	300 h
Linha de Distribuição									
<i>Tensão da Linha</i>	6 a 66 kV	3 a 36 kV	3,8 a 35 kV	6 a 36 kV	até 69 kV	?	4,16 a 69 kV	até 46 kV	11,9 a 69 kV
Sinalização									
<i>Luminosa</i>	SIM	SIM	-	SIM	SIM (Opcional)	SIM (Opcional)	SIM	SIM	SIM
<i>Bandeirola</i>	-	-	SIM	-	SIM (Opcional)	SIM (Opcional)	-	-	-
<i>Frequência sinalização</i>	?	Variável	-	?	?	?	?	30 / minuto	45 / minuto
Tipos de faltas - Permanente(P) e Transitória(T)									
<i>Fase-Terra</i>	SIM (P e T)	SIM (P)	SIM (P)	SIM (P)	SIM (P e T)	SIM (P)	SIM (P e T)	SIM (P e T)	SIM (P)
<i>Fase-Fase</i>	SIM (P e T)	SIM (P)	SIM (P)	SIM (P)	SIM (P e T)	SIM (P)	SIM (P e T)	SIM (P e T)	SIM (P)
<i>Rompimento de cabo</i>	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Modo de rearme									
<i>Manual</i>	SIM	SIM	-	SIM	SIM (Opcional)	-	SIM	SIM	SIM
<i>Automático por:</i>	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM (Opcional)	SIM	SIM	SIM	SIM
- <i>Tempo</i>	SIM	SIM (Program.)	-	SIM	SIM (Opcional)	SIM	SIM	SIM	SIM
- <i>Tensão</i>	SIM (Program.)	SIM (Program.)	SIM	SIM	SIM (Opcional)	SIM	SIM	SIM	SIM
- <i>Corrente</i>	SIM (Program.)	-	-	-	SIM (Opcional)	SIM	-	SIM	-
Outras Especificações									
<i>Estanqueidade</i>	SIM (IP - 54)	SIM (IP - 54)	-	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM (IP-65)	SIM (IP-X7)
<i>Imunidade a In-rush</i>	SIM	SIM	-	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
<i>Ajuste autom.corrente</i>	SIM (di/dt)	SIM (di/dt)	-	SIM (di/dt)	SIM (di/dt Opcin.)	-	SIM (di/dt)	SIM (se I > 30 A)	SIM (di/dt)
<i>Monofásico/Trifásico</i>	Monof.	Monof.	Monof.	Monof.	Monof.	Mono/Trif (Opcin.)	Monof.	Monof.	Monof.
<i>Mín. corrente de operação</i>	?	?	?	?	8A	1A	10A	3A	?
<i>Icc mínima de disparo</i>	?	Ajust.(200/500 A)	35A	?	50	25A	50A	100A	5 x Iccarga
<i>Faixa de temperatura (°C)</i>	-40 a 70	-40 a 70	-45 a 85	?	-45 a 85	-40 a 85	-40 a 85	-40 a 85	-40 a 85
<i>Precisão (25°C)</i>	?	+/-10%	+/-15%	?	+/-10%	+/-10%	?	+/-10%	?
<i>Diâmetro de linha (mm)</i>	5 a 24 mm	até 28 mm	5 a 26 mm	5 a 95 mm	5,08 a 30,48 mm	?	7,62 a 38,1 mm	8 a 27 mm	até 26mm
<i>Permite teste funcional?</i>	-	SIM	-	SIM	-	-	SIM (de bateria)	SIM	SIM
<i>Material do gabinete</i>	PC. c/ Anti-UV	?	?	?	PC. c/ Anti-UV	?	?	PC. c/ Anti-UV	PC-PBT+ Anti-UV
Tipo de fixação no cabo									
<i>Mola, garra ou grampo rosq.</i>	Garra	Grampo	Mola	Garra	Grampo	Garra	Mola	Garra	Grampo
Custo Unitário (R\$)									
<i>Com Impostos</i>	1.950,00	?	341,25	652,05	550,00	385,28	871,50	1.680,65	Fabricação: 150,00 Venda: 500,00

Na tabela comparativa acima estão presentes também dados sobre o sinalizador luminoso de faltas desenvolvido pela CPFL. É possível observar que são poucos os sinalizadores de faltas que ainda são eletromecânicos, apesar dos preços relativamente baixos associados a esse tipo de equipamento. A confiabilidade desses dispositivos é muito baixa e a falta de algumas funcionalidades básicas restringe seu uso, de forma que eles não apresentam vantagens práticas para as equipes de manutenção no momento da localização da falta.

A grande maioria dos sinalizadores utilizados atualmente é eletrônica, alimentada por baterias de Lítio-Íon não recarregáveis. Alguns poucos modelos são disponibilizados com sistemas de captação de energia da rede por necessitarem de uma corrente de carga mínima na linha monitorada (entre 10 A e 30 A) para que consigam recarregar suas baterias. Isso inviabiliza sua utilização em redes rurais extensas, que possuem baixas correntes de carregamento.

Nenhum equipamento é destinado para redes aéreas de tensão maior do que 69 kV, que já possui topologia semelhante a uma rede de transmissão. Isso se deve ao fato dos sistemas de localização de faltas baseados em medição centralizada funcionarem muito bem em redes dessa natureza, que não apresentam topologia radial ramificada.

A sinalização luminosa é a mais amplamente utilizada. Entretanto, sistemas de comunicação remota com os detectores de faltas estão sendo cada vez mais requisitados pelas concessionárias, e vê-se que alguns modelos já podem ser fornecidos com rádios de comunicação embutidos.

Conforme já foi dito anteriormente, os equipamentos ainda possuem modo de rearme manual, mas todos contam com pelo menos um tipo de modo de rearme automático, através da tensão, corrente e/ou tempo. É impensável que uma equipe de eletricistas tenha de percorrer a linha rearmando sinalizadores atuados depois de localizarem a falta e restabelecerem o sistema. Todo o ganho de produtividade da equipe trazido pelo uso de sinalizadores para localização da falta seria desperdiçado.

Os equipamentos mais completos já contam também com a funcionalidade de proteção contra corrente de *in-rush*, evitando detecção indevida de sobrecorrente no momento da re-energização da linha. Contam também com ajuste automático à corrente de carga da linha (função di/dt). Isto é totalmente desejável para que o dispositivo se adapte automaticamente às flutuações de carga

da linha ao longo do dia e ao longo do tempo, mesmo no caso de conexão de novos clientes ao alimentador ou na ocorrência de chaveamento de carga, sem necessidade de reajuste dos detectores por parte da equipe de eletricitas de manutenção de rede.

O que mais difere entre os equipamentos é o sistema de fixação destes ao cabo de distribuição de energia. O sistema de mola já foi muito utilizado, entretanto a dificuldade de instalação e retirada do dispositivo do cabo, muitas vezes necessitando de ferramentas especiais, fizeram os eletricitas preferirem atualmente sistemas de grampo rosqueável e sistemas de garras, nos quais só é necessário o bastão universal (vulgo bastão “pega-tudo”) para a instalação e retirada do dispositivo.

Tendo em mente a importância e a necessidade de equipamentos detectores e sinalizadores de faltas, seja para serem utilizados de maneira isolada ou em conjunto com outros sistemas de detecção de faltas baseados em medições centralizadas, e atendendo uma demanda do grupo CPFL por dispositivos dessa natureza com as diversas funcionalidades citadas acima e com o custo mais baixo possível para permitir a utilização massificada dessa solução em suas redes de distribuição de energia elétrica (principalmente em zonas rurais), foi desenvolvido o equipamento sinalizador luminoso de faltas da CPFL, através de um projeto do programa de P&D da ANEEL, que é o principal objeto de estudo deste trabalho.

2.2. PROCEDIMENTOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS E RESTABELECIMENTO DO SERVIÇO

2.2.1. Sem a utilização do Sinalizador de Faltas

Aqui se apresenta uma filosofia padrão (CPFL, 2007), similar à adotada por muitas concessionárias distribuidoras de energia, para localização de defeitos em redes aéreas de média tensão e posterior restabelecimento do serviço em regiões onde não existem sinalizadores de faltas instalados.

Efetuada as tentativas de religamento automático, novos testes só são executados após inspeção da linha. No caso específico de rede rural, dependendo da existência ou não de trechos com baixa probabilidade de risco a terceiros, é admitida uma tentativa adicional de religamento sem inspeção.

2.2.1.1. Redes Urbanas

Ocorrendo o bloqueio de equipamento de seccionalização, se o equipamento bloqueado for chave religadora ou seccionalizadora, inspeciona-se e testa-se o equipamento antes de se iniciar a inspeção e a normalização da rede. Constatada falha em disjuntor, chave religadora ou seccionalizadora, o equipamento problemático é desviado da rede para posterior manutenção, remanejando-se sua carga para outro circuito, se possível.

Se não forem constatadas falhas nesses equipamentos, inicia-se o processo de inspeção na rede para localização do defeito, que abrange todo o trecho supervisionado pelo equipamento de seccionalização atuado (disjuntor, chave religadora ou seccionalizadora). Na inspeção adotam-se os seguintes procedimentos, conforme a situação:

- Encontrado defeito no tronco: é feita uma tentativa de religamento, antes do término da inspeção, desde que o defeito possa ser isolado ou não impeça a re-energização. Não sendo aceita, continua-se a inspeção.
- Quando encontrado elo rompido em chave fusível de ramal da concessionária, é isolado o ramal com elo queimado, mesmo não estando concluída a inspeção, e é feito teste de energização em todo o trecho. Sendo aceito, é inspecionado o ramal. Não sendo aceito, continua-se a inspeção.
- Encontrado elo rompido em chave fusível de ramal particular, edifício de uso coletivo ou estabelecimentos em geral, após a isolação do ramal ou circuito particular com elo queimado, mesmo não estando concluída a inspeção, é feito teste de energização em todo o trecho. Sendo aceito, é mantido o ramal ou circuito particular desenergizado e contatado o proprietário para que inspecione o mesmo. Não sendo aceito, continua-se a inspeção.

- Quando não é encontrado nenhum elo de chave fusível de ramal rompido não é necessário fazer inspeção após as chaves fusíveis. Após o término da inspeção no tronco, não sendo encontrado defeito, é feito um teste de religamento. Não sendo aceito, deverão ser abertas as chaves fusíveis de ramais existentes conforme orientação do Centro de Operação e feitos novos testes de energização. Não sendo aceito, continua-se a inspeção. Neste caso é utilizado o método de inspeção trecho a trecho, ou seja, é inspecionada a rede até uma chave de manobra e, não sendo encontrado defeito, após sua abertura faz-se uma tentativa de energização apenas no trecho inspecionado. As escolhas das chaves a serem manobradas e, conseqüentemente, dos trechos a serem inspecionados para que sejam feitas as tentativas de energização, são feitas pelo operador do Centro de Operação, considerando-se informações sobre comprimentos dos trechos, localizações e disponibilidades de equipes de eletricitistas e existência de cargas essenciais.

Nos bloqueios de alimentadores que possuem Posto de Tele-controle de Rede (PTR) é dispensada a inspeção no trecho à montante da PTR, caso este equipamento registre sobrecorrente.

Somente é efetuada uma única tentativa de religamento por trecho, após a inspeção visual. Não sendo aceita, deverá ser feita nova inspeção minuciosa.

As tentativas de religamento em chaves a óleo trifásicas só são executadas após inspeção visual em toda a rede à jusante da chave, para confirmação da inexistência de condutor rompido, poste caído, “*flying-tap*” em curto-circuito ou outros defeitos críticos.

2.2.1.2. Redes parcialmente ou totalmente Rurais

Na parte rural da rede interrompida é verificada a existência de trecho rural de inspeção obrigatória. Estes trechos encontram-se identificados nos sistemas da concessionária, portanto exigem um tempo adicional de verificação. Para restabelecimento, estes trechos são considerados exatamente como urbanos, devendo ser seguidos os procedimentos para Redes Urbanas.

Para os trechos rurais não classificados como trecho rural de inspeção obrigatória poderá ser executada uma tentativa adicional de religamento sem inspeção, além das tentativas automáticas.

No caso de rede rural que possua tanto trechos classificados como trecho rural de inspeção obrigatória como trechos não classificados dessa forma, visando agilizar o restabelecimento, deverão ser manobradas chaves que isolem os trechos rurais de inspeção obrigatória para que os demais possam ser testados, também poderá ser executada uma tentativa adicional de religamento sem inspeção, além das tentativas automáticas.

2.2.2. Com a utilização de Sinalizadores Luminosos de Faltas

A localização de defeitos com a utilização de sinalizadores luminosos de faltas permite uma mudança no procedimento da equipe de manutenção.

Na ocasião da ocorrência de um defeito permanente, sustentado e interrompido por equipamento de proteção, os sinalizadores de faltas, localizados em pontos estratégicos e de fácil acesso à equipe de manutenção, permitem a imediata identificação do caminho percorrido pela corrente de curto-circuito, a partir da proteção trifásica atuada, conforme ilustra a Figura 2 abaixo:

Figura 2 – Indicação do defeito na rede de distribuição utilizando o Sinalizador de Faltas.

Por pontos estratégicos para instalação dos sinalizadores luminosos de faltas entendem-se pontos da rede que ajudarão a identificar o caminho até o defeito para a equipe de manutenção. Em geral, localizam-se logo após bifurcações do tronco do alimentador e dos ramais principais e logo após chaves seccionadoras

ao longo do tronco do alimentador (facilitando isolar o defeito e religar consumidores mais rapidamente).

O tronco principal do alimentador só precisa ser percorrido até a saída da ramificação sinalizada luminosamente. A única ramificação a ser percorrida é a que sofreu a falta.

A filosofia padrão de algumas concessionárias para localização de defeitos prevê nos casos de bloqueios de trechos de rede que possuem equipamentos sinalizadores de faltas que, caso haja registro de passagem de corrente de curto-circuito, seja isolado o trecho com indicação de defeito e realizada uma tentativa de religamento nos trechos restantes.

Portanto, pode-se isolar apenas o trecho defeituoso da rede e o fornecimento pode ser restabelecido imediatamente para todos os outros consumidores do alimentador. Os sinalizadores luminosos monofásicos permitem inclusive que a equipe de manutenção saiba antecipadamente em qual fase aconteceu a falta.

Fica então evidente a economia de tempo que pode ser obtida nos atendimentos às ocorrências emergenciais causadas por defeitos permanentes, com a utilização de sinalizadores luminosos de faltas, principalmente em alimentadores longos, ramificados e/ou de difícil acesso.

Esse estudo foi publicado pela equipe do projeto (ANDRADE et al., 2009), num artigo onde é possível compreender que o impacto da utilização do sinalizador de faltas se dá fortemente no tempo de deslocamento (TD) para atendimento desse tipo de ocorrência, pois a equipe percorre, a partir do equipamento de proteção trifásica atuado, o caminho exato da corrente de falta até o trecho onde ocorreu o defeito.

Eventualmente o tempo de execução (TE) também pode ser reduzido, pois os sinalizadores (que são monofásicos) indicam para a equipe de manutenção exatamente as fases que sofreram o defeito. Com o conhecimento da natureza do defeito (curto-circuito monofásico, bifásico ou trifásico), além de exatamente quais as fases envolvidas, a execução do reparo pode ser mais bem planejada e executada em tempo reduzido.

Na composição do TMAE, cujos detalhes e significados podem ser vistos a seguir, o sinalizador luminoso de faltas só não influencia diretamente no tempo de preparo (TP) da equipe de atendimento a ocorrências emergenciais.

2.3. TEMPO MÉDIO DE ATENDIMENTO A OCORRÊNCIAS EMERGENCIAIS – TMAE

Levando-se em consideração o PRODIST versão 2008 (ANEEL, 2008b), ocorrências emergenciais são definidas como sendo eventos na rede elétrica que prejudiquem a segurança e/ou a qualidade do serviço prestado ao consumidor, com consequente deslocamento de equipes de atendimento de emergência.

Mesmo ocorrências de naturezas improcedentes (defeitos internos no consumidor, por exemplo) são consideradas para os cálculos dos indicadores de qualidade. Na apuração dos indicadores só não são considerados: serviços na rede de iluminação pública; serviços de caráter comercial; reclamações relativas ao nível de tensão de atendimento (se não representarem risco à segurança); reclamações por interrupção programada (se os consumidores foram devidamente notificados conforme a legislação); e reclamações por interrupções em situações emergenciais.

O tempo médio de atendimento a ocorrências emergenciais, ou TMAE, é um indicador de qualidade de prestação de serviço das concessionárias distribuidoras de energia elétrica brasileiras, expresso em minutos, e definido como:

$$TMAE = TMP + TMD + TME \quad (1)$$

Onde:

- TMP é o tempo médio de preparação da equipe de atendimento de emergência, expresso em minutos;
- TMD é o tempo médio de deslocamento da equipe de atendimento de emergência, expresso em minutos;
- TME é o tempo médio de execução do serviço até seu restabelecimento pela equipe de atendimento de emergência, expresso em minutos.

Da eq.(1) vemos que o valor do TMAE depende de três valores médios distintos, que são detalhadamente apresentados a seguir.

2.3.1. Tempo Médio de Preparação – TMP

O primeiro valor que influencia diretamente no indicador TMAE é o tempo médio de preparação (TMP) das equipes de manutenção que fazem o atendimento emergencial da concessionária distribuidora. Mais especificamente, o TMP é a média dos tempos de preparação (TP) no período de apuração, conforme a eq.(2), para um determinado conjunto de unidades consumidoras:

$$TMP = \frac{\sum_{i=1}^n TP(i)}{n} \quad (2)$$

Onde:

- n é o número de ocorrências verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de observação;
- TP, expresso em minutos, é o tempo entre o conhecimento da existência de uma ocorrência e o início do deslocamento de uma equipe para o atendimento.

O TP é afetado pelo tempo levado para reunir uma equipe de manutenção, preparação e/ou checagem dos materiais, veículo, ferramentas e equipamentos de segurança necessários para realizar o atendimento.

2.3.2. Tempo Médio de Deslocamento – TMD

O segundo valor que influencia o TMAE é o tempo médio de deslocamento (TMD) da equipe de manutenção quando atendendo ocorrências emergenciais. O TMD é dado pela média dos tempos de deslocamento (TD) no período de apuração, conforme a eq.(3), para um determinado conjunto de unidades consumidoras:

$$TMD = \frac{\sum_{i=1}^n TD(i)}{n} \quad (3)$$

Onde:

- n é o número de ocorrências verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de observação;
- TD, expresso em minutos, é o tempo de deslocamento da equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial.

O TD é afetado pela disponibilidade de equipes próximas ao local da ocorrência e pela facilidade que esta equipe terá em localizar o local do problema ocorrido na rede elétrica para que, só então, se iniciem os trabalhos de reparo propriamente ditos.

2.3.3. Tempo Médio de Execução – TME

O último valor que influencia no indicador TMAE é o tempo médio de execução (TME) dos serviços de atendimento das ocorrências emergenciais até seu restabelecimento. O TME é a média dos tempos de execução (TE) no período de apuração, conforme a eq.(4), para um determinado conjunto de unidades consumidoras:

$$TME = \frac{\sum_{i=1}^n TE(i)}{n} \quad (4)$$

Onde:

- n é o número de ocorrências verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de observação;
- TE, expresso em minutos, é o tempo de execução do serviço até o restabelecimento do fornecimento pela equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial.

O TE é afetado, entre outros fatores, pelas informações que a equipe de manutenção tem sobre o defeito que gerou a ocorrência emergencial e pelos procedimentos utilizados para solucionar o problema.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. EQUIPAMENTO SINALIZADOR LUMINOSO DE FALTAS CPFL

O equipamento sinalizador de faltas desenvolvido pela CPFL, que rendeu um depósito de patente de modelo de utilidade no INPI Brasil (CPFL, 2006), que já foi publicado em congresso (SANTOS et al., 2007) e que é tema de estudo deste trabalho, tem como objetivo fundamental atuar em ocorrências emergenciais, reduzindo o tempo médio de deslocamento da equipe de manutenção de campo (TMD), parcela significativa do Tempo Médio de Atendimento à Emergência (TMAE), um dos indicadores de qualidade da prestação de serviço das concessionárias do setor elétrico brasileiro.

3.1.1. *Princípios de Funcionamento*

3.1.1.1. Sensor Indutivo de Corrente

Conforme mostrado na Figura 3 abaixo, uma corrente elétrica contínua i conduzida por um condutor linear produz um campo magnético B a uma distância R em torno do condutor, cujo módulo é definido pela Lei de Biot Savart, como sendo:

$$\left| \vec{B} \right| = \frac{\mu \cdot i}{2\pi R} \quad (5)$$

Figura 3 – Campo Magnético ao redor do condutor retilíneo.

Corrente elétrica alternada passando por um condutor linear, como é o caso dos fios e cabos das redes aéreas de distribuição de energia elétrica, irá produzir um campo magnético também alternado ao redor desse condutor.

Por sua vez, conforme a Lei de Faraday, um campo magnético que varia no tempo induz uma força eletromotriz num circuito elétrico próximo, com intensidade proporcional à variação desse campo magnético no tempo.

O sensor indutivo de corrente do equipamento sinalizador luminoso de faltas (ilustrado na Figura 4 abaixo) é composto de um núcleo aberto de material ferromagnético, com um de seus lados envolto por uma bobina condutora composta de 1000 espiras de fio. O núcleo do sensor concatena o campo magnético no interior da bobina, que produz uma diferença de potencial em seus terminais proporcional à corrente elétrica que percorre o condutor que está sendo monitorado.

Figura 4 – Sensor de corrente do equipamento sinalizador luminoso de faltas.

3.1.1.2. Sensor Capacitivo de Tensão

O sensor capacitivo de tensão do equipamento sinalizador luminoso de faltas tem por objetivo apenas determinar a presença ou ausência de tensão no

condutor da rede aérea de distribuição de energia que está sendo monitorado. É composto basicamente de uma chapa de cobre posicionada próxima ao condutor, sem contato elétrico entre eles.

Quando há tensão no condutor é induzida, através de uma rede de capacitâncias parasitas, uma tensão no terminal do sensor provocada pelo campo elétrico presente no entorno do condutor. Essa rede de capacitâncias parasitas é formada entre a chapa metálica e a caixa de blindagem eletromagnética do circuito eletrônico do equipamento (também feita de material metálico e que serve de terra virtual para o circuito), entre a chapa metálica e o condutor, entre o condutor e o solo e entre a caixa de blindagem do circuito eletrônico e o solo, conforme ilustrado na Figura 5 abaixo. A magnitude da tensão no terminal do sensor é proporcional à magnitude do campo elétrico presente próximo ao condutor, que por sua vez é proporcional à tensão da linha monitorada.

Figura 5 – Rede de capacitâncias parasitas do sensor de tensão.

Devido à variação das capacitâncias parasitas com as condições climáticas, com a distância entre a linha e o solo e com o tipo de solo sob a linha, a exatidão desse sensor (ilustrado nas Figuras 6 e 7 abaixo) é relativamente baixa, não permitindo a medição do valor da tensão, mas sim apenas a detecção da presença ou ausência de tensão no condutor. Essa determinação é feita, no equipamento sinalizador luminoso de faltas, através de uma comparação entre a tensão de saída do sensor capacitivo e uma tensão de referência ajustável presente na eletrônica do equipamento. Considera-se que há tensão nominal na linha monitorada quando as tensões na saída do sensor são maiores que a tensão de referência, ajustada propositalmente para sensibilizar o sensor com aproximadamente 0,75 pu da tensão nominal da linha, viabilizando a detecção de alguns tipos de faltas mesmo estando o equipamento sinalizador instalado a jusante de proteções monofásicas (chaves fusíveis, por exemplo), conforme estudo que é apresentado mais à frente neste trabalho.

Figura 6 – Chapa de cobre do sensor de tensão.

Figura 7 – Montagem do sensor de tensão, próximo ao condutor, abaixo do sensor de corrente.

3.1.1.3. Princípios de Funcionamento do Sinalizador Luminoso

O equipamento sinalizador luminoso de faltas, que pode ser visto na Figura 8 abaixo, possui a habilidade de monitorar a tensão do alimentador e de identificar as sobrecorrentes causadas por curtos-circuitos, ignorando as sobrecorrentes momentâneas causadas pelo efeito da magnetização de

transformadores (*in-rush*), além de se adaptar automaticamente à variação de carregamento da linha de distribuição que está sendo monitorada (di/dt).

Figura 8 – Equipamento Sinalizador Luminoso de Falhas.

O objetivo primário do equipamento sinalizador de falhas desenvolvido é detectar a passagem de uma corrente de curto-circuito no ponto de instalação, com consequente queda da tensão no alimentador monitorado, causada por atuação de equipamento de proteção da rede de distribuição de energia elétrica, conforme exemplificado na Figura 9 abaixo:

Figura 9 – Sequência de eventos que é detectada pelo equipamento Sinalizador Luminoso de Falhas.

Portanto, o equipamento monitora a variação instantânea do nível de corrente no ponto de instalação, além da presença ou ausência de tensão nessa linha. Por se tratar de um equipamento monofásico, as medições associadas à corrente e à tensão são feitas independentemente em cada uma das três fases dos pontos de instalação dos sinalizadores. Faltas monofásicas ou bifásicas serão sinalizadas por apenas um ou dois equipamentos, dependendo do tipo da falta ocorrida.

A informação necessária sobre o estado da tensão na fase do alimentador é traduzida num único dado binário, ou seja, “presente” ou “ausente”. Se for detectada tensão na fase após a ocorrência de uma sobrecorrente, certamente não terá ocorrido uma falta permanente. Neste caso, a variação de corrente será considerada como uma variação de carregamento da linha. A mudança do estado da tensão na fase para “ausente” pode indicar a ocorrência de uma falta caso aconteça dentro de um intervalo de tempo pré-definido após a detecção de um evento de sobrecorrente, pois indica que um equipamento de proteção pode ter atuado interrompendo a alimentação em função da sobrecorrente anteriormente detectada. Neste caso, a ausência de tensão que ocorre imediatamente após uma sobrecorrente é o gatilho para que o equipamento inicie a sinalização luminosa.

Desta forma, vê-se que a atuação do equipamento é efetiva quando se trata de ocorrências emergenciais causadas por curtos-circuitos na rede primária de distribuição de energia, de caráter permanente e sustentável, interrompidas por equipamentos de proteção. De fato, este tipo de ocorrência, que neste trabalho é chamada de “defeito permanente”, é o que causa a maior parte dos desligamentos de consumidores, sendo também o que causa maiores impactos nos indicadores de qualidade do serviço prestado pelas concessionárias distribuidoras.

3.2. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO SINALIZADOR LUMINOSO DE FALTAS CPFL

A demanda pelo equipamento sinalizador luminoso de faltas nasceu da necessidade enxergada pela Diretoria de Distribuição de Energia Elétrica da

concessionária de ter uma alternativa economicamente melhor, com grande autonomia de funcionamento e tecnicamente similar aos caros equipamentos detectores e sinalizadores de faltas importados, que seriam necessários a partir daquele momento para que pudessem ser cumpridas as crescentes exigências do órgão regulador brasileiro por melhoria da qualidade do serviço prestado e redução do tempo de desligamento da rede de distribuição.

Através de um projeto de pesquisa executado dentro do até então recente programa de P&D da ANEEL, apenas pela Universidade em parceria com uma empresa de Base Tecnológica, foram feitos os primeiros levantamentos e testes de viabilidade técnico-econômica das tecnologias que seriam aplicadas ao equipamento de detecção e sinalização de faltas, cuja versão comercial seria obtida anos mais tarde. Este primeiro projeto iniciado em 2002 foi intitulado *“Desenvolvimento de Novo Sinalizador de Falta para Redes de Distribuição até 69 kV, Baseado em Guia de Luz”*.

Nesta primeira etapa de desenvolvimento foram feitos os primeiros protótipos do sensor de corrente, do sensor de tensão e da eletrônica contendo da lógica de detecção de faltas do equipamento, tudo visando à execução de testes de laboratório para comprovação da viabilidade técnica do produto. De imediato foi descartada por questões técnicas e econômicas a utilização de guias de luz no dispositivo, conforme o título original do projeto. Os protótipos do sensor indutivo de corrente e capacitivo de tensão foram aprovados tecnicamente e seguiram fazendo parte do equipamento. Depois de realizados testes de detecção de faltas no Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP (IEE/USP), um conjunto maior de protótipos completos e funcionais do sinalizador luminoso de faltas foi confeccionado para realização de testes de campo. Os resultados desses testes indicaram para a equipe de projeto a real complexidade do problema e a dimensão do conjunto de tecnologias distintas que deveriam ser mais bem estudadas e aplicadas ao equipamento, de modo que este atingisse um patamar de funcionalidade e confiabilidade que permitisse sua aplicação real em campo e sua comercialização.

O segundo projeto sobre o assunto, que passou a ser uma linha de pesquisa dentro do programa de P&D da CPFL, avançou no desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso de faltas a partir dos dados colhidos e dos problemas detectados durante os testes de campo com os protótipos do primeiro

projeto. Este segundo projeto, iniciado em 2004, era intitulado “*Desenvolvimento de Cabeça-de-Série do Sinalizador de Faltas - Incremento Tecnológico e Certificação*”.

Como esta segunda fase do desenvolvimento se tratava de um projeto cabeça-de-série, o produto esperado era um equipamento em fase pré-industrial, já agregando todas as tecnologias necessárias para tornar o equipamento comercializável e passível de certificação técnica. O desenvolvimento se abriu em duas frentes principais distintas. A primeira delas era a de desenvolvimento da eletrônica do equipamento, incluindo um chip microeletrônico de baixo consumo de energia dedicado para a aplicação. A outra era o desenvolvimento do gabinete plástico do equipamento, especialmente projetado para a utilização direta nos cabos da rede aérea de distribuição de energia elétrica, sob ação constante do clima. Além disso, desenvolveu-se a ferramenta para fabricação desse gabinete, no caso, foram confeccionados moldes protótipos para injeção de termoplásticos. Neste projeto, o arranjo de instituições que passaram a fazer parte do desenvolvimento passou a ser bem maior. O arranjo interinstitucional montado contava com centros de pesquisa e desenvolvimento em microeletrônica, serviços de *foundry* contratados no exterior, projetistas mecânicos e ferramentarias para desenvolvimento do gabinete e confecção dos moldes protótipos de injeção de todas as peças plásticas do equipamento, empresas de confecção e montagem de placas e equipamentos eletrônicos e laboratórios terceirizados para testes e certificações do sinalizador luminoso de faltas, além da Universidade e da empresa de Base Tecnológica (que continham os integrantes da equipe de desenvolvimento do projeto).

Neste projeto cabeça-de-série, mais da metade dos recursos e da dedicação da equipe de desenvolvimento tiveram que ser dispensados para a parte mecânica do equipamento, que se mostrou crítica para a aplicação. O resultado foi um produto pré-industrial, certificado para aplicação prática através de testes de laboratório e de campo e patenteado como Modelo de Utilidade (CPFL, 2006). Alguns problemas relacionados à confiabilidade do gabinete plástico e do chip microeletrônico foram detectados na produção dos protótipos para aplicação em campo, o que exigiria um reprojeito antes da comercialização.

Dentro da linha de pesquisa de detecção e sinalização de faltas, em 2006 foi iniciado um projeto de desenvolvimento experimental de um equipamento detector de faltas com sinalização remota, através de rede de comunicação sem fio. A base desse novo equipamento foi o cabeça-de-série do sinalizador luminoso de

faltas. Este novo projeto foi intitulado “*Localizador de Faltas com Comunicação Sem Fio*” e teve por objetivo resolver os problemas encontrados nos testes de campo com o equipamento cabeça-de-série do sinalizador luminoso de faltas, trazendo sua tecnologia para um patamar de aplicação comercial, ou seja, com maior confiabilidade e robustez, além de oferecer um avanço tecnológico importante para o dispositivo que permite a máxima redução no tempo de localização de defeitos na rede, que é a comunicação da detecção de faltas para um ponto central remoto, onde ocorre o despacho das equipes de manutenção. Neste projeto também existia um arranjo interinstitucional complexo similar ao projeto do equipamento cabeça-de-série, mas com a adição da empresa de consultoria em telecomunicações contratada como terceira para auxiliar no desenvolvimento da rede *mesh* de detectores de faltas espalhados na rede aérea de distribuição de energia elétrica. Um novo gabinete foi desenvolvido para o equipamento além de novos moldes de injeção (agora definitivos). O novo gabinete rendeu um pedido de patente de invenção para a equipe do projeto (CPFL, 2009). Um novo chip microeletrônico proprietário, mais confiável, também foi desenvolvido e fabricado em maior quantidade. Os protótipos de campo do rastreador de faltas, somando 200 unidades, foram instalados na rede da CPFL em Campinas/SP, onde foram acompanhados por 6 meses com bons resultados práticos.

Dado que os problemas do equipamento cabeça-de-série foram resolvidos no seu projeto subsequente e visando fechar o ciclo de desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso de faltas, foi desenvolvido a partir de 2009 o projeto de Lote Pioneiro e Inserção de Mercado do dispositivo, intitulado “*Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador de Faltas Luminoso*”. Isso foi possível através da mudança do manual de P&D da ANEEL em 2008 (ANEEL, 2008a), que abriu a possibilidade das concessionárias investirem seus recursos de pesquisa nas fases finais de desenvolvimento dos produtos de suas pesquisas, trazendo-os para o mercado. Os objetivos deste projeto foram o de produzir em escala piloto equipamentos sinalizadores de faltas para realização de ensaios, certificações e instalação na rede de distribuição da CPFL, validar a eficiência do equipamento e comprovar os seus principais benefícios para a concessionária, além de desenvolver a metodologia e software de otimização da aplicação de sinalizadores de faltas na rede de distribuição, com vistas à redução do tempo de atendimento às ocorrências emergenciais. O arranjo interinstitucional de

desenvolvimento deste projeto foi remodelado, conforme a Figura 10 abaixo, para encaixar o parceiro industrial no projeto:

Figura 10 – Arranjo interinstitucional de desenvolvimento do projeto de Lote Pioneiro do equipamento sinalizador luminoso de Faltas (Ferreira, 2011b).

As etapas de inserção de mercado do projeto incluíram visitas a várias concessionárias distribuidoras do Brasil para apresentação e demonstração do produto, realização de pesquisa de mercado sobre o equipamento e divulgação do desenvolvimento e do produto em diversas feiras e congressos do setor elétrico. A aceitação do equipamento foi boa e demonstrou um grande potencial de venda assim que sua tecnologia for licenciada para um fabricante.

A linha de pesquisa em detecção e sinalização de faltas da CPFL não se encerra com o projeto de Lote Pioneiro do sinalizador luminoso, pois deverá prosseguir ainda até a inserção de mercado do equipamento rastreador de faltas com comunicação sem fio.

3.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE DA ROTA TECNOLÓGICA ADOTADA

A análise comparativa entre diversas tecnologias e produtos industriais requer, em diversos casos, a comparação entre múltiplos dados e variáveis que em geral não são diretamente comparáveis entre si. Os dados e variáveis considerados para análise podem ser não apenas quantitativos, mas também qualitativos e estratégicos, de modo que é necessário um método de “normalização” entre todos os dados, tornando-os comparáveis, viabilizando o método analítico usual de tomada de decisão.

Através de levantamento feito na literatura sobre o assunto, chegou-se a um método que atende bem aos requisitos do problema e pode ser utilizado como base para proposição da nova ferramenta de análise para projetos de desenvolvimento de produtos tecnológicos. Esse método, inicialmente proposto por Chalos (1992), foi também utilizado por Haber (2004, 2006), na análise de viabilidade de projetos industriais. Haber exaltou sua propriedade para análise de projetos desse tipo porque leva em consideração fatores qualitativos e estratégicos muito utilizados, que não são considerados em métodos de análise financeira.

Adaptando o trabalho de Chalos para a necessidade aqui presente de comparação e tomada de decisão entre tecnologias aplicáveis num produto industrial, será utilizado um método de análise dividido em três fases: a primeira quando se exclui soluções incompatíveis com os requisitos mínimos do projeto; a segunda quando se atribui pesos e notas normalizadas para as principais características das soluções que se deseja comparar (sejam elas quantitativas, qualitativas ou estratégicas); a terceira quando se apura o conceito ou nota final de cada solução em estudo, obtendo-se o resultado que indica a solução mais adequada para o problema que está sendo tratado.

3.4. ANÁLISE CRÍTICA DA ROTA TECNOLÓGICA ADOTADA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SINALIZADOR LUMINOSO CPFL

3.4.1. Escolha dos Princípios de Detecção de Falhas e Funcionalidades Agregadas

Nos subitens a seguir, são apresentados e discutidos estudos e levantamentos realizados que levaram às definições das funcionalidades do equipamento sinalizador luminoso de faltas.

3.4.1.1. Lógica de funcionamento

Antes do surgimento dos sinalizadores de faltas eletrônicos importados, era muito comum nas concessionárias distribuidoras de energia nacionais a utilização de sinalizadores de faltas eletromecânicos, que sinalizavam seu estado operativo através de bandeirolas. Esses dispositivos possuíam alguns atrativos como o baixo custo e a simplicidade na operação. Seu funcionamento era muito simples: um gatilho de corrente (*trip*) era ajustado no dispositivo de maneira que, se tal valor de corrente fosse ultrapassado devido à ocorrência de um curto-circuito na linha, um mecanismo eletromecânico atuava, mudando a posição da bandeirola e sinalizando a passagem de uma sobrecorrente pelo ponto de instalação, o que indicaria o caminho até o defeito para a equipe de eletricitas.

Entretanto, esses dispositivos deixaram de ser empregados devido a problemas de ordem prática detectados durante sua utilização. Muitas indicações falsas de defeitos ocorriam na rede, diminuindo sua confiabilidade. Quando a corrente média do alimentador monitorado se elevava com a instalação de novas cargas, o *trip* de corrente fixo fazia com que os equipamentos ficassem atuados indefinidamente. Dificuldades de instalação e manutenção, fora a dificuldade de visualização da bandeirola de sinalização no período noturno, fez com que muitos desses equipamentos fossem abandonados na própria rede elétrica sem função.

Nesse cenário, surgiu a demanda por um equipamento nacional, com baixo custo e simplicidade de operação similar aos equipamentos eletromecânicos já em uso nas concessionárias distribuidoras, mas com maior confiabilidade e

funcionalidades similares aos equipamentos importados, que eram disponibilizados no Brasil a preços inviáveis para instalação massificada desses dispositivos.

Visando contornar os problemas dos equipamentos eletromecânicos e, no mínimo, se equiparar em funcionalidade com os melhores equipamentos importados, o sinalizador luminoso de faltas foi idealizado desde o início de seu desenvolvimento para ter a máxima confiabilidade na sinalização de faltas, reduzindo ao mínimo as indicações falsas de defeito na rede.

Para tanto, a lógica de funcionamento do equipamento acompanha a lógica de atuação da proteção da rede elétrica e de alguma maneira se “coordena” com ela, melhorando muito a confiabilidade do dispositivo. Assim como os relés de proteção de sobrecorrente, o dispositivo desenvolvido monitora a variação de corrente na linha em busca de variações bruscas e em patamares maiores do que os que seriam usuais para cargas conectadas à rede. A “coordenação” do equipamento sinalizador luminoso de faltas com a proteção se dá através da detecção da presença de tensão na linha.

Para que o equipamento fosse simples e com custo mais acessível que os equipamentos importados, sua eletrônica e sua inteligência também deveriam ser simplificadas. Com uma eletrônica simplificada, a maneira mais natural encontrada para se obter confiabilidade foi a de simular o relé de proteção de sobrecorrente (que é um equipamento caro e muito mais preciso que o sinalizador monofásico) para disparar a sinalização luminosa. O sinalizador luminoso de faltas detecta as variações de corrente em níveis que podem indicar a passagem de uma corrente de curto-circuito no ponto de instalação. Entretanto, a sinalização luminosa só é acionada após a detecção da atuação da proteção, que se dá pela detecção da queda da tensão na fase monitorada. Dessa forma, eventos de sobrecorrente causados por variações de carga, partidas de grandes motores, entre outros, podem até sensibilizar o detector de sobrecorrente do equipamento sinalizador luminoso, entretanto, se o evento não for classificado como uma falta pelo relé de sobrecorrente, que possui uma sofisticação muito maior para determinar a ocorrência do curto-circuito, a sinalização não é acionada porque ainda haverá tensão na linha.

Dessa forma, ajustando o sensor de corrente do equipamento sinalizador luminoso de faltas para detectar sobrecorrentes de maneira mais sensível que os relés de sobrecorrente e condicionando a sinalização luminosa à

queda de tensão na linha, é possível sinalizar a passagem de uma corrente de curto-circuito pelo ponto de instalação com uma precisão e confiabilidade muito maior que os equipamentos que se utilizam apenas de um valor de *trip* de corrente para sinalizar a passagem da corrente de defeito.

A detecção da tensão também permite o rearme automático do dispositivo assim que o fornecimento da energia é restabelecido pelas equipes de manutenção, eximindo as equipes de manutenção da necessidade de percorrer todos os sinalizadores atuados para realização do rearme manual.

3.4.1.2. Funcionalidades

Mesmo com essa lógica de funcionamento que atrela a sinalização da falta à atuação da proteção à montante do ponto de instalação, alguns problemas de detecção de faltas poderiam ocorrer se as seguintes funcionalidades não fossem acrescentadas:

- **di/dt:** sistema de ajuste automático e contínuo do monitoramento da corrente do alimentador, de maneira que haja um ajuste automático ao nível de carregamento da rede ao longo do tempo. A sobrecorrente é sempre determinada a partir de um valor médio (integrado) da corrente até aquele instante. Isso impede que o sinalizador luminoso tenha falsas atuações por variação de carga na linha, ou deixe de detectar defeitos caso a corrente de curto-circuito seja baixa.
- **Anti *In-rush*:** No momento do religamento da linha de distribuição, seja após a ocorrência de uma falta ou da ocorrência de um desligamento programado para manutenção, há uma corrente muito alta passando de maneira transitória no alimentador que é ocasionada pelo processo de magnetização dos núcleos dos transformadores da rede. Essa corrente alta acontece num pequeno período de tempo. Nos ramais onde há sinalizadores e não ocorreram defeitos, essa corrente de magnetização pode sensibilizar o equipamento, ocasionando falsas sinalizações devido ao *in-rush*. Para contornar o problema

foi utilizado o método de desligar o módulo detector de sobrecorrente durante o período em que ocorre a magnetização dos núcleos dos transformadores. Esse período de inibição do sensor de sobrecorrente no equipamento sinalizador luminoso de faltas é de 300 ms, que é mais do que o suficiente para que as correntes de *in-rush* já tenham desaparecido da rede, pois o fenômeno do *in-rush* perdura por apenas alguns ciclos. De maneira geral, pode-se dizer que após 100 ms seu efeito já é desprezível. No sinalizador foram utilizados 300 ms de inibição do detector de sobrecorrente por questões de segurança e aumento da confiabilidade.

- **Rearme automático por retorno da tensão e por tempo:** Além do rearme automático baseado no retorno da tensão, já explicado anteriormente, o equipamento sinalizador luminoso conta com rearme manual (acionado externamente com um ímã acionando um sensor magnético) e um rearme automático por tempo. Este último foi adicionado ao equipamento para economia de bateria e está pré-ajustado na lógica do equipamento para 3 horas de sinalização. Esse tempo é mais do que o suficiente na maioria dos casos para localizar a falta.
- **Auto-teste:** Feito também com acionamento externo por ímã, o auto-teste permite ao usuário do dispositivo verificar se a eletrônica e o estágio de sinalização luminosa estão operando de maneira adequada. Permite também que o usuário do equipamento o posicione acionado na rede de distribuição, verificando de imediato se o rearme de tensão está atuando de maneira correta e se o ajuste do detector de tensão foi feito de maneira satisfatória.

3.4.1.3. Estudo da operação após elos fusíveis e determinação do ajuste do detector de tensão

A maioria dos equipamentos detectores e sinalizadores de faltas existentes no mercado possuem uma restrição básica de aplicação, que é a

impossibilidade de instalação a jusante de chaves fusíveis da rede de distribuição de energia.

Isso se deve ao fato da ligação dos transformadores de distribuição ser feita, geralmente, na configuração delta-estrela aterrada. A ligação do primário na média tensão em delta faz com que ocorra o retorno de tensão no caso de aberturas monopolares ou bipolares da proteção.

Foram feitas simulações computacionais em ATP com o intuito de determinar exatamente a magnitude da tensão remanescente em cada fase da rede aérea de distribuição a jusante de uma proteção com possibilidade de abertura monofásica e bifásica. Os resultados dessas simulações permitiram adaptar o equipamento sinalizador luminoso de faltas, objeto de estudo deste trabalho, para operar de maneira adequada mesmo se instalado após proteções que permitam a abertura monopolar da rede elétrica.

O modelo de simulação utilizado consiste em uma fonte de tensão AC em 60 Hz, simulando a Subestação; na sequência foi adicionado um trecho de linha, que representa o tronco do alimentador, com parâmetros de resistências, indutâncias e capacitâncias calculados para 10 km de linha; a seguir foi adicionada uma chave temporizada em cada fase da linha primária, utilizada para simular a abertura do elo fusível durante a simulação; na sequência foi posicionado o transformador de distribuição, na configuração delta-estrela aterrada, com primário ajustado para a tensão de alta que estiver sendo utilizada, e secundário para tensão de linha de 220 V (simulação de cargas residenciais e comerciais); além disso, outro conjunto de chaves temporizadas foi adicionado ao secundário do transformador, para simular desbalanceamentos de carga; por fim, foi adicionada uma carga RLC típica, simulando consumidores residenciais e comerciais.

Detalhes da simulação podem ser vistos no APÊNDICE B deste trabalho. Os resultados indicaram que no caso de abertura monopolar, a tensão refletida na fase aberta é da ordem de 0,5 pu e, no caso de abertura bipolar, a tensão refletida é de 1 pu nas duas fases abertas

Esse resultado permitiu definir o ajuste do nível de detecção de tensão do equipamento sinalizador luminoso de faltas como sendo 0,75 pu, de maneira que o dispositivo detector de faltas identificasse uma queda de tensão quando houvesse uma falta monofásica interrompida por uma abertura monopolar de elo fusível. Desta forma, o equipamento sinalizador luminoso de faltas pode ser instalado após chaves

fusíveis, ao contrário de outros equipamentos de mercado que detectam tensões a partir de níveis muito baixos, não identificando a abertura de um único elo fusível da rede.

A ressalva é feita no caso de abertura bipolar de elos fusíveis. Dado que a tensão em todas as fases permanece em 1 pu e que o equipamento sinalizador luminoso de faltas é monofásico e não monitora a fase dos sinais de tensão e corrente, fica impossível a detecção de uma abertura bipolar de elos fusíveis. A falta que gerar uma atuação da proteção dessa natureza não será detectada.

3.4.2. Desenvolvimento da Eletrônica do Detector de Faltas

Antes da montagem em bancada e testes com a circuitaria eletrônica do equipamento sinalizador luminoso de faltas, foi feito um esquema lógico dos principais blocos que deveriam constituir essa eletrônica, onde estão representadas as principais funções do dispositivo sinalizador luminoso e o método utilizado para implementar na prática essas funções.

Os sensores de tensão e corrente, imersos respectivamente no campo elétrico e magnético da linha de distribuição de energia elétrica, são sensibilizados pela presença de tensão na linha e pela variação de corrente. Os sinais provenientes dos sensores são conectados a comparadores, que determinam se o valor da corrente no cabo ultrapassou um patamar pré-estabelecido e se a tensão reduziu-se a um valor abaixo de 0,75 pu, caracterizando um curto-circuito interrompido por equipamento de proteção da rede. A saída dos comparadores é conectada a uma lógica que faz o acionamento do bloco oscilador que comanda a sinalização luminosa e também faz o rearme automático do equipamento. Todo o circuito é alimentado por uma única fonte de alimentação, no caso, uma bateria de lítio-íon de 3,6 V, conforme ilustrado na Figura 11 abaixo:

Figura 11 – Descrição lógica do primeiro protótipo do equipamento sinalizador luminoso de faltas.

Para realizar os primeiros testes de viabilidade técnica as primeiras implementações de protótipos rudimentares do equipamento sinalizador luminoso de faltas foram feitas utilizando circuitos baseados em componentes eletrônicos discretos, como o apresentado na Figura 12 abaixo. Dessa forma foi possível testar de maneira rápida e barata diversas implementações do esquema lógico até definir qual era a mais adequada para a aplicação final.

Figura 12 – Circuito eletrônico discreto do primeiro protótipo de teste de viabilidade técnica do sinalizador de faltas.

É possível identificar no circuito eletrônico da Figura 12 acima alguns blocos principais, como o detector de tensão, o detector de sobrecorrente, o oscilador, o bloco que executa as lógicas de detecção de falta e rearme do equipamento e o “*flasher*”. Nota-se que todos foram implementados com muitos comparadores analógicos e CIs digitais com portas lógicas, contadores e temporizadores CMOS. Um dos critérios para a escolha dos componentes foi o consumo de corrente de cada um para realização de suas funções, já visando a operação na rede de distribuição de energia elétrica. Entretanto, mesmo com esse cuidado, verificou-se que todos esses componentes operando em conjunto apresentavam um consumo de corrente proibitivo para a utilização prática apenas com a fonte de alimentação própria do equipamento. O consumo de energia desse circuito montado em “*proto-board*” estava girando em torno de 1,4 mW, drenando uma corrente da bateria de 400 μ A.

Para tornar viável sua utilização prática na rede de distribuição de energia elétrica por longos períodos sem necessidade de manutenção, seria necessário reduzir drasticamente a quantidade de componentes no circuito eletrônico do sinalizador. A meta mínima seria reduzir esse consumo de corrente para 20 μ A. O ideal seria a redução ainda maior, tendo uma corrente quiescente de apenas 10 μ A.

3.4.2.1. Utilização de microcontroladores

A maneira mais prática e rápida de substituir todos os blocos de componentes citados no item anterior seria trocá-los por um único microcontrolador com entradas conversoras de sinais analógico/digital (A/D).

Esse componente sozinho poderia executar todas as funções de leitura dos sinais de tensão e corrente, a comparação com os níveis de referência, a execução da lógica de detecção de faltas e o acionamento da sinalização visual, bastando para isso possuir duas entradas conversoras analógico/digital (A/D) e temporizadores em quantidade suficiente para suprir a lógica de detecção de faltas, rearme automático e comando da sinalização luminosa.

Nesta fase do projeto, foram buscadas opções de microcontroladores com essas características e com consumo de corrente da ordem de apenas 10 ou 20 μA , sem sucesso.

Mesmo nos dias de hoje não é simples encontrar microcontroladores com as funcionalidades desejadas e o baixo consumo de corrente requerido, mas já existem famílias de componentes que poderiam ser utilizadas nessa aplicação.

Como exemplo tem-se a família de microcontroladores MSP430, da Texas Instruments, ilustrado na Figura 13 abaixo. Dentro desta família de microcontroladores destaca-se o componente MSP430F13X (TEXAS INSTRUMENTS, 2004), que possui conversor Analógico/Digital interno de 12 bits, comparador interno, dois temporizadores de 16 bits, várias saídas digitais e pode ser alimentado com tensões entre 1,8 e 3,6 V. Desta forma, os sinais analógicos dos sensores de tensão e corrente do sinalizador luminoso de faltas poderiam ser digitalizados e utilizados internamente na lógica de detecção de faltas, o comparador interno poderia suprir a lógica de detecção de tensão da linha monitorada, e os temporizadores poderiam ser utilizados para controle das temporizações das lógicas de detecção de faltas, acionamento da saída de sinalização luminosa, rearme automático do equipamento, entre outros, suprimindo assim todos os requisitos para funcionamento do equipamento sinalizador luminoso de faltas.

Figura 13 – Microcontrolador MSP430F133 da Texas Instruments.

Além disso, neste microcontrolador estão presentes interfaces de comunicação serial que permitiriam uma fácil integração deste componente com um módulo de comunicação via rádio frequência, por exemplo, permitindo a localização remota de faltas.

O ponto que mais impressiona no componente é o consumo de corrente em operação e em modo de espera, conforme pode ser visto no ANEXO A deste trabalho. Se for utilizado um *clock* de 4.096 Hz o consumo de corrente será de apenas 20 μA máximo, supondo uma alimentação de 3 V. Se for utilizada uma

tensão menor de alimentação, por exemplo, 2,2 V, o consumo de corrente nominal será de apenas 2,5 μA , ou seja, quatro vezes menor que o consumo mínimo esperado para a eletrônica do equipamento sinalizador luminoso como um todo, que é de 10 μA , conforme especificado no item anterior deste trabalho.

Os limites para a temperatura de operação do Texas MSP430 também são adequados para a operação do sinalizador luminoso de faltas. Conforme o guia internacional de testes de equipamentos sinalizadores de faltas do IEEE Std 495-2007 (2007) o dispositivo deve suportar temperaturas entre -40 e +85 °C.

Portanto verifica-se que, atualmente, já existem soluções comerciais de baixo consumo que poderiam ser utilizadas no equipamento sinalizador luminoso de faltas para substituir os componentes discretos dos primeiros protótipos do dispositivo. Entretanto, estes componentes de baixíssimo consumo de energia não estavam disponíveis comercialmente ou a preços acessíveis à época do projeto. A solução encontrada para viabilizar a aplicação em campo do sinalizador foi o desenvolvimento de um circuito integrado dedicado tipo “*Application Specific Integrated Circuit*” (ASIC) com tecnologia “*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*” (CMOS).

3.4.2.2. Integração do circuito em ASIC

Com a indisponibilidade de microcontroladores que fossem capazes de executar todas as funções necessárias para o correto funcionamento do equipamento sinalizador luminoso de faltas e que tivessem o consumo de corrente baixo o suficiente para atingir as metas de 20 μA quiescente máximo, foi necessário o desenvolvimento de um componente ASIC com tecnologia CMOS.

Outro motivo importante para o desenvolvimento do ASIC do sinalizador luminoso de faltas era o barateamento da eletrônica do dispositivo, pensando numa produção seriada em larga escala.

Indiretamente, com a utilização do ASIC também se obtém o benefício da proteção dos frutos da pesquisa e desenvolvimento, uma vez que é praticamente impossível realizar a engenharia reversa do equipamento a custos viáveis, visando a cópia não autorizada da lógica de detecção de faltas do equipamento.

O desenvolvimento do ASIC do sinalizador luminoso de faltas se iniciou com a transcrição do esquema eletrônico do protótipo do sinalizador luminoso de faltas, que estava sendo testado até então, em blocos microeletrônicos analógicos e digitais CMOS de baixo consumo de energia.

O parceiro do arranjo interinstitucional do projeto responsável por esta tarefa foi o LSI-USP (Laboratório de Sistemas Integráveis da Universidade de São Paulo), um órgão de pesquisa em microeletrônica, na época diretamente subordinado à Universidade.

Enquanto as diversas funcionalidades desejadas para o equipamento eram integradas num único circuito microeletrônico, algumas simulações computacionais de funcionamento de blocos desse novo chip eram realizadas com o auxílio do software de simulação HSPICE, da empresa Synopsys. Por uma limitação de tempo e de recursos computacionais, o circuito microeletrônico completo do sinalizador nunca foi simulado computacionalmente como um todo, o que permitiu que alguns erros de projeto passassem despercebidos, inviabilizando a utilização prática dos chips da primeira rodada de fabricação.

A primeira fabricação foi feita pela *foundry* belga AMI, com sua tecnologia CMOS de 0,7 μm . Não se tratava ainda de uma rodada comercial, mas sim de uma rodada multiprojeto de fabricação de protótipos, especialmente para o meio acadêmico. Alguns poucos chips foram recebidos em encapsulamentos “*Dual In-line Package*” (DIP) de 18 pinos, sendo que uma parcela dos PADS do circuito microeletrônico não foram externalizados.

De uma maneira simplista, todo circuito microeletrônico é produzido através da gravação de um arranjo que forma um circuito eletrônico em uma pastilha de material semicondutor (usualmente silício), composto de transistores, diodos, resistores, entre outros. Essa pastilha condensa uma grande quantidade de componentes num espaço físico muito pequeno, trazendo vantagens em relação a custo, velocidade e consumo de energia. Para que possa ser utilizado, este microcircuito deve ter suas terminações ligadas a um circuito eletrônico externo, que lhe proverá tensão de alimentação para polarização de seus circuitos internos, potencial de referência, sinais de entrada e que receberá os sinais de saída. Usualmente, a pastilha é acomodada em cápsulas plásticas ou cerâmicas que possuem terminais que podem ser facilmente conectados ao circuito externo. A ligação interna entre a pastilha semicondutora e os terminais da capsula é feita

através de finos fios condutores de ouro ou alumínio, soldados diretamente nos PADS de conexão do circuito microeletrônico.

Os PADS que não foram externalizados no microchip do sinalizador se tratavam de sinais internos de interconexão entre os circuitos analógicos e digitais, sem utilização prática no funcionamento do equipamento sinalizador. O restante dos chips foi entregue sem encapsulamento e não poderiam ser testados diretamente no laboratório. Poucos exemplares foram encapsulados devido ao alto custo do processo quando executado em pequena quantidade de chips protótipos.

A falta de acessibilidade a esses pinos trouxe diversos problemas à equipe do projeto. Não se tinha acesso a alguns pontos críticos do circuito para análise e solução dos defeitos encontrados.

Foi então intensificado o trabalho de simulação computacional por parte do LSI. O resultado das simulações e alguns resultados de testes de bancada com o chip da primeira fabricação permitiram analisar e corrigir os principais erros de projeto do chip:

- A utilização de bloco oscilador com frequência de operação muito alta (4 MHz) para o patamar de baixo consumo que desejava se alcançar. Seria necessária a utilização de um bloco oscilador de 32 kHz no máximo.
- Uma falha na nomenclatura de pontos internos de conexão entre blocos distintos do chip, que ocasionaram a não conexão interna ou conexão errônea de alguns pontos. Isso poderia ter sido evitado ou percebido a tempo se a simulação computacional completa do chip tivesse sido realizada antes do envio para fabricação.
- A saída dos blocos de sensoriamento analógico de tensão e corrente, que deveriam comandar alguns circuitos digitais do circuito integrado, possuíam tempos de subida e descida demasiadamente longos, causando mau funcionamento ou funcionamento errático de algumas funções. O problema foi solucionado com a adição de dois inversores lógicos nessas saídas analógicas, conforme mostrado na Figura 14 abaixo, com transistores de canal largo, o que ampliaria o ganho do sinal. O consumo de corrente desse conjunto é de apenas 0,2 μA , mas o ganho no ponto de transição do sinal é da ordem de 80 dB.

Figura 14 – Par de inversores lógicos para aumento do ganho do sinal de saída dos blocos analógicos.

Com essa série de recomendações de mudanças em mãos, partiu-se para o reprojeto do circuito eletrônico e realização de uma nova rodada de fabricação de protótipos, com mais unidades fabricadas, visando a realização de testes de campo mais amplos com o equipamento sinalizador luminoso de faltas. Essa nova rodada de fabricação previa a construção de até 300 novos dispositivos sinalizadores.

A segunda rodada de fabricação foi feita a partir de um reprojeto do chip testado anteriormente. As principais mudanças realizadas foram:

- A utilização de oscilador de 32 kHz, em vez do oscilador de 4 MHz;
- A redução do fator de divisão dos divisores do sinal de relógio para compatibilizar o circuito com o novo oscilador;
- O emprego de inversores nos sinais de saída, conforme sugerido nos estudos realizados com os *chips* da primeira rodada de fabricação;
- Reprojeto do sub-bloco da função Anti *In-rush*;
- A correção das nomenclaturas das interconexões entre blocos do diagrama esquemático do projeto;
- Modificação das linhas de alimentação para o circuito todo trabalhar com apenas uma tensão de alimentação (3,6 V);
- Utilização de novos PADs (ponto de soldagem dos terminais) com estrutura de proteção anti-estática;
- Adição de circuito para auto-teste dos blocos analógicos e digitais.

Novamente foi feita uma rodada de fabricação protótipo através de projeto multiusuário da *foundry* belga AMIS. Amostras do chip foram recebidas com encapsulamento protótipo DIP 18 e seguiram para teste em laboratório.

Os principais problemas detectados na primeira rodada de fabricação haviam sido resolvidos e nesse momento foi possível averiguar na prática que um protótipo do equipamento sinalizador de faltas equipado com o chip da segunda rodada de fabricação conseguia identificar uma variação brusca de corrente seguida de uma ausência de tensão, disparando a sinalização luminosa. O consumo de corrente foi aferido e estava dentro dos 20 μA esperados para o equipamento. Desta maneira, passou-se para a montagem de um número maior de protótipos e a instalação do lote cabeça-de-série nas redes de distribuição da CPFL.

3.4.2.3. Análise da escolha do encapsulamento do circuito microeletrônico

Uma escolha crucial teve de ser realizada no projeto da eletrônica que receberia o chip da segunda rodada de fabricação. Tratava-se do tipo de encapsulamento que seria feito nas pastilhas de silício contendo o circuito microeletrônico do equipamento sinalizador luminoso de faltas cabeça-de-série. Entre as opções disponíveis estavam:

Solução 1) Encapsulamento SMD (*Surface Mount Device*): O encapsulamento SMD é um método de construir componentes eletrônicos que são montados diretamente na superfície das placas de circuito impresso. Usualmente são menores que componentes *through-hole*, ou seja, ocupando menos área da placa. Este tipo de encapsulamento aplicado ao circuito integrado dedicado do sinalizador luminoso de faltas pode ser visto na Figura 15, a seguir. Outras vantagens que podem ser listadas são as seguintes:

- Menos furos necessários na placa, barateando seu custo;
- Montagem automatizada simplificada;
- Pequenos erros de posicionamento do componente são corrigidos automaticamente através da tensão superficial da própria solda derretida que puxa o componente para o alinhamento correto com os

PADs;

- Pode ser colocado em qualquer dos lados do circuito;
- Menor resistência e indutância das conexões;
- Melhor desempenho mecânico em condições de vibração;
- Montagem rápida, com algumas máquinas chegando a posicionar até 136.000 componentes por hora.

Figura 15 – Encapsulamento tipo SMD do circuito microeletrônico do Sinalizador Luminoso de Faltas.

Solução 2) Tecnologia *Chip On-Board* (COB): Com a tecnologia COB, excluí-se a necessidade de encapsulamento da pastilha semicondutora que contém o circuito microeletrônico. Esta pastilha é soldada diretamente na placa de circuito impresso, especialmente preparada para tal, e as conexões entre o circuito microeletrônico e o circuito externo são feitas também com finos fios de ouro ou alumínio. Entretanto, essa soldagem, ao invés de ser feita nos terminais da cápsula, é feita diretamente nas trilhas da placa de circuito impresso. Por fim, toda a pastilha e suas conexões são recobertas com resina para proteção do circuito microeletrônico e conexões. O processo COB (ilustrado na Figura 16 abaixo) só pode ser feito por laboratórios e empresas altamente especializados, com tecnologia de manipulação e montagem microeletrônica.

Figura 16 – Circuito Integrado do Sinalizador de Faltas montado através do sistema COB na Placa de Circuito Impresso.

Solução 3) Encapsulamento DIL-DIP (*Dual In-line Package*): Conforme explicado anteriormente, a pastilha de material semiconductor que possui o circuito microeletrônico é colocada numa cápsula que contém terminais elétricos que servirão para conectar o circuito eletrônico externo ao circuito microeletrônico interno. No caso do encapsulamento DIL-DIP, esses terminais são do tipo *through-hole*, posicionados em duas linhas ao longo do comprimento da cápsula. Essas cápsulas em geral são de material plástico ou cerâmico, dependendo da aplicação e do volume de produção. O processo de montagem do circuito na capsula é automatizado e feito em máquinas de altíssima precisão, especiais para trabalhar com soldagem de componentes microeletrônicos. Esta solução, que pode ser vista na Figura 17 abaixo, é ideal para montagens manuais e para testes e montagens de protótipos, pois não requer máquinas ou métodos de solda mais precisos como a solução SMD.

Figura 17 – Encapsulamento microeletrônico tipo DIL/DIP.

Solução 4) Encapsulamento DIL-DIP Protótipo: Idêntica à solução 3, mas feita com processos de montagem manuais (com ajuda de microscópio e máquinas especiais) ou com baixo índice de automatização, voltada para a produção protótipo em pequena escala, conforme ilustrado na Figura 18 abaixo:

Figura 18 – Exemplo de encapsulamento DIP-DIL protótipo. Notar ao centro a tampa de acesso à pastilha de silício contendo o circuito microeletrônico e as conexões internas com os terminais da capsula.

No caso da análise comparativa entre as soluções de encapsulamento, utilizando todos os registros dos conhecimentos adquiridos pela equipe do projeto ao longo do desenvolvimento, tem-se o seguinte resultado com a aplicação do método de análise proposto anteriormente no item 3.3 deste trabalho:

• FASE I)

Requisito 1) Permitir a produção em série. Isto é necessário a partir do momento que se está na fase de implantação de um lote cabeça-de-série, com vistas à realização de testes de campo mais abrangentes.

Requisito 2) Ser compatível com a eletrônica do sinalizador luminoso de faltas.

Tabela 2 – Tabela de Exclusão da análise da escolha do encapsulamento.

	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4
Requisito 1	✓	✓	✓	✗
Requisito 2	✓	✓	✓	✓

A solução 4 foi então eliminada da análise.

• FASE II)

Atribuição de pesos:

A – Custo Unitário: Peso 5

Justificativa: Principal fator de comparação entre partes físicas de qualquer equipamento voltado para aplicação comercial, ou que está sendo desenvolvido para tal.

B – Custo da Montagem: Peso 5

Justificativa: Para o chip microeletrônico, este custo pode superar inclusive o custo unitário.

C – Espaço ocupado na placa: Peso 1

Justificativa: O tamanho poderá dificultar a alocação dos componentes, mas não traz prejuízos técnicos ou financeiros para o produto. Portanto, o peso dessa característica é baixo.

D – Custo de adaptação da placa eletrônica: Peso 5

Justificativa: Custo diretamente relacionado com a escolha da tecnologia de encapsulamento, por isso, deve receber o mesmo peso dos outros custos diretos.

E – Disponibilidade de Terceiros que fazem a montagem: Peso 3

Justificativa: Se não houver opções de montadores esse custo tende a ser mais alto, ou os prazos estipulados em projeto correm o risco de não serem cumpridos.

F – Taxa de falhas/Confiabilidade: Peso 3

Justificativa: Alta taxa de falhas causa perda de material, e inviabilização de entrega da quantidade estipulada pelo cliente, que pode ser traduzida em prejuízos financeiros.

Atribuição de notas normalizadas:

A – Custo Unitário:

Solução 1: R\$4,80

Solução 2: R\$1,50 (apenas custo do corte do *die* – região da pastilha de silício que contém um circuito integrado) (melhor)

Solução 3: R\$150,00 (só foi obtido orçamento para encapsulamento protótipo, normalmente utilizado para poucas unidades).

Nota normalizada Solução 1: $10 - (10 \times ((4,8-1,5)/4,8)) = 3,1$

Nota normalizada Solução 2: **10**

Nota normalizada Solução 3: $10 - (10 \times ((150-1,5)/150)) = 0,1$

B – Custo da Montagem:

Solução 1: Irrisório (< R\$1,00) (melhor)

Solução 2: R\$ 3,00

Solução 3: Irrisório (< R\$1,00) (melhor)

Nota normalizada Solução 1: **10**

Nota normalizada Solução 2: $10 - (10 \times ((3-1)/3)) = 3,3$

Nota normalizada Solução 3: **10**

C – Espaço ocupado na placa:

Solução 1: Pouco

Solução 2: Mínimo (melhor)

Solução 3: Relativamente Grande

Nota normalizada Solução 1: 9

Nota normalizada Solução 2: **10**

Nota normalizada Solução 3: 3

D – Custo de adaptação da placa eletrônica:

Solução 1: R\$0,00 (melhor)

Solução 2: R\$ 5,00

Solução 3: R\$ 0,00 (melhor)

Nota normalizada Solução 1: **10**

Nota normalizada Solução 2: $10 - (10 \times ((5-0)/5)) = 0$

Nota normalizada Solução 3: **10**

E – Disponibilidade de Terceiros que fazem a montagem:

Solução 1: Inúmeros (melhor)

Solução 2: Somente 1 no Brasil, em larga escala.

Solução 3: Inúmeros (melhor)

Nota normalizada Solução 1: **10**

Nota normalizada Solução 2: 5

Nota normalizada Solução 3: **10**

F – Taxa de falhas/Confiabilidade:

Solução 1: Muito Baixa (melhor)

Solução 2: por volta de 60%

Solução 3: Baixa

Nota normalizada Solução 1: **10**

Nota normalizada Solução 2: 6

Nota normalizada Solução 3: 9

• Fase III)

Tabela de Comparação do processo de análise:

Tabela 3 – Tabela de Comparação da análise de escolha da tecnologia de encapsulamento do chip do sinalizador cabeça-de-série.

	A		B		C		D		E		F	
SOL. 1	Nota 3,1	Peso 5	Nota 10	Peso 5	Nota 9	Peso 1	Nota 10	Peso 5	Nota 10	Peso 3	Nota 10	Peso 3
SOL. 2	Nota 10	Peso 5	Nota 3,3	Peso 5	Nota 10	Peso 1	Nota 0	Peso 5	Nota 5	Peso 3	Nota 6	Peso 3
SOL. 3	Nota 0,1	Peso 5	Nota 10	Peso 5	Nota 3	Peso 1	Nota 10	Peso 5	Nota 10	Peso 3	Nota 9	Peso 3

$$Conc_{SOL1} = \frac{3,1 \cdot 5 + 10 \cdot 5 + 9 \cdot 1 + 10 \cdot 5 + 10 \cdot 3 + 10 \cdot 3}{5 + 5 + 1 + 5 + 3 + 3} = 8,38$$

$$Conc_{SOL2} = \frac{10 \cdot 5 + 3,3 \cdot 5 + 10 \cdot 1 + 0 \cdot 5 + 5 \cdot 3 + 6 \cdot 3}{5 + 5 + 1 + 5 + 3 + 3} = 4,97$$

$$Conc_{SOL3} = \frac{0,1 \cdot 5 + 10 \cdot 5 + 3 \cdot 1 + 10 \cdot 5 + 10 \cdot 3 + 9 \cdot 3}{5 + 5 + 1 + 5 + 3 + 3} = 7,29$$

Tabela 4 – Resultado Final da análise da escolha da tecnologia de encapsulamento.

Solução	Nota Final (ordem decrescente)	Posição no ranking
SOL. 1	8,38	1^a
SOL. 3	7,29	2 ^a
SOL. 2	4,97	3 ^a

O método de análise proposto apontou a solução 1 (encapsulamento SMD) como sendo a melhor solução para ser aplicada ao desenvolvimento. Entretanto isto não foi realizado na época do projeto, quando se optou pela utilização do encapsulamento COB, a pior colocada na análise.

De fato, o uso da tecnologia COB na época do projeto trouxe diversos contratemplos com a empresa responsável pela montagem, com o alto índice de quebra, com a impossibilidade de troca e perda de material, entre outros.

O problema ocorreu porque a equipe de desenvolvimento, na época de tomada de decisão no projeto cabeça-de-série, não tinha conhecimento de todos os dados disponíveis hoje, utilizados nesta análise, e não tiveram informações precisas sobre o custo real da solução SMD, que foi a melhor ranqueada na análise.

Na época, apenas foi considerado um conjunto de características de comparação em que o componente COB se tornava mais vantajoso, que são o preço unitário (característica A), o espaço ocupado na placa (característica C) e o custo de montagem (característica B). Se for repetido o cálculo do conceito final das soluções, levando em conta apenas esses três parâmetros, chega-se à seguinte conclusão:

$$Conc_{\cdot SOL1^*} = \frac{3,1 \cdot 5 + 10 \cdot 5 + 9 \cdot 1}{5 + 5 + 1} = 6,72$$

$$Conc_{\cdot SOL2^*} = \frac{10 \cdot 5 + 3,3 \cdot 5 + 10 \cdot 1}{5 + 5 + 1} = 6,95$$

$$Conc_{\cdot SOL3^*} = \frac{0,1 \cdot 5 + 10 \cdot 5 + 3 \cdot 1}{5 + 5 + 1} = 4,86$$

Tabela 5 – Resultado alternativo para a análise da escolha do encapsulamento.

Solução	Nota Final (ordem decrescente)	Posição no ranking
SOL. 2*	6,95	1^a
SOL. 1*	6,72	2 ^a
SOL. 3*	4,86	3 ^a

Considerando a percepção limitada que a equipe do projeto tinha na época sobre o problema de escolha do encapsulamento, realmente a solução 2 (COB) parecia ser a mais atraente.

3.4.2.4. Atualização de projeto e fabricação do chip definitivo

Os sinalizadores cabeça-de-série, apesar de terem seu funcionamento aprovado em laboratório, enfrentaram graves problemas com um índice de quebra altíssimo na confecção do lote destinado para testes de campo (em torno de 60%), causado pelo processo de montagem do componente COB que não foi tão bem sucedido como o esperado, por uma falha de projeto do circuito periférico do chip, mais precisamente do bloco oscilador cujo cristal externo necessitava de capacitâncias extras em seus terminais quando da utilização do componente não encapsulado (devido à inexistência de capacitâncias parasitas dos pinos de um componente SMD ou DIP usuais), e pela implementação do *driver* de acionamento dos LEDs de sinalização numa configuração que consumia corrente excessiva diretamente dos terminais do CI, derretendo em alguns casos as ligações da montagem COB.

A funcionalidade de auto-teste interno do chip também não funcionou como desejado e teve de ser implementada externamente na placa. O bloco detector de tensão se mostrou pouco confiável e com funcionamento errático nos testes práticos com aplicação de sinais de teste em 60 Hz.

Além desses fatos, houve uma atualização de tecnologia na *foundry* que estava sendo utilizada, o que invariavelmente exigiria o reprojetado do chip para uma nova rodada de fabricação, visando atender a confecção do lote pioneiro do equipamento sinalizador.

Optou-se por uma mudança de *foundry* e migração para a tecnologia CMOS de 0,6 μm . O novo projeto do CI do sinalizador foi feito com a tecnologia e bibliotecas de desenvolvimento da XFAB alemã, mais completa e diversificada que as da *foundry* belga que estava sendo utilizada até então.

O novo projeto do chip, feito pela *Design House* LSI-TEC, foi completamente testado através de simulação computacional antes de sua fabricação. Um lote protótipo foi trazido ao Brasil para testes práticos nos laboratórios da USP e pequenas correções foram sugeridas.

Por fim, duas versões foram implementadas na mesma pastilha e testadas. Uma das versões era mais conservadora e a outra de maior risco. A versão de maior risco traria melhores funcionalidades se não apresentasse defeitos.

Ambas funcionaram e um lote de aproximadamente 5.500 peças foi produzido na Alemanha e encapsulado na Malásia, desta vez em um encapsulamento SMD QFP de 32 pinos.

O índice de quebra do chip passou a ser próximo de zero e essa terceira rodada de fabricação passou a integrar todos os sinalizadores produzidos a partir de então. Só no lote pioneiro do sinalizador luminoso de faltas foram mais de 1000 equipamentos produzidos e o sinalizador com comunicação sem fio teve mais 200 equipamentos contendo este novo chip.

Testes práticos de detecção de falta com este novo chip se mostraram superiores e mais confiáveis que qualquer uma das versões anteriores do equipamento. O consumo de corrente do sinalizador de faltas baixou ainda mais e hoje está na casa dos 8 μA , quando não está sinalizando (o que demanda 300 mA pulsados para piscar os seis LEDs de uma única vez).

3.4.3. Fontes de Alimentação

A escolha da fonte de alimentação do circuito eletrônico do sinalizador luminoso de faltas impacta diretamente na vida útil do equipamento e na periodicidade das manutenções.

Sistemas de captação de energia da rede elétrica ou do ambiente fornecem uma maior autonomia, mas se apoiam no uso de baterias recarregáveis que possuem ciclos de carga e descarga e vida útil limitados. Alimentação com bateria não recarregável é mais confiável, só que a durabilidade dessa bateria está diretamente ligada com o consumo de corrente do dispositivo, exigindo a troca da bateria quando a carga se esgota.

Diversos sistemas de alimentação foram estudados, cada um com seus prós e contras, visando determinar qual deles se encaixava melhor nas metas técnicas do projeto que eram maximizar a vida útil, minimizando ao máximo ou eliminando por completo a necessidade de manutenção do equipamento sinalizador de faltas depois de instalado na rede elétrica.

Nos próximos subitens são analisados os estudos e os testes feitos com cada sistema de alimentação pesquisado e a escolha realizada para a implementação do sinalizador luminoso.

3.4.3.1. Estudo da utilização de sistema de captação de energia da rede

A melhor maneira de se implementar o sistema de captação de energia da rede elétrica seria através do sensor indutivo de campo magnético, ou seja, através do sensor de corrente do equipamento sinalizador.

Conforme explicado no item 3.1.1.1 deste trabalho, o campo magnético presente ao redor do condutor de eletricidade pode ser concatenado dentro de um núcleo de material ferromagnético, gerando uma força eletromotriz através de um conjunto de espiras enroladas nesse núcleo. Essa força eletromotriz, traduzida numa tensão elétrica, pode ser utilizada para medir a intensidade de corrente no condutor (como é feito pelo sensor de corrente do sinalizador de faltas) e pode ser utilizada também para alimentar um circuito eletrônico, através de um regulador de tensão, ou carregar uma bateria recarregável, que por sua vez alimentaria um circuito eletrônico.

A quantidade de energia, ou a magnitude da tensão elétrica que se pode obter através de um sistema de captação de campo magnético variante no tempo como este descrito, de maneira geral, varia com a intensidade da corrente elétrica do condutor do qual se deseja captar energia, o tamanho do núcleo do sensor magnético, o tamanho do entreferro desse núcleo (se existir), sua geometria e o número de espiras da bobina de captação de energia magnética.

O sensor de corrente do equipamento sinalizador luminoso de faltas também foi descrito no item 3.1.1.1. Ele possui um núcleo aberto de ferrite em formato de “U”, por isso o entreferro é relativamente grande. Por questões mecânicas, sua espessura é limitada. Possui uma bobina de 1000 espiras, também limitada em tamanho pelo gabinete do equipamento.

Essas limitações mecânicas e construtivas do sensor acabam por limitar também a quantidade de energia que esse dispositivo consegue captar do campo magnético ao redor da rede elétrica. Para verificar a aplicabilidade desse

sensor na captação de energia da rede para alimentação da eletrônica do equipamento sinalizador luminoso de faltas, foi feito um levantamento em laboratório da relação entre corrente do condutor e tensão elétrica obtida nos terminais do sensor de corrente do equipamento. O resultado pode ser visto no gráfico da Figura 19 abaixo:

Figura 19 – Gráfico entre a relação da corrente do condutor e a tensão de saída do sensor de corrente do sinalizador luminoso de faltas.

Verifica-se que para uma corrente de carga no condutor da ordem de 20 A, a tensão de saída do sensor é de apenas 0,2 V. Para obter-se uma tensão de aproximadamente 1 V é necessária uma corrente de carga entre 95 e 100 A. O mesmo levantamento foi feito para verificar a corrente que poderia ser obtida através desse sensor e o resultado obtido pode ser visto no gráfico da Figura 20 abaixo:

Figura 20 – Gráfico da relação entre a corrente do condutor e a tensão de saída do sensor de corrente do sinalizador luminoso de faltas.

Nota-se que, para uma corrente de carga de aproximadamente 20 A, a corrente de saída do sensor não é maior do que 3 mA. Para uma corrente de carga de 100 A, a corrente de saída do sensor é da ordem de apenas 14 mA.

Vale lembrar que a corrente de carga típica de um alimentador rural longo (caso onde o sinalizador luminoso de faltas traz mais benefícios para a concessionária) dificilmente passa de 10 A. Com uma tensão menor que 0,2 V e uma corrente menor que 3 mA não é possível garantir o correto funcionamento de um sistema de carregamento de baterias. Além disso, o tempo de recarga da bateria poderia ficar proibitivo para a aplicação, que exige constante prontidão do dispositivo para detectar e sinalizar faltas.

Outros problemas que podem ser apontados no uso de baterias recarregáveis com o sistema de captação de energia diretamente da rede são: a limitação dos ciclos de carga de descarga dessas baterias e a temperatura de operação e de recarga. Diversas composições de baterias recarregáveis não atendem à faixa de temperatura de operação estabelecida na norma internacional de teste e operação de equipamentos sinalizadores de faltas (IEEE, 2007).

Alterações no sensor de corrente, como a implementação de um núcleo fechado de material ferromagnético, maior espessura do núcleo e a adição de mais espiras na bobina ao redor do núcleo poderiam viabilizar o sistema de captação de energia diretamente da rede, mas as questões mecânicas do gabinete relacionadas ao sistema de fixação do dispositivo nos cabos da rede de distribuição e ao sistema de vedação interna do equipamento, bem como questões econômicas, que envolvem o encarecimento da eletrônica para inclusão de um sistema complexo de controle de carga e recarga da bateria e aumento dos custos com a manutenção periódica do dispositivo (troca periódica das baterias recarregáveis) fizeram essa solução inviável no período do desenvolvimento e ainda farão essa solução inviável até que surja nova geração de baterias recarregáveis que derrubem tais restrições de operação.

3.4.3.2. Estudo da Captação de Energia Solar

A captação da energia solar substitui a captação da energia diretamente da rede de distribuição, viabilizando tecnicamente a utilização das baterias recarregáveis no dispositivo sinalizador.

Existem vários tipos de células fotovoltaicas que poderiam ser utilizadas para gerar energia necessária para alimentar a eletrônica do equipamento sinalizador luminoso de faltas, entre elas estão as células compostas por:

- *Arseneto de Gálio (GaAs)*: maior rendimento entre as soluções de captação de energia solar (28%), com alto custo de fabricação viabilizando sua utilização apenas em aplicações em satélites artificiais.
- *Silício amorfo*: menor rendimento entre as células de silício (cerca de 7%), mas apresenta também o menor custo de fabricação, podendo ser produzida em filmes finos e até flexíveis.
- *Silício poli-cristalino*: material de fabricação um pouco mais cara, com rendimento elétrico também um pouco superior (entre 11% e 13% em aplicações práticas).
- *Silício mono-cristalino*: melhor e mais cara solução entre as células fotovoltaicas de silício, com rendimento de 15 a 21% na célula.
- *CIS (Cobre – Índio – di-Selênio)*: De maneira similar ao silício amorfo, pode ser produzida em filmes finos, entretanto apresenta melhor eficiência, podendo chegar a 18% aproximadamente.

No mercado são encontradas diversas células, com as diferentes tecnologias citadas acima. Algumas células fotovoltaicas possuem a vantagem de serem flexíveis, pois são feitas sobre substratos plásticos, o que facilita a adaptação mecânica da célula ao produto. Partindo do pressuposto que a célula solar deverá ficar exposta ao clima e às intempéries pelo mesmo período que o próprio equipamento sinalizador luminoso de faltas, que possui vida útil estimada em dez anos, não poderiam ser adotadas células de substratos plásticos, pois não resistiriam por tanto tempo.

Maiores rendimentos e menores custos seriam as metas de busca de uma solução fotovoltaica para a alimentação do equipamento sinalizador luminoso de faltas. Com estes requisitos, a gama de escolha entre as opções disponíveis se restringe ao silício cristalino, em substrato de vidro.

Esse tipo de solução iria demandar uma adaptação do gabinete plástico, incluindo uma adaptação para manutenção da estanqueidade da cavidade interna do equipamento, mesmo com a interligação da célula (externa ao gabinete) com a eletrônica interna. O posicionamento do equipamento sinalizador de faltas também deveria passar a ser feito com mais critério, evitando zonas de sombra e ambiente extremamente poluídos ou com presença constante de poeira e partículas em suspensão no ar, o que poderia fazer com que este sistema de captação de energia perdesse rendimento muito rapidamente.

Outra questão seria o armazenamento da energia produzida através da célula fotovoltaica, que deveria ser feito, novamente, com baterias recarregáveis. O custo final desse sistema de captação solar seria composto do custo da célula fotovoltaica, somado ao custo da bateria recarregável e ao custo do sistema de controle de carga e descarga da bateria, onerando muito o equipamento sinalizador, sem aumento de confiabilidade e de vida útil do sistema, podendo ser necessária inclusive um maior número de manutenções periódicas no equipamento para limpeza da célula solar e troca da bateria recarregável.

Em suma, a adoção do sistema de captação de energia solar é tecnicamente viável, tanto que já é utilizado em diversos equipamentos de medição e sensoriamento remotos. Entretanto, demanda do consumidor final da tecnologia uma predisposição de aumentar seus custos iniciais de aquisição do sistema e seus custos de manutenção, para que assim possa se beneficiar de energia limpa e renovável. No caso do sinalizador luminoso de faltas, a questão “custo” é fator crítico e sempre foi tratado como prioridade, impedindo a adoção da captação solar como fonte de energia.

3.4.3.3. Estudos da Utilização de Ultracapacitores

Um ultracapacitor (ULTRACAPACITORS, 2011) é um condensador eletroquímico que tem uma extraordinária capacidade de armazenamento de energia relativamente ao seu tamanho, quando comparado a condensadores comuns. O armazenamento de energia de um ultracapacitor baseia-se em separar fisicamente cargas positivas e negativas, diferentemente de baterias que o faz

quimicamente. Ultracapacitores são também conhecidos como megacapacitores, supercapacitores ou condensadores de dupla camada.

Este dispositivo polariza uma solução eletrolítica para armazenar energia eletrostaticamente. Embora seja um dispositivo eletroquímico, nenhum tipo de reação química está envolvido no seu mecanismo de armazenamento de energia. O seu funcionamento pode ser visto como duas placas porosas inertes, ou coletoras, suspensas no interior de um eletrólito, com uma diferença de potencial aplicado entre elas. No eletrodo positivo são atraídas as cargas negativas do eletrólito, enquanto que no eletrodo negativo são atraídas as cargas positivas do eletrólito. Um separador dielétrico entre os eletrodos impede o movimento de cargas entre eles.

Os ultracapacitores são feitos, geralmente, de carbono ativado e *aerogels*. Estes últimos são materiais de altíssima porosidade, produzidos a partir de técnicas da nanotecnologia, o que se traduz em uma enorme área de superfície.

Como se sabe, a capacitância de condensadores é proporcional à área de superfície do eletrodo. Aumentando esta área aumenta-se a capacitância e, conseqüentemente, a quantidade de energia que pode ser armazenada. Portanto, a quantidade de energia armazenada por um ultracapacitor é muito grande quando comparado a condensadores comuns devido a essa enorme área de superfície característica do material utilizado.

Existe um limite intrínseco à porosidade destes materiais devida à porosidade irregular, ou seja, a área de superfície não é tão grande quanto ela poderia ser, reduzindo a eficiência do ultracapacitor. Métodos alternativos vêm sendo estudados para contornar o problema. Dentre eles destacam-se os nanotubos de carbono, que apresentam porosidade regular.

O uso de ultracapacitores pode vir a substituir o uso de baterias recarregáveis, excluindo a necessidade de utilização de sistemas de controle de carga e descarga daquele dispositivo, que encarece as soluções propostas com utilização de bateria recarregável.

O ultracapacitor por si só era proibitivamente caro na época do desenvolvimento do projeto, e a densidade de carga que poderia ser armazenada era baixa, o que exigia componentes demasiadamente grandes para suprir a energia do equipamento sinalizador de faltas.

Atualmente os ultracapacitores se popularizaram e a densidade de energia que pode ser armazenada é consideravelmente maior, viabilizando na

prática a utilização deste dispositivo dentro do equipamento sinalizador luminoso de faltas, permitindo novamente que a aplicação de ultracapacitores num sistema de captação de energia do meio seja tema de estudo num trabalho futuro relacionado com o equipamento sinalizador luminoso de faltas.

3.4.3.4. Estudos da Utilização de Bateria Não Recarregável

O uso de baterias não recarregáveis elimina o problema da necessidade de um sistema de captação de energia do meio, bem como a necessidade de um circuito de controle do carregamento e controle de carga da bateria recarregável. Isso barateia o circuito eletrônico como um todo e reduz o consumo global de corrente. Entretanto, a bateria não recarregável deverá conter energia suficiente para suprir a demanda do equipamento por toda sua vida útil, tornando essa bateria mais volumosa e mais cara do que uma bateria recarregável que poderia ser utilizada para a mesma aplicação.

Um cuidado especial que foi tomado antes da adoção de baterias não recarregáveis para alimentação do circuito eletrônico do equipamento sinalizador luminoso de faltas, foi a verificação da quantidade de carga necessária e a compatibilidade da curva de descarga da bateria com o perfil de consumo de energia da aplicação. O sinalizador de faltas consome 8 μA aproximadamente de maneira constante, todo o tempo em que sua eletrônica está sendo alimentada com 3,6 V. Nos momentos em que está sinalizando, o consumo de corrente passa a ser de até 300 mA pulsados, acompanhando os lampejos luminosos dos LEDs de sinalização, que nessa situação operam com uma frequência de 0,75 Hz e um ciclo de trabalho de apenas 2,5%. Este não é um perfil de carga usual e esta condição de trabalho não é prevista nas folhas de especificação das baterias encontradas no mercado, onde os fabricantes se restringem a informar o perfil de descarga de suas baterias com um consumo de corrente constante variando de poucos mA até centenas de mA.

Considerando que a meta do desenvolvimento seria suprir energia para o equipamento durante toda sua vida útil, sem necessidade de manutenção periódica para troca de baterias, sejam elas recarregáveis ou não, deveria existir

carga suficiente na bateria para prover energia para o circuito eletrônico do equipamento durante 10 anos, com uma média de 10 atuações do dispositivo por ano (100 ao longo de sua vida útil). Considerando o pior caso, onde todas as sinalizações demoraram o tempo máximo permitido antes do rearme automático, ou seja, 3 horas, a bateria deveria suprir também 300 horas de sinalização luminosa ao longo da vida útil do equipamento.

Além do gasto de energia normal do circuito citado acima, é preciso considerar a descarga natural da bateria nesse longo período de 10 anos de utilização. Consultas aos fabricantes trouxeram a informação de que, nesse período, a bateria pode perder naturalmente de 10 a 20% de sua carga nominal.

Com essas informações foi possível calcular a quantidade de energia necessária para suprir a demanda do sinalizador luminoso de faltas operando durante 10 anos ininterruptos, com 300 horas de sinalização luminosa e sem troca da bateria:

- Consumo quiescente:

$$8\mu A \cdot 10\text{anos} \cdot \frac{365\text{dias}}{1\text{ano}} \cdot \frac{24\text{horas}}{1\text{dia}} = 700,8\text{mAh}$$

- Consumo na Sinalização:

$$6\text{LEDs} \cdot \frac{50\text{mA}}{1\text{LED}} \cdot 0,032\text{s} \cdot \frac{0,75\text{lampejo}}{1\text{s}} \cdot \frac{300\text{h}}{\text{lampejo}} = 2.160\text{mAh}$$

- Descarga Natural (Autodescarga):

$$20\% \text{ (pior caso)}$$

- Total:

$$(700,8 + 2.160) \cdot 1,2 = \mathbf{3.432,96 \text{ mAh.}}$$

Para se ter uma margem de segurança, foi escolhida uma bateria com capacidade nominal de 6.500 mAh, com a qual foram realizados estudos mais aprofundados. Sua composição química era Li-SOCl₂ e seu código ER26500M (MINAMOTO, 2009). O algarismo “M” é relativo à capacidade máxima de fornecimento de corrente pulsada. Para a aplicação específica no sinalizador, que

possui baixíssimo consumo de corrente quiescente e grandes pulsos de corrente esporádicos de curta duração, o baixo consumo de corrente por longos períodos poderia causar a passivação da bateria (criação de uma espécie de oxidação interna reduzindo sua capacidade de fornecimento de corrente) e os grandes pulsos de corrente poderiam causar uma redução de vida útil. Visando minimizar esses problemas, foi sugerida a adoção de bateria do tipo “*High Power*” (alta potência), que consegue fornecer até 2.000 mA pulsado e tem um grau maior de imunidade a esses problemas citados.

Observando-se um gráfico de perfil descarga dessa bateria Figura 21 abaixo, vê-se que não é possível correlacionar diretamente nenhuma das curvas com o perfil de consumo de corrente do equipamento sinalizador luminoso de faltas:

Figura 21 – Perfil de descarga da bateria ER26500M de 6.500 mAh nominais.

Com apenas esta informação não era possível garantir que essa bateria conseguisse suprir a carga demandada pelo sinalizador ao longo de seus 10 anos de funcionamento, nem era possível prever se haveria algum efeito indesejável na bateria pelo perfil de consumo de corrente ser atípico (baixa corrente quiescente e grandes pulsos curtos de corrente esporádicos).

Portanto, visando assegurar a durabilidade da bateria no sinalizador luminoso de faltas e o correto funcionamento do equipamento, foi levantado o perfil de descarga de amostras dessa bateria em laboratório, utilizando como carga um circuito eletrônico baseado no oscilador CMOS 555, com perfil de consumo de corrente muito similar ao do sinalizador de faltas. O resultado do levantamento do perfil de descarga da bateria escolhida, que pode ser visto no APÊNDICE C deste trabalho, mostra que essa fonte de alimentação é totalmente adequada para suprir a

energia do sinalizador luminoso de faltas por 10 anos com 300 horas de sinalização luminosa nesse período, sem a necessidade de manutenção periódica do equipamento e sem a necessidade de utilização de meios complexos e mais caros de captação de energia do ambiente.

Essa é a solução de alimentação de energia que está sendo utilizada nos equipamentos sinalizadores luminosos de faltas que foram submetidos aos testes de campo de longa duração.

3.4.4. Sinalização Luminosa

A eficiência na sinalização luminosa do equipamento sinalizador luminoso de faltas é, sem dúvida, tão importante quanto a eficiência na detecção do curto-circuito. Para que o ganho máximo de tempo na localização do defeito seja alcançado, o eletricitista de campo deve conseguir observar a sinalização luminosa do equipamento a grandes distâncias, mesmo durante um dia de sol.

Quando se fala em grandes distâncias, entenda-se dezenas de metros, ou seja, o eletricitista deve poder observar e identificar o ponto onde o sinalizador está instalado, mas não precisa se deslocar um ou dois quarteirões, por exemplo, para verificar o estado operativo do equipamento (atuado ou não). Isso acontecia com equipamentos detectores de faltas com sinalização eletromecânica, onde uma bandeirola verde ou vermelha, por exemplo, indicava o estado do equipamento. Ganhos em deslocamento se refletem em ganhos de tempo para localização e correção do defeito, melhorando os indicadores de qualidade do serviço prestado.

Por esse motivo, a sinalização luminosa deve permitir que o eletricitista veja o estado do sinalizador, mesmo durante o dia, sem precisar se deslocar até o ponto de instalação do equipamento, respeitando restrições de consumo de energia e restrições mecânicas, que são basicamente o modo como esse dispositivo de sinalização vai ser acomodado no gabinete do equipamento detector de faltas.

O sinalizador luminoso de faltas em estudo neste trabalho possuía basicamente duas restrições para a escolha do dispositivo de sinalização luminosa que seria utilizado: respeitar um limite de aproximadamente 300 mA por pulso de sinalização luminosa operando a uma frequência de 0,75 Hz e ser acomodado de tal

Uma opção interessante para implementar o circuito de acionamento da lâmpada xenônio seria a utilização de um circuito integrado específico para carregamento de capacitores de disparo de lâmpadas de *flash* de xenônio, com *driver* IGBT. Um exemplo desse circuito é o A8732 da Allegro MicroSystems (2010). Esse circuito microeletrônico permite fazer o carregamento de um capacitor de disparo de *flash* com apenas uma bateria de alimentação de 1,5 a 5,5 V. Seu consumo em modo *shutdown* é de apenas 0,5 μA e pode ser limitada a corrente de carga entre 450 e 1.500 mA. Os resistores de *gate* do *driver* IGBT estão internalizados no chip, minimizando a quantidade de componentes externos necessários para o correto funcionamento da aplicação e minimizando a corrente de fuga do circuito eletrônico. O circuito de aplicação típica é o da Figura 23 abaixo:

Figura 23 – Aplicação típica do A8732 (Allegro MicroSystems - 2010).

A princípio, há compatibilidade deste chip com a eletrônica do equipamento sinalizador luminoso de faltas, pois o consumo de corrente em modo *shutdown* é baixo o suficiente, a corrente de carga do capacitor pode ser limitada a um valor que é suportado pela bateria de alimentação, a própria tensão de 3,6 V da bateria de alimentação é adequada ao circuito de carga do capacitor e o chip é pequeno o suficiente para não impactar na área útil da placa eletrônica do equipamento.

Entretanto, alguns pontos devem ser levados em consideração na análise sobre a utilização ou não de lâmpadas xenônio para sinalização luminosa, e eles são apresentados nos próximos parágrafos.

As lâmpadas de *flash* de gás xenônio possuem uma restrição da quantidade de vezes que podem ser “piscadas”. No caso do sinalizador luminoso de

faltas, que tem previsão de estar sinalizando durante sua vida útil por até 300 horas a uma taxa de um lampejo luminoso a cada 1,32 s, têm-se que a lâmpada deverá suportar:

$$300 \text{ horas.lampejos} \times 3600 \text{ segundos} \times 1/1,32\text{segundos} = 818.181 \text{ lampejos}$$

Algumas lâmpadas pesquisadas possuem vida útil menor que isto (limitada a 500.000 ou 700.000 acionamentos no máximo) excluindo a possibilidade de sua utilização.

Outro ponto a ser considerado é o consumo de corrente dos componentes externos ao chip de carregamento do capacitor de acionamento da lâmpada e o impacto no consumo quiescente da eletrônica do sinalizador de faltas como um todo e a durabilidade da bateria de alimentação.

Outro potencial problema seria o tamanho do capacitor de 250 V ou 350 V, responsável por fornecer a energia para a descarga elétrica de e acionamento da lâmpada de gás xenônio. Com o espaço limitado da caixa de blindagem eletromagnética do equipamento sinalizador, este capacitor por si só poderia ser o impeditivo para a utilização desta tecnologia.

O tempo de carregamento do capacitor com uma tensão de 3,6 V, conforme a Figura 24 abaixo, pode variar entre 4 segundos e 15 segundos. Esse tempo é incompatível com o que foi considerado ideal pela equipe do projeto para a correta identificação pelo observador do estado operativo do equipamento sinalizador.

Figura 24 – Gráfico da relação entre tensão da bateria, corrente máxima e tempo de carregamento do capacitor de disparo do *flash* luminoso (Allegro MicroSystems - 2010).

Algumas experiências práticas e algumas literaturas indicavam que um intervalo de tempo maior do que 1,32 s entre lampejos luminosos poderiam induzir o observador ao erro, dando a falsa impressão que o equipamento não estivesse atuado quando na verdade estava. Um intervalo de 15 s entre lampejos luminosos poderia obrigar o eletricista a observar cada equipamento entre 30 segundos a 1 minuto ininterruptamente para se certificar que de fato ele não está atuado, acabando completamente com a vantagem da sinalização luminosa a grandes distâncias sobre a sinalização por bandeiras dos modelos de detectores de faltas eletromecânicos.

Em questão de custo, a diferença entre um conjunto de 6 LEDs de alto brilho e de uma única lâmpada de arco xenônio pode chegar a 10 vezes, sendo a lâmpada de arco xenônio a solução mais cara entre as duas. Isso sem considerar os componentes eletrônicos adicionais necessários para o acionamento do *flash* da lâmpada de arco xenônio (cujos custos não são desprezíveis).

Por todos estes motivos, foi descartada no projeto a utilização de lâmpadas de arco xenônio como elemento de sinalização luminosa, apesar de seu excelente desempenho na visualização a longas distâncias, mesmo durante o dia.

3.4.4.2. Estudo do uso de LEDs

Existem diversos tipos de LEDs (*Light-Emitting Diodes*, ou diodos emissores de luz), que são dispositivos semicondutores bipolares que emitem luz quando polarizados diretamente.

Os LEDs para aplicações de sinalização luminosa podem ser divididos basicamente em duas categorias: os de alto-brilho e os de alto-fluxo.

Os primeiros possuem a virtude de apresentar um alto valor de luminância, dada em Candelas (cd). Uma candela é definida como sendo a intensidade luminosa emitida por uma fonte de luz monocromática de 540×10^{12} Hertz em uma dada direção cuja intensidade de radiação na direção é de 1/683 watts por estereoradiano.

Os outros, de alto-fluxo, apresentam um alto valor em lumens (lm), que é o fluxo luminoso emitido por uma fonte puntiforme e invariável de 1 candela, de mesmo valor em todas as direções, no interior de um ângulo sólido de 1 estereoradiano.

Outro fator importante de comparação entre esses LEDs é o ângulo de abertura luminosa. Esse ângulo é determinado pelo padrão de irradiação de intensidade luminosa do LED em função do ângulo. O ângulo de abertura é determinado pelo ponto onde a intensidade luminosa em candela cai a 50% do valor máximo. Se multiplicarmos por dois o ângulo de abertura, é possível determinar o cone de luz irradiado pelo LED em questão.

Os LEDs de alto-brilho, em geral possuem ângulos de abertura menores, pois concentram a intensidade luminosa num pequeno cone de luz para apresentarem um alto valor em candela. LEDs de alto-fluxo, por sua vez, tendem a possuir ângulos de abertura maiores e valores em candela menores, mas com alto valor em lúmen.

Construtivamente, esses dois tipos de LEDs também costumam se diferenciar pelo encapsulamento. Os LEDs de alto-brilho, conforme a Figura 25 abaixo, são encapsulados em invólucros redondos e os LEDs de alto-fluxo, conforme a Figura 26 abaixo, costumam se apresentar em invólucros para montagem em placas de circuito impresso apelidados de “piranha”, com quatro terminais (o que proporciona maior resistência mecânica à montagem).

Figura 25 – LED de Alto-Brilho, invólucro 5 mm redondo.

Figura 26 – LED de Alto-Fluxo, invólucro 5 mm piranha.

Para a aplicação no sinalizador luminoso de faltas, o objetivo é que o dispositivo emissor de luz possa sensibilizar a visão do observador da maior

distância possível, não importando a direção em que se aproxima e a que distância se encontra do equipamento, que por sua vez está posicionado nos fios de média tensão. Portanto, busca-se um compromisso entre uma grande intensidade luminosa, que permitirá que a sinalização seja vista a longas distâncias mesmo durante o dia, e o ângulo de abertura luminosa, que permitirá que a sinalização seja vista de qualquer direção e de qualquer distância.

A melhor solução seria a utilização de um LED de alto-brilho com um grande ângulo de abertura luminosa. Pelas definições citadas acima, um LED desta natureza consumirá também uma maior energia. O consumo de energia do LED a ser utilizado no sinalizador é outro fator de análise, pois existe a limitação do fornecimento de corrente pulsada pela bateria e limitação de carga dessa mesma bateria, que deve permitir 300 horas de sinalização luminosa ao longo dos 10 anos de vida útil prevista para a bateria do dispositivo. O APÊNDICE D deste trabalho mostra um estudo comparativo realizado entre estes dois tipos de LEDs visando à aplicação no equipamento sinalizador luminoso de faltas.

Pelo resultado dos estudos citados acima, pôde-se observar a vantagem e a importância de LEDs com maior ângulo de abertura luminosa para o equipamento sinalizador luminoso de faltas.

Os LEDs de alto-fluxo, no entanto, possuem uma dificuldade grande de adaptação mecânica ao gabinete plástico do equipamento sinalizador, pois são preparados para instalação direta em placas de circuito impresso. Por esse motivo, descartou-se a utilização de LEDs de alto-fluxo do formato “piranha” e buscou-se LEDs redondos, de alto-brilho, com maiores ângulos de abertura luminosa, reunindo o melhor de cada um deles e aprimorando o equipamento sinalizador com o menor impacto possível.

Foi encontrada no mercado, antes da implementação do lote pioneiro do equipamento sinalizador luminoso de faltas, uma família de LEDs que estavam sendo aplicados em sinalização semafórica e possuíam tais características (OPTOSUPPLY, 2009). Foram adquiridos exemplares para testes de viabilidade técnica de uso no equipamento e, depois de aprovados, esses LEDs passaram a integrar a sinalização luminosa do dispositivo:

Tabela 6 – Especificação técnica dos LEDs utilizados no equipamento do lote pioneiro do sinalizador luminoso de faltas (OPTOSUPPLY – 2009).

<i>Item</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Condição</i>	<i>Mín.</i>	<i>Típico</i>	<i>Máx.</i>	<i>Unidade</i>
<i>Tensão CC direta</i>	V_F	$I_F=75\text{mA}$	1,8	2,2	2,6	V
<i>Corrente CC reversa</i>	I_R	$V_R=5\text{V}$	-	-	10	μA
<i>Comprimento de onda dominante</i>	λ_D	$I_F=75\text{mA}$	620	625	630	nm
<i>Intensidade Luminosa</i>	I_V	$I_F=75\text{mA}$	12.000	15.000	18.000	mcd
<i>Ângulo 50% da potência</i>	$2\theta_{1/2}$	$I_F=75\text{mA}$	-	60	-	graus

Figura 27 – Diagrama de irradiação luminosa do LED adotado no lote pioneiro do equipamento sinalizador luminoso de faltas.

Com a adoção desta solução, melhorou-se consideravelmente a visualização da sinalização luminosa do equipamento, com um LED que possui o dobro da abertura luminosa daquele que estava sendo utilizado anteriormente, mais que o dobro da intensidade luminosa e é mecanicamente idêntico ao LED anterior, ou seja, não causou nenhum impacto na parte mecânica do equipamento para que pudesse ser utilizado, ao contrário do que aconteceria se fosse escolhido um LED “piranha”, do tipo alto-fluxo.

3.4.5. Gabinete

O gabinete do equipamento sinalizador luminoso de faltas é um ponto crucial do desenvolvimento e consumiu, ao longo dos projetos de pesquisa do equipamento sinalizador luminoso de faltas, mais da metade do esforço e dos recursos disponíveis.

Questões relacionadas à funcionalidade do dispositivo, à facilidade de utilização pelos eletricitistas de campo, à eficácia na sinalização do defeito, à eficiência na detecção do defeito, à confiabilidade e durabilidade, entre outras, estão intimamente ligadas ao gabinete do equipamento.

O gabinete do sinalizador luminoso de faltas deve prover para o módulo eletrônico abrigo das intempéries. Deve prover aos sensores de tensão e de corrente o correto posicionamento em relação ao cabo da distribuição que se deseja monitorar. Deve ter espaço suficiente para abrigar a fonte de alimentação da eletrônica do dispositivo. Deve direcionar o meio de sinalização luminosa diretamente para o observador. Deve suportar a exposição ao clima e às intempéries durante toda a vida útil do equipamento, estimada em 10 anos. Por fim, deve ser possível fabricá-lo de maneira seriada e economicamente viável, tornando o equipamento desenvolvido competitivo comercialmente e atrativo para o cliente final, que são as concessionárias distribuidoras de energia elétrica.

Com esses requisitos em mente foi desenvolvido um gabinete inovador, objeto de pedido de patente de invenção em 2009 (CPFL, 2009), cujas questões técnicas cruciais são apresentadas e analisadas nos itens subsequentes deste trabalho.

3.4.5.1. Fixação (evolução)

Há basicamente três métodos utilizados para fixação de sinalizadores de faltas diretamente nos cabos aéreos de distribuição de energia elétrica. O primeiro deles é o sistema implementado através de garras e molas, que suportam o equipamento sinalizador e envolvem o cabo de maneira firme com o auxílio de poderosas molas. Exemplos deste tipo de fixação podem ser vistos na Figura 28 abaixo:

Figura 28 – Exemplos de sinalizadores de faltas com fixação através de sistemas com garras e molas. Na ordem: Horstmann - Navigator; Cooper - S.T.A.R. Pathfinder; Linetroll - 110Eμ.

Este sistema é bastante rejeitado pelas equipes de eletricitistas por diversos fatores, que incluem: a dificuldade na instalação e retirada dos equipamentos dos cabos de distribuição, a necessidade de ferramentas especiais em conjunto com o bastão de manobras (utilizado para içar e instalar o equipamento na linha viva), a possibilidade de danificar o cabo durante a retirada dos equipamentos da linha e o perigo para os próprios eletricitistas que manuseiam o equipamento durante a preparação deste para a instalação, devido à possibilidade de fechamento accidental das garras nas mãos do usuário.

Um sistema similar, mas menos problemático é o sistema baseado apenas na utilização de molas, onde uma alça metálica se abre e fecha, permitindo a instalação do equipamento na linha e segurando o equipamento em sua posição de instalação com a ajuda de molas, cujos exemplos podem ser vistos na Figura 29 abaixo:

Figura 29 – Exemplos de sinalizadores de faltas com sistema de fixação por molas. Na ordem: SEL – AutoRanger; LOFA – RTA; FEBRÁS – Detecur.

Alguns dos problemas citados para os sinalizadores que utilizam garras persistem, como a necessidade de ferramentas especiais em alguns casos e a possibilidade de danificar cabos mais frágeis na retirada do equipamento da rede, dependendo da força mecânica dessa mola.

O terceiro tipo de sistema de fixação é similar ao sistema utilizado pelas “garras de linha viva”, amplamente utilizadas pelos eletricitistas, e que se baseiam num grampo rosqueável. O equipamento sinalizador com um formato de gancho, ou com um elemento em formato de gancho, permite que se pendure o equipamento no cabo da rede aérea a ser monitorada e posteriormente proceda-se com o aperto do grampo rosqueável com a ajuda do próprio bastão utilizado para içá-lo. Com esse sistema de fixação não há perigo para o eletricista que prepara o equipamento para a instalação e não há perigo de danificar o cabo onde o equipamento está sendo instalado, pois toda a força aplicada para prender o dispositivo ao cabo é liberada antes da tentativa de retirá-lo da rede, minimizando a interação mecânica entre os elementos e preservando a integridade física do condutor. Exemplos podem ser vistos na Figura 30 abaixo:

Figura 30 – Exemplos de sinalizadores de faltas com sistema de fixação por grampo rosqueável. Na ordem: Fisher Pierce - 1548; ENGRO - IFTA 2000.

Por esses motivos, as equipes de campo da concessionária indicaram o sistema de grampo rosqueável como ideal para o sinalizador luminoso de faltas que estava sendo desenvolvido.

Os primeiros protótipos do equipamento sinalizador luminoso da CPFL, apresentados na Figura 31 abaixo, foram equipados com o sistema de fixação por molas. Isto se deu pela facilidade de implementação (já que se tratava de uma

quantidade reduzida de protótipos para teste) e a simplicidade geométrica do gabinete que possui este sistema de fixação.

Figura 31 – Primeiros protótipos do sinalizador luminoso de faltas da CPFL com fixação por molas.

Alguns protótipos com este sistema foram encaminhados para testes de campo, onde se comprovou as dificuldades e problemas relatados acima. Todas as implementações seguintes do equipamento sinalizador luminoso de faltas passaram a contar com o sistema de fixação por grampo rosqueável.

O protótipo cabeça-de-série do equipamento sinalizador foi o primeiro com este tipo de fixação entre os equipamentos detectores de faltas desenvolvidos pela CPFL. Sua aceitação foi muito boa entre as equipes de eletricitas de campo pela facilidade, agilidade e segurança na instalação e retirada do equipamento dos cabos da linha aérea de distribuição de energia. Entretanto, problemas foram detectados com este tipo de fixação, que não possuía um limitador de torque de fechamento do sistema. A falta de sensibilidade nas mãos dos eletricitas, que trabalham com luvas isolantes recobertas com luvas de proteção de raspa de couro, impediam a aplicação da força correta para a fixação do dispositivo na linha e um torque excessivo era aplicado no equipamento, causando deformações e quebra do gabinete. Essa quebra causava a violação da estanqueidade do dispositivo, conforme ilustrado na Figura 32 abaixo, que era posteriormente danificado pelas chuvas.

Figura 32 – Dispositivo Cabeça-de-série do sinalizador luminoso, sem proteção contra torque excessivo. Verificaram-se casos com rachaduras no gabinete e consequente falha da estanqueidade do dispositivo.

A versão do lote pioneiro do equipamento sinalizador luminoso teve de incorporar um sistema de limitação de torque, feito com um sistema de catraca, que pode ser visto na Figura 33 abaixo. A partir de uma força pré-determinada, suficiente para fixar o equipamento no cabo, mas sem danificar o gabinete, a haste de fixação gira em falso impedindo a quebra do gabinete por aplicação de força excessiva.

Figura 33 – Sistema de catraca de proteção contra torque excessivo. Haste de fixação composta de 2 peças que possuem dentes e encaixes que limitam a força aplicada ao gabinete, evitando danificá-lo.

Esse sistema de proteção permitiu que a fixação através de grampo rosqueável do equipamento sinalizador de faltas se viabilizasse tecnicamente, permitindo sua adoção nos futuros lotes de equipamentos a serem produzidos comercialmente.

3.4.5.2. Formato geral e acomodação de componentes

Desde os primeiros protótipos de teste da viabilidade técnica dos sensores montados em tubos de PVC, o formato geral do equipamento sinalizador luminoso de faltas sempre foi cilíndrico. A diminuição da força de resistência ao vento e a facilidade de posicionamento dos LEDs de sinalização luminosa para atingir os 360° ao redor do equipamento mantiveram este formato geral até os equipamentos do lote pioneiro, mais atuais.

O formato cilíndrico, no entanto, requer que alguns componentes internos acompanhem essa geometria, o que pode ser um complicador técnico e aumentar custos de fabricação. Os primeiros protótipos fabricados para testes de campo e os equipamentos cabeça-de-série possuíam placas eletrônicas redondas conforme a Figura 34 e a Figura 35 abaixo. O custo da área útil de uma placa eletrônica redonda é, na prática, maior do que uma placa quadrada ou retangular. Devido ao método de fabricação das placas, as empresas que confeccionam esses componentes cobram por uma placa redonda de diâmetro externo d o valor de uma placa quadrada de área d^2 .

Figura 34 – Placa eletrônica redonda do primeiro protótipo de campo do sinalizador de faltas CPFL.

Figura 35 – Placa eletrônica redonda com um furo no meio, do protótipo cabeça-de-série do sinalizador de faltas CPFL.

Esse problema foi resolvido na versão mais recente do gabinete onde há espaço interno suficiente para abrigar uma placa quadrada, conforme a Figura 36 abaixo.

Figura 36 – Novo gabinete comporta placa eletrônica quadrada, otimizando espaço útil e reduzindo custo de fabricação.

Outra questão determinante para o formato geral do equipamento é o sistema de fixação que possui. Como já foi apresentado no item anterior, o equipamento sinalizador de faltas em suas versões cabeça-de-série e de lote pioneiro contam com um sistema de fixação através de grampo rosqueável. Esse sistema de fixação exige um elemento em formato de gancho, para que o equipamento fique pendurado no cabo até que o aperto seja dado na haste rosqueável. O gabinete desenvolvido tem o formato de gancho em sua parte superior, conforme mostrado na Figura 37 abaixo, onde também foram posicionados internamente os sensores de tensão e corrente em posições ideais em relação ao cabo que se deseja monitorar.

Figura 37 – Parte superior do gabinete em formato de gancho e haste de fixação deslocada do eixo central, com mordente de fixação no cabo em formato de “L”.

A haste de fixação, funcionalmente, ficaria mais bem alocada no eixo vertical central do equipamento, entretanto, outros problemas sérios derivam dessa decisão, como os observados no protótipo cabeça-de-série do sinalizador, tais como dificuldades de vedação e falta de espaço adequado para a eletrônica do equipamento. Isso forçou o deslocamento da haste para fora do eixo vertical central, facilitando a vedação e liberando maior espaço interno para os componentes, mas exigiu reforços e alterações na peça que faz e prensagem do cabo contra o equipamento, como pode ser visto na Figura 37 acima.

As baterias de alimentação são outro problema para o gabinete do sinalizador luminoso. O tamanho da cavidade reservada para a bateria e o número de baterias que podem ser acomodadas em cada equipamento determinam o diâmetro total do gabinete como um todo. Para permitir o uso do mesmo gabinete em novas aplicações que demandem mais energia que o sinalizador luminoso de faltas, foi implementado no gabinete espaço para duas baterias tamanho D (grande), ao invés de uma única bateria de tamanho C (média), como é necessário para o sinalizador de faltas com sinalização simplesmente luminosa. A comparação entre os equipamentos pode ser feita através da Figura 38 abaixo, que exhibe fotos de ambos os modelos citados:

Figura 38 – Comparação entre tamanhos e formatos dos sinalizadores cabeça-de-série (esquerdo) com uma única bateria de tamanho médio e o sinalizador luminoso de faltas do Lote Pioneiro (direito), com espaço para duas baterias tamanho grande.

3.4.5.3. Vedação e estanqueidade

A aplicação do sinalizador luminoso de faltas na rede aérea de distribuição de energia elétrica expõe continuamente o equipamento ao clima durante toda sua vida útil, na qual o equipamento estará sendo atingido por chuvas de qualquer intensidade. Na prática, nunca se espera que seja submetido a jatos fortes de água e imersão (contínua e/ou temporária), já que não se destina e não é adequado para monitoramento de redes subterrâneas de distribuição de energia.

Segundo a norma brasileira de graus de proteção para invólucros de equipamentos elétricos ABNT NBR IEC 60529 (2005), o mínimo grau de proteção exigível para o gabinete seria o IP-X5, descrito como proteção contra jatos d'água provenientes de qualquer direção. Entretanto, pela longa vida útil prevista para o equipamento e a presença de conectores e terminais elétricos não protegidos no interior do gabinete, desejava-se também uma proteção maior contra a entrada de umidade no interior do dispositivo. Por isso, optou-se por uma vedação que também suportasse imersões temporárias em água (grau IP-X7). A vedação implementada no sinalizador luminoso de faltas do Lote Pioneiro é da faixa de aplicação versátil, com designação IPX5/IPX7, suportando jatos d'água e imersão temporária.

A vedação do gabinete é feita através da prensagem de uma junta de silicone em todo o entorno das peças que formam o corpo principal do equipamento. A vedação é complementada através de anéis de EPDM que vedam as tampas das baterias e permitem a abertura e fechamento destas para troca da bateria sem danificar a vedação.

A verificação da adequação da vedação do equipamento ao grau de proteção desejado foi feito através de testes realizados em ambiente de laboratório, conforme a norma NBR citada acima. Depois de aprovado pela equipe do projeto, o gabinete foi submetido a ensaios em laboratório isento, certificado pelo INMETRO, que conferiu ao gabinete do sinalizador luminoso de faltas do Lote Pioneiro o certificado de grau de proteção versátil IPX5 e IPX7.

3.4.5.4. Método de fabricação

Os primeiros protótipos fabricados para testes de campo foram feitos em acrílico, através de técnica semi-artesanal. Com essa técnica não seria possível obter volume de fabricação dos dispositivos de maneira economicamente viável.

Desde o projeto de desenvolvimento do protótipo cabeça-de-série do sinalizador luminoso de faltas da CPFL, o processo de fabricação escolhido, para atender principalmente aos requisitos de resistência mecânica e de baixo custo por unidade, foi o de moldagem por injeção.

Os primeiros moldes de injeção fabricados para o sinalizador luminoso de faltas da CPFL eram moldes protótipos (retratados na Figura 39, abaixo), com poucos automatismos e com a necessidade de intervenção do operador a cada ciclo de injeção para preparação do molde ou desmoldagem da peça injetada. Esta alternativa foi escolhida por questões de custo. A capacidade de injeção do molde antes de necessitar de manutenção era reduzida, mas ainda assim suficiente para produzir com folga as peças necessárias para atender a fabricação do lote cabeça-de-série do dispositivo sinalizador.

Figura 39 – Moldes de injeção protótipos do gabinete do sinalizador de faltas cabeça-de-série.

Os moldes protótipos também compartilhavam o mesmo porta-molde, o que ajudou a reduzir ainda mais o custo desse ferramental. Entretanto, não era possível produzir todas as peças de uma única vez.

O resultado obtido foram peças fabricadas em Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) com aditivo anti-ultravioleta, de qualidade similar às que seriam obtidas com moldes industriais, porém, o tempo de injeção e a mão de obra associada a essa injeção deixaram os custos do processo muito altos, inviabilizando ainda a produção seriada de modo que o equipamento chegasse ao mercado a preços competitivos.

Depois dos gabinetes produzidos com os moldes protótipos terem sido testados em campo, foram identificados problemas e deficiências já citados neste trabalho, que exigiram um reprojeto do gabinete e, conseqüentemente, a fabricação de novos moldes (apresentados na Figura 40 abaixo), agora sim definitivos, prontos para o processo de produção industrial:

Figura 40 – Moldes definitivos de injeção do gabinete do equipamento sinalizador de faltas.

Esses moldes definitivos permitem a injeção de dezenas de milhares de peças antes que seja necessária a realização de manutenções no ferramental, com qualidade e rapidez bem superiores aos moldes protótipos, pois possuem:

- **Sistema de refrigeração:** Canais por onde circula líquido no interior do molde para manutenção da temperatura adequada da ferramenta dependendo da velocidade do ciclo de injeção programado e do tipo de material que está sendo injetado.
- **Automatização:** Os moldes contam com “gavetas” e outras partes móveis, que permitem que as peças contenham detalhes mais complexos, acionadas automaticamente por sistemas hidráulicos e pneumáticos da própria máquina injetora, sem a necessidade de intervenção do operador a cada ciclo de injeção.
- **Múltiplas cavidades:** Diversos moldes possuem mais do que uma cavidade com a mesma figura, permitindo a injeção de duas peças idênticas simultaneamente, agilizando o processo produtivo e reduzindo pela metade o custo da peça associado à utilização da máquina injetora.
- **Porta-molde individualizado:** Cada molde desenvolvido está alocado em seu próprio porta-molde, permitindo que todas as peças do gabinete do equipamento sinalizador de faltas da CPFL possam ser injetadas em paralelo, passo importante para a produção seriada do equipamento em escala comercial.

Tanto os moldes protótipos, quanto os moldes definitivos citados acima são para a injeção das peças plásticas do gabinete do equipamento sinalizador luminoso de faltas. A caixa de blindagem eletromagnética da eletrônica do equipamento sinalizador de faltas é uma peça interna do equipamento, mas que faz parte do gabinete. Entretanto, não poderia ser puramente de material plástico devido a sua aplicação. Um estudo separado foi realizado durante o desenvolvimento do equipamento para definir sua constituição e seu método de fabricação.

3.4.5.5. Produção da caixa de blindagem eletromagnética

A caixa de blindagem eletromagnética do equipamento sinalizador luminoso de faltas tem a função de proteger a eletrônica do dispositivo do campo elétrico de elevada intensidade a que é submetida quando o equipamento sinalizador é instalado na rede de distribuição de média tensão. A caixa de blindagem eletromagnética envolve toda a placa de circuito impresso do equipamento.

Durante o desenvolvimento do sinalizador de faltas, várias soluções foram levantadas para que se implementasse a caixa de blindagem eletromagnética do dispositivo:

Solução 1) Usinagem da caixa de blindagem, no formato desejado, em ferro.

Solução 2) Usinagem da caixa de blindagem, no formato desejado, em alumínio.

Solução 3) Injeção de uma caixa de blindagem em plástico, com posterior revestimento interno em material metálico condutor.

Solução 4) Injeção da caixa de blindagem em Zamac.

Solução 5) Injeção da caixa de blindagem em Alumínio.

Solução 6) Estampagem da caixa de blindagem em folhas de metal.

Para a análise destas seis soluções, novamente será utilizada a metodologia adaptada a partir do trabalho de Chalos (1992), da mesma maneira já feita no item 3.4.2.3 deste trabalho, por se tratar novamente de uma análise comparativa onde aspectos quantitativos, qualitativos e estratégicos fazem parte do universo de variáveis a serem comparadas:

• FASE I)

Requisito 1) A caixa de blindagem eletromagnética deve ser de material bom condutor de eletricidade, caso contrário não fará seu papel de

Requisito 6) Deve permitir que a malha de terra da placa eletrônica seja interligada eletricamente com a caixa de blindagem para que a caixa sirva como massa de referência (“terra” virtual) para o circuito eletrônico.

Requisito 7) Deve possuir durabilidade igual ou superior à vida útil máxima estimada para o sinalizador de faltas, que é de 10 anos, considerando que vai ficar abrigada das intempéries em ambiente estanque.

Tabela 7 – Tabela de Exclusão da análise da escolha da caixa de blindagem.

	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6
Requisito 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Requisito 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Requisito 3	✓	✓	✓	✓	✓	x
Requisito 4	✓	✓	✓	✓	✓	x
Requisito 5	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Requisito 6	✓	✓	x	✓	✓	✓
Requisito 7	x	✓	✓	✓	✓	x

As soluções 1, 3 e 6 foram descartadas da análise.

• FASE II)

Atribuição de pesos:

A – Custo Unitário: Peso 5

Justificativa: O custo unitário da caixa de blindagem é o fator preponderante para decisão sobre utilização de uma ou outra tecnologia, pois o efeito técnico da caixa é simples e não é drasticamente afetado pela mudança de implementação, desde que os requisitos de projeto tenham sido cumpridos.

B – Peso: Peso 3

Justificativa: É uma meta global do projeto do sinalizador de faltas tornar o equipamento o mais leve possível e a caixa de blindagem metálica, dependendo da solução escolhida, pode contribuir muito negativamente para o peso total do equipamento.

C – Necessidade de Mão de Obra: Peso 2

Justificativa: A necessidade de mão de obra adicional pode encarecer o produto final, portanto não é uma característica desprezível.

D – Necessidade de Investimento Inicial: Peso 1

Justificativa: Normalmente, essa característica deveria possuir um peso bem maior, já que o investimento inicial para fabricação de peças desse tipo é muito alto (moldes para injeção, estamparias, etc.) e o impacto no preço do produto seria significativo. Entretanto no projeto de pesquisa foi previsto recurso para desenvolvimento de ferramentas de injeção e esse custo não necessitará ser repassado ao custo final do dispositivo.

Atribuição de notas normalizadas:

A – Custo Unitário:

Solução 2: R\$30,00

Solução 4: R\$5,50

Solução 5: R\$3,50 (melhor)

Nota normalizada Solução 2: $10 - (10 \times ((30-3,5)/30)) = 1,2$

Nota normalizada Solução 4: $10 - (10 \times ((5,5-3,5)/5,5)) = 6,3$

Nota normalizada Solução 5: **10**

B – Peso:

Solução 2: relativamente leve (melhor)

Solução 4: Menos leve que o alumínio

Solução 5: relativamente leve (melhor)

Nota normalizada Solução 2: **10**

Nota normalizada Solução 4: **8,5**

Nota normalizada Solução 5: **10**

C – Necessidade de Mão de Obra:

Solução 2: Não necessita (melhor)

Solução 4: Não necessita (melhor)

Solução 5: Não necessita (melhor)

Nota normalizada Solução 2: **10**

Nota normalizada Solução 4: **10**

Nota normalizada Solução 5: **10**

D – Necessidade de Investimento Inicial:

Solução 2: Não necessita (melhor)

Solução 4: Necessita – alto (> R\$50.000,00)

Solução 5: Necessita – alto (> R\$50.000,00)

Nota normalizada Solução 2: **10**

Nota normalizada Solução 4: **0**

Nota normalizada Solução 5: **0**

• **Fase III)**

Tabela de Comparação do processo de análise:

Tabela 8 – Tabela de Comparação da análise de escolha da caixa de blindagem.

	A		B		C		D	
SOL. 2	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso
	1,2	5	10	3	10	2	10	1
SOL. 4	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso
	6,3	5	8,5	3	10	2	0	1
SOL. 5	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso
	10	5	10	3	10	2	0	1

$$Conc_{SOL2} = \frac{1,2 \cdot 5 + 10 \cdot 3 + 10 \cdot 2 + 10 \cdot 1}{5 + 3 + 2 + 1} = 6$$

$$Conc_{SOL4} = \frac{6,3 \cdot 5 + 8,5 \cdot 3 + 10 \cdot 2 + 0 \cdot 1}{5 + 3 + 2 + 1} = 7$$

$$Conc_{SOL5} = \frac{10 \cdot 5 + 10 \cdot 3 + 10 \cdot 2 + 0 \cdot 1}{5 + 3 + 2 + 1} = 9,1$$

Tabela 9 – Resultado Final da análise da escolha da caixa de blindagem do sinalizador de faltas.

Solução	Nota Final (ordem decrescente)	Posição no ranking
SOL. 5	9,1	1^a
SOL. 4	7	2 ^a
SOL. 2	6	3 ^a

A metodologia de análise proposta indicou a solução 5 (injeção da caixa de blindagem em Alumínio) como melhor tecnologia para ser utilizada na confecção da caixa de blindagem do equipamento sinalizador de faltas e que deverá apresentar o melhor resultado global para a produção do equipamento, dentre todas as 6 opções tecnológicas disponíveis para a escolha da equipe de desenvolvimento na época do projeto.

De fato, essa foi a tecnologia escolhida para confeccionar as caixas de blindagem do equipamento sinalizador de faltas do lote pioneiro (Figura 43 abaixo), portanto, não há críticas ou sugestões de mudanças a serem feitas na rota tecnológica escolhida para desenvolvimento deste componente.

Figura 43 – Caixa de Blindagem Injetada em alumínio do Equipamento Sinalizador de Faltas.

Percebe-se que o fator custo unitário e peso foram preponderantes para o ranqueamento das soluções, pois apresentariam, respectivamente, o maior

impacto no custo final do produto e o maior impacto técnico global, relacionado a este componente específico.

Tendo sido escolhida a tecnologia de injeção em alumínio para confecção das caixas de blindagem, o ferramental foi desenvolvido (como apresentado na Figura 44 abaixo) e o lote de caixas de blindagem de material condutor foi fabricado para compor o lote pioneiro do sinalizador luminoso de faltas que foi encaminhado para testes de campo (como ilustrado na Figura 45 abaixo).

Figura 44 – Desenvolvimento de molde de Injeção em alumínio da caixa de blindagem do equipamento sinalizador luminoso de faltas.

Figura 45 – Peças da caixa de blindagem injetadas em alumínio.

3.4.5.6. Material e durabilidade do gabinete

O material escolhido para compor o gabinete plástico do equipamento sinalizador luminoso de faltas deveria atender a algumas exigências básicas do projeto:

- Suportar a ação dos raios UV sem se degradar de forma acelerada;
- Suportar variações de temperatura que vão desde os -40 até $+85^{\circ}$ C, previstos no guia de testes internacional de sinalizadores de faltas;
- Suportar a ação dos fortes campos elétricos e magnéticos presentes nas linhas de distribuição de energia elétrica até 69 kV;
- Possuir cor preta para aumentar o contraste entre a sinalização luminosa e o gabinete, maximizando a distância de visualização;
- Suportar exposição ininterrupta ao clima por até 10 anos (que é a expectativa de vida útil do equipamento).

Esse conjunto de exigências demanda a utilização de plásticos de engenharia de alto desempenho para a injeção do gabinete plástico. Tais plásticos possuem custo mais elevado, entretanto podem suportar situações extremas, como as descritas acima. Em geral, esses tipos de plásticos são muito utilizados na indústria automobilística e na construção civil, em aplicações para ambientes externos.

Todas as exigências básicas do projeto podem ser atendidas com a escolha correta do plástico a ser utilizado para injetar o gabinete do equipamento, a utilização de aditivos em quantidade suficiente para evitar a degradação acelerada pelos raios UV e pigmentação suficiente para lhe conferir a cor preta, que também ajuda a proteger o plástico da ação danosa dos raios solares.

A durabilidade desejada para o equipamento sinalizador luminoso de faltas é de dez anos e o plástico deve suportar todo esse período exposto às intempéries continuamente. Deve possuir robustez mecânica para suportar também o transporte e o procedimento de instalação executado pelos eletricitas de manutenção de campo da rede de distribuição de energia.

Questões econômicas devem ser levadas em consideração, pois o gabinete do equipamento representa parte significativa do custo total de fabricação do sinalizador de faltas. Entretanto, não se pode deixar de cumprir os requisitos técnicos mínimos, já citados acima.

3.4.5.7. Escolha do Material

A escolha do material foi feita com o auxílio de especialistas na área química de degradação de polímeros e da área técnica de aplicação de plásticos de engenharia.

Dados os requisitos citados na introdução do item 3.4.5.6 deste trabalho e o detalhamento da forma de instalação e utilização do sinalizador de faltas, os profissionais consultados indicaram para o gabinete do sinalizador luminoso um material bastante utilizado na indústria automobilística, que é uma blenda de *policarbonato com poli(tereftalato de butila)*, PC/PBT. Produzido e vendido no Brasil pela *Sabic Innovative Plastics* com o nome comercial *Xenoy* (SABIC,

2005), este material já é produzido com aditivo anti-UV e apresenta alta durabilidade em exposição ao clima. Além disso, a blenda PC/PBT tem excelente resistência a ataque químico, o que lhe garantirá maior durabilidade em ambientes agressivos, como os encontrados em grandes cidades (chuva ácida) ou na proximidade de instalações industriais.

Dependendo da formulação do *Xenoy* que fosse utilizado, seria necessário especificar a incorporação do pigmento "negro de fumo" na formulação, além do sistema de aditivos para proteção UV. Para a injeção do gabinete do sinalizador luminoso, a formulação escolhida já continha níveis suficientes de pigmento e aditivos para a aplicação, excluindo a necessidade de adição de qualquer outro componente.

Ficou como sugestão dos especialistas, visando aumentar a sua estabilidade do ponto de vista de evitar ou retardar processos de degradação do tipo "*stress cracking*", a modificação do projeto do molde eliminando os pontos de tensão residual, localizados na base de fixação dos parafusos.

Visando garantir a durabilidade, alguns requisitos deveriam ser observados:

- Para o fechamento da peça deveriam ser utilizados exclusivamente parafusos de aço inox e porcas auto-travantes, perfeitamente isentos de qualquer tipo de lubrificação.
- Os anéis de vedação também não poderiam ter nenhum tipo de lubrificante ou engraxante.
- Apesar da alta resistência do material a ataque químico, no interior da peça não deveria haver nenhum componente líquido ou pastoso do tipo lubrificante ou desmoldante.
- Não poderia haver contato da peça com outros componentes plásticos que contivessem plastificante de qualquer natureza, como por exemplo, PVC plastificado.
- As baterias colocadas dentro do dispositivo não poderiam apresentar nenhum tipo de vazamento durante o período previsto para a duração do conjunto, sendo recomendável que as mesmas sejam envolvidas por um filme de polietileno antes de serem alojadas no interior do dispositivo.

As recomendações acima foram seguidas para assegurar a maior durabilidade possível para o gabinete do equipamento sinalizador luminoso de faltas.

3.4.5.8. Aspectos ligados ao trilhamento elétrico

Já na fase final de desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso de faltas em sua versão comercial, suscitou-se uma discussão entre a equipe do projeto e parceiros industriais que participaram da fabricação do lote pioneiro do equipamento sinalizador sobre a suportabilidade do gabinete plástico injetado em PC/PBT ao trilhamento elétrico durante sua utilização nos condutores nus ou protegidos das redes aéreas de distribuição de energia elétrica.

Esta discussão motivou a realização de estudos e consultas a especialistas sobre o assunto para eliminar a dúvida sobre possíveis problemas de degradação acelerada e quebra que poderiam ocorrer com o gabinete plástico durante sua utilização.

A questão da resistência ao trilhamento elétrico do material do gabinete jamais havia sido abordada diretamente anteriormente, pois estava implicitamente assumido que a mesma não era relevante numa aplicação como a do sinalizador. Este pressuposto era plenamente corroborado pelo fato de não existir qualquer exigência ou referência a testes de resistência ao trilhamento no guia internacional de testes de sinalizadores de faltas (IEEE, 2007), o único documento desse tipo existente no mundo. Também corroborava o pressuposto o fato de não haver qualquer referência a esta característica em nenhuma informação fornecida pelos fabricantes de qualquer dos sinalizadores existentes no mercado mundial.

A Norma ABNT NBR 10296 (1988), intitulada: “Material isolante elétrico - Avaliação de sua resistência ao trilhamento elétrico e erosão sob severas condições ambientais”, prescreve métodos de ensaio para avaliação do material isolante elétrico para uso sob severas condições ambientais com frequências industriais (48 Hz a 62 Hz), através de medidas da resistência ao trilhamento elétrico e erosão, usando um líquido contaminante e corpos-de-prova em planos inclinados. As condições de ensaio previstas na norma são designadas para acelerar a produção dos efeitos, mas não reproduzem todas as condições encontradas em

serviço.

As condições de serviço a que se refere à norma citada estão relacionadas com equipamentos cujos corpos são instalados na rede elétrica em contato direto com os condutores de fase e sendo submetidos à diferença de potencial total presente entre os alimentadores primários ou entre os alimentadores e o neutro ou alguma estrutura aterrada. Nessas circunstâncias, a tensão de linha ou de fase do sistema causará solicitação elétrica sobre o material isolante do corpo do equipamento, notadamente sobre sua superfície, que em presença de contaminantes e umidade pode dar ensejo a densidades superficiais de corrente de condução. Tais densidades de corrente, em geral, não se distribuem uniformemente, podendo concentrar-se em caminhos preferenciais que, ao final, podem dar origem ao trilhamento.

As condições de serviço acima descritas não se assemelham àquelas a que são submetidos os sinalizadores luminosos de faltas. O corpo de cada sinalizador é instalado diretamente sobre o condutor de uma fase do alimentador primário, mas não fica submetido à tensão de fase ou de linha do sistema, pois não faz contato físico com nenhum dos outros condutores (de fase ou de neutro) assim como com qualquer estrutura aterrada. Desta forma não existe caminho possível para densidades superficiais de correntes de condução que possam originar o fenômeno de trilhamento elétrico nos corpos dos sinalizadores.

A única outra forma de corrente que poderia ser produzida no corpo do sinalizador seria a corrente de deslocamento (ou de polarização), induzida capacitivamente pelo gradiente do campo elétrico existente nas proximidades do condutor de fase. Este tipo de corrente, no entanto, é limitado pelas elevadas reatâncias capacitivas envolvidas, uma vez que o gabinete de sinalizador é de pequenas dimensões, não se apresentando como risco em potencial para causar dano ao material.

Em face das condições de serviço acima expostas, é compreensível que nem o guia ANSI/IEEE 495 (2007) nem qualquer material de informação fornecido por fabricantes de sinalizadores existentes no mercado se refira a ensaios ou características referentes à resistência ao trilhamento elétrico do material dos gabinetes de tais equipamentos, o que indica claramente tratar-se de um requisito inaplicável ao caso. Entretanto, o parceiro industrial quis aplicar a ABNT NBR 10296 (1988) para ensaiar o PC/PBT utilizado no gabinete do sinalizador e isto motivou

este estudo.

Foram consultados especialistas da área que fizeram as seguintes considerações sobre o assunto:

- Não se vê a necessidade do invólucro externo do sinalizador possuir resistência ao trilhamento elétrico, principalmente no caso do mesmo ser instalado em condutores nus da rede de alta tensão. No caso do uso do sinalizador instalado sobre a cobertura de cabos cobertos (condutores de redes compactas), também não se prevê que possa haver problemas em condições ambientais normais. Especificamente em ambientes agressivos, como a orla marinha, por exemplo, se aconselha que seja feita uma avaliação da interação dos materiais da cobertura do cabo e do gabinete do sinalizador. O ensaio de resistência ao trilhamento elétrico, entretanto, não se presta a este tipo de avaliação.
- Não existem ensaios previstos em normas (brasileiras ou internacionais) recomendados para avaliar a interação entre materiais isolantes instalados juntos sobre condutores energizados. Foi sugerido, no entanto, que se poderia tentar realizar uma adaptação de um ensaio previsto na norma ABNT NBR 9512 (1986), intitulada: “Fios e cabos elétricos - Intemperismo artificial sob condensação de água, temperatura e radiação ultravioleta-B proveniente de lâmpadas fluorescentes”, que prescreve o método recomendado para determinação da resistência ao intemperismo dos componentes de fios e cabos elétricos e seus acessórios. A adaptação consistiria, basicamente, em colocar um sinalizador sobre um trecho de cabo coberto submetido ao ensaio de intemperismo e, após a conclusão do procedimento, inspecionar as superfícies do cabo e do sinalizador que permaneceram em contato para avaliar as condições de deterioração de ambos. Um ensaio desse tipo não apresenta resultados objetivos, como limiares precisos de aceitação ou recusa, mas pode oferecer informações úteis para inferir possíveis influências negativas na durabilidade dos materiais envolvidos na aplicação. Caso algum sinal de dano apreciável fosse observado em tal ensaio seria possível estudar medidas eficientes a serem adotadas para amenizar o fenômeno.

Pelo exposto, conclui-se que os ensaios previstos na norma ABNT NBR 10296 (1988) não devem ser considerados aplicáveis ao material do gabinete do sinalizador em virtude das especificidades de sua aplicação.

4. RESULTADOS

Ao longo do desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso de faltas (objeto de estudo e análise deste trabalho) muitos resultados importantes foram obtidos e podem ser divididos em quatro conjuntos distintos:

- Equipamentos
- Publicações
- Propriedade Industrial
- Sistema Computacional

4.1. EQUIPAMENTOS

As três versões desenvolvidas do equipamento sinalizador luminoso de faltas aplicáveis em campo são apresentadas nas Figuras 46, 47 e 48, abaixo:

Figura 46 – Primeiro protótipo de campo com eletrônica discreta.

Figura 47 – Protótipo Cabeça-de-série com chip microeletrônico e tecnologia COB.

Figura 48 – Equipamento sinalizador luminoso do Lote Pioneiro. Versão final para inserção no mercado.

A Figura 46 ilustra o primeiro protótipo do equipamento sinalizador luminoso de faltas encaminhado para testes de campo. Seu sistema de fixação era por molas e sua eletrônica era feita através de componentes comerciais, sem chips microeletrônicos proprietários. Demonstrou a viabilidade técnica do desenvolvimento e apontou os principais problemas que deveriam ser abordados e resolvidos nos projetos seguintes.

Na Figura 47 está ilustrado o equipamento sinalizador luminoso de faltas em sua versão Cabeça-de-série. Em estágio pré-industrial, contava com moldes protótipos de injeção de termoplástico para confecção das peças de seu gabinete e era equipado com o chip microeletrônico desenvolvido especialmente para a aplicação, implementado através da tecnologia COB em sua placa microeletrônica. Já implementado com todas as funcionalidades desejadas para operação prática em campo do dispositivo, seu desenvolvimento permitiu que a equipe de projeto depositasse o primeiro pedido de patente sobre o assunto (CPFL, 2006), cobrindo o desenvolvimento como um todo (parte eletrônica funcional e gabinete mecânico). Através da montagem em maior quantidade deste equipamento e sua aplicação em campo, foi possível obter mais dados sobre sua viabilidade econômica. Os resultados dos testes de campo mostraram problemas de confiabilidade que exigiram novo projeto.

Na Figura 48 é mostrado o equipamento sinalizador luminoso de faltas em sua versão final, implementada dentro do projeto de Lote Pioneiro e Inserção de Mercado com os resultados do projeto paralelo de desenvolvimento do equipamento rastreador de faltas com comunicação sem fio. Nesta versão os problemas encontrados nas versões anteriores foram resolvidos. Novos moldes de injeção foram projetados e confeccionados, agora para produção seriada do equipamento, e novo chip SMD proprietário foi fabricado a partir de novo projeto, mais robusto e confiável que as versões anteriores.

Foi produzido um lote de 1000 unidades do equipamento sinalizador em sua versão final, dentro do projeto de Lote Pioneiro. Esses equipamentos foram divididos entre as diversas regiões de atuação da CPFL no interior do estado de São Paulo e nas áreas de atuação da RGE no Rio Grande do Sul. Todos os eletricitas envolvidos no teste do equipamento foram treinados para realizarem a correta instalação e operação do dispositivo, além de realizar seu acompanhamento no dia-

a-dia em campo.

O resultado do acompanhamento em campo desses equipamentos se mostrou satisfatório, uma vez que a maioria das equipes relataram atuações positivas do sinalizador, reduzindo em diversas oportunidades o tempo necessário para localização do defeito e restabelecimento do fornecimento de energia para áreas afetadas pelo desligamento da rede pelos equipamentos de proteção.

Houveram relatos também de atuações errôneas ou não atuação do dispositivo em ocorrências de defeitos em alimentadores nos quais havia sinalizadores de faltas instalados no caminho percorrido pela corrente de curto. Nesses eventos pode ter ocorrido um aumento do tempo de localização da falta. Na maioria dos casos em que a equipe do projeto foi chamada para analisar o suposto mau funcionamento, outros problemas na rede de distribuição de energia e na sua proteção (falta de coordenação, ou não atuação da proteção) foram encontrados e certamente foram os causadores do aparente mau funcionamento do sinalizador, que na verdade respondeu corretamente a uma sequência de eventos atípicos, causando confusão às equipes de manutenção. Uma análise interessante de um exemplo real de atuação errônea com essas características é mostrada no APÊNDICE E. Neste caso específico, a equipe de eletricitas ignorou a não atuação de um equipamento de proteção de rede e se guiou por um conjunto de sinalizadores atuados em trecho por onde não passou o defeito. Entretanto, esses equipamentos atuaram devido à falha de um equipamento de proteção em um ramal a montante de seu ponto de instalação, onde realmente o defeito estava localizado.

4.2. PUBLICAÇÕES

A preocupação com o sigilo e a propriedade industrial do desenvolvimento foi constante ao longo dos quase nove anos de desenvolvimento, de modo que as publicações sobre o assunto começaram a ser feitas apenas a partir do momento em que ocorreu o depósito do pedido de patente do dispositivo no INPI Brasil.

Depois do depósito do pedido de patente, diversas publicações sobre o equipamento sinalizador luminoso de faltas e de todos os estudos e

desenvolvimentos relacionados começaram a ser realizados. Entre essas publicações, as mais importantes são:

- Artigo completo nos anais do VII CBQEE (Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica) – Santos/SP – 2007: “*Sinalizador Luminoso Monofásico de Falta para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica até 69 kV*”. (SANTOS, 2007).
- Artigo completo nos anais e apresentação oral no XVIII SENDI (Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica) – Olinda/PE – 2008: “*Arranjo Interinstitucional para Desenvolvimento de um Lote Pioneiro de Equipamento Sinalizador de Falta em Redes Aéreas de Distribuição de Energia*”. (SANTOS, 2008).
- Artigo completo nos anais do VIII CBQEE (Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica) – Blumenau/SC – 2009: “*Redução no Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais Aplicando o Sinalizador de Falta*”. (ANDRADE, 2009).
- Artigo completo nos anais e apresentação oral no XIX SENDI (Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica) – São Paulo/SP – 2010: “*Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador Luminoso de Falta*”. (FERREIRA, 2010).
- Artigo completo nos anais do ABINEE TEC 2011 – São Paulo/SP – 2011: “*Detector de Falha em Distribuição de Energia Elétrica*”. (SANTANA, 2011).
- Artigo na P&D (Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL) Nº 4, agosto de 2011: “*Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador Luminoso de Falta*”. (FERREIRA, 2011a).
- Artigo completo e apresentação oral no VI CITENEL (Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica) – Fortaleza/CE – 2011: “*Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador Luminoso de Falta*”. (FERREIRA, 2011b).
- Artigo completo e apresentação oral no VI CITENEL (Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica) – Fortaleza/CE – 2011: “*Metodologia de Otimização para Instalação de Sinalizadores de Falta em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*”. (FERREIRA, 2011c).

4.3. PROPRIEDADE INDUSTRIAL

Conforme já foi descrito no texto deste trabalho, foram gerados dois pedidos de patente relativos ao desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso de faltas, um deles do equipamento como um todo, em sua versão cabeça-de-série, e outra do gabinete reformulado:

- “*Dispositivo sinalizador de falhas monofásico aplicável em redes aéreas de distribuição de energia elétrica*”. INPI, Modelo de Utilidade MU8600792-0 de abril de 2006.
- “*Gabinete para equipamentos aplicáveis em fiações e cabos condutores de eletricidade suspensos no ar*”. INPI, Invenção PI0903605-9 de setembro de 2009.

4.4. SISTEMA COMPUTACIONAL

Visando maximizar os benefícios com a instalação de sinalizadores de faltas, estudou-se o problema de alocação de sinalizadores na rede de distribuição, e gerou-se metodologia e um software de otimização para indicação dos melhores pontos para instalação dos dispositivos. Conforme o APÊNDICE A, o sistema de otimização é baseado em algoritmos genéticos, cuja função objetivo busca minimizar a Energia Não Distribuída (END) somada aos custos de instalação e manutenção de equipamentos sinalizadores de faltas na rede elétrica, sujeita a restrições orçamentárias, quantitativas e de meta de redução do indicador de qualidade do serviço TMAE (FERREIRA, 2011c).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Métodos de localização de faltas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica baseados em medições centralizadas na SE são bastante utilizados e apresentam bons resultados no auxílio à detecção e localização de defeitos. Entretanto, devido à natureza da topologia da rede de distribuição, que em geral é radial e ramificada, esses métodos podem apontar múltiplos pontos de provável localização da falta. A utilização de métodos de detecção e localização de faltas baseados em medições distribuídas, como os equipamentos detectores e sinalizadores de faltas, permitem a identificação dos ramos da rede por onde passou a corrente de defeito. Se instalados em pontos estratégicos, principalmente em bifurcações, conduzem a equipe de manutenção emergencial diretamente até o ramo de rede afetado, permitindo seu rápido isolamento e restabelecimento do fornecimento para os consumidores dos ramos restantes do alimentador. Através da revisão bibliográfica, foi possível perceber que nenhum método isoladamente consegue apresentar o máximo desempenho de melhoria dos indicadores de qualidade do serviço prestado, principalmente o relativo ao tempo de atendimento a ocorrências emergenciais, TMAE. O uso de técnicas baseadas em medições centralizadas é bem complementado com o uso de técnicas de localização baseadas em medições distribuídas.

Por esses motivos, investiu-se no desenvolvimento de um equipamento sinalizador de faltas com tecnologia completamente nacional e custo relativamente mais baixo que outros equipamentos importados com as mesmas funcionalidades, viabilizando o uso em maior escala nas redes aéreas de distribuição de energia elétricas nacionais.

O equipamento sinalizador luminoso de faltas desenvolvido pela CPFL, em parceria com a Universidade de São Paulo (USP) e a empresa de base tecnológica Expertise Engenharia Ltda., de Campinas/SP, dentro do programa de P&D ANEEL, passou por todas as etapas de pesquisa, desde a pesquisa básica e provas de conceito, passando pelo desenvolvimento experimental, cabeça-de-série e lote pioneiro, chegando à fase de inserção de mercado. Gerou dois pedidos de

patentes e diversas publicações, além de ter boa aceitação pelas outras concessionárias nas ocasiões em que foi apresentado em feiras de congressos e seminários do setor elétrico.

A linha de pesquisa para desenvolvimento do sinalizador luminoso de faltas da CPFL contou com diversas frentes, distribuídas pelas áreas elétricas e eletrônicas (detecção do curto-circuito e acionamento da sinalização luminosa), microeletrônica (desenvolvimento do chip proprietário de baixo consumo de energia), mecânica (desenvolvimento do gabinete plástico estanque e moldes de injeção plástica e de alumínio, nas versões protótipo e definitivo), química (escolha do material para injeção do gabinete plástico com durabilidade adequada para exposição contínua ao clima) e ótica (desenvolvimento da melhor solução de sinalização luminosa). Através da análise crítica da rota tecnológica adotada para o desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso de faltas, foi possível chegar a diversas conclusões importantes:

- *Sensoreamento de grandezas elétricas:* o equipamento sinalizador luminoso de faltas desenvolvido conta com sensor indutivo de corrente e sensor capacitivo de tensão, capazes de medir, respectivamente, variação de campo magnético e presença de campo elétrico. Caso fosse implementado com núcleo aberto de material ferromagnético, o sensor de corrente poderia apresentar maior exatidão e sensibilidade se fosse confeccionado com um núcleo fechado. Entretanto, essa solução alternativa traria grandes problemas mecânicos e construtivos para o gabinete do equipamento, sem mencionar a falta de necessidade de maior exatidão e sensibilidade para a aplicação, onde basta detectar variações na magnitude da corrente alternada no ponto da rede elétrica que estiver sendo monitorado pelo equipamento. O sensor capacitivo de tensão é altamente influenciado por variações geométricas da instalação e fatores ambientais, apresentando baixa exatidão de medição da tensão. Para a detecção de falta, no entanto, basta a detecção da presença ou ausência de tensão, sendo a exatidão do sensor desenvolvido suficiente para detectar se a tensão está acima ou abaixo de uma tensão de referência fixada a priori e que representa algo próximo de 0,75 pu da tensão nominal da rede de distribuição a ser monitorada. O ajuste do nível de referência de detecção de tensão em 0,75 pu permite a aplicação do sinalizador luminoso

de faltas após chaves fusíveis, detectando atuações monofásicas da proteção. Apesar de ser o único diferencial do equipamento relacionado ao sensoreamento de grandezas elétricas e suas funcionalidades, esse ajuste específico torna o sinalizador de faltas da CPFL bastante atrativo frente a outros equipamentos similares presentes no mercado, que não são recomendados para instalação após dispositivos de proteção monopolares, como chaves fusíveis.

- *Funcionalidades:* O abandono das antigas técnicas de detecção de curto-circuito através de uma referência fixa de corrente que gatilhava a sinalização visual, com a adoção do sistema de ajuste automático à corrente de carregamento da rede elétrica (di/dt) e detecção de tensão para identificação do estado operativo das proteções, permitiram um salto tecnológico importante nos dispositivos detectores e sinalizadores de faltas que tornaram novamente sua utilização atrativa para as equipes de manutenção da rede elétrica. A implementação dessas novas funcionalidades básicas, em conjunto com o sistema *Anti in-rush* e o rearme automático por tempo e tensão, equipararam o sinalizador luminoso de faltas desenvolvido pela CPFL aos confiáveis equipamentos internacionais, já consagrados no mercado, como pode ser visto na Tabela 1 do item 2.1.2 deste trabalho.
- *Microeletrônica:* Atualmente é possível que todas as lógicas de operação do sinalizador luminoso de faltas sejam programadas em um microcontrolador de baixíssimo consumo, alimentado apenas por uma bateria não recarregável. Entretanto, buscando baratear o custo de produção seriada do equipamento, maximizar a vida útil da fonte de alimentação e proteger ao máximo a propriedade industrial agregada ao equipamento, a utilização do ASIC foi mantida até o final do desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso. Sobre o encapsulamento do ASIC, testou-se no lote cabeça-de-série o processo “*chip on-board*” (COB), que parecia ser a melhor solução e com custo mais acessível. Entretanto, a falta de prestadores de serviço tecnicamente capacitados em território nacional e a baixa confiabilidade do processo, que resultou em alto índice de quebra, fez com que outra solução de encapsulamento, a SMD, fosse adotada na versão definitiva do

equipamento. Pela análise realizada neste trabalho, de fato esta outra solução seria a melhor para a aplicação. Analisando os outros equipamentos presentes no mercado (Tabela 1 do item 2.1.2), vê-se que vários deles possuem longos tempos de vida útil e de durabilidade da bateria, apesar de serem baseados em microcontroladores. Se houvesse uma maior insistência, é possível que na época do desenvolvimento a equipe de projeto encontrasse uma solução baseada em microcontrolador viável tecnicamente e economicamente, evitando todos os problemas e os percalços enfrentados com o desenvolvimento e a aplicação do ASIC, tendo como benefício adicional maior flexibilidade nas funcionalidades e ajustes do equipamento sinalizador para cada tipo de utilização e clientes específicos.

- *Fonte de Alimentação:* Os principais requisitos técnicos de desenvolvimento do equipamento sinalizador luminoso referentes à fonte de alimentação eram a maior vida útil e a menor necessidade de manutenção. Esses objetivos foram plenamente alcançados com a utilização de baterias de lítio-íon não recarregáveis. Frente às alternativas de incorporações de células fotovoltaicas, de núcleos fechados para captação de energia diretamente da rede elétrica ou da utilização de baterias recarregáveis com limitados ciclos de carga e descarga, a solução de utilização de baterias não recarregáveis mostrou-se a mais vantajosa economicamente. Visando garantir a adequação da bateria escolhida para a aplicação, foi feito em laboratório um ensaio para aferição da capacidade de carga da bateria escolhida, com resultados satisfatórios. Os ultracapacitores, que se apresentam como substitutos às baterias recarregáveis com algumas vantagens técnicas, são mais caros. Pela crescente popularização deste dispositivo, seus custos vêm baixando constantemente e podem num futuro próximo viabilizar a adoção de métodos de captação de energia do meio para complementar ou substituir a fonte de alimentação atual do equipamento.
- *Sinalização Luminosa:* Elemento de extrema importância no equipamento. Os estudos realizados mostraram que a sinalização luminosa será tão mais eficiente quanto maior for o ângulo de abertura luminosa do dispositivo emissor de luz e a potência luminosa irradiada por esse dispositivo. Questões

de adaptação mecânica impediram a utilização de LEDs de alto-fluxo e questões de custo e durabilidade impediram a utilização de lâmpadas de gás xenônio, que possuíam essas qualidades desejadas. A sinalização luminosa no equipamento desenvolvido foi implementada com LEDs de alto-brilho utilizados em sinalização semafórica, que trazem para o encapsulamento redondo usual dos LEDs um grande ângulo de abertura luminosa e uma grande potência, sendo facilmente acomodado no gabinete do dispositivo sinalizador de faltas. Desta maneira, a sinalização luminosa pode ser visualizada a grandes distâncias e por observadores posicionados em qualquer local ao redor do equipamento sinalizador, minimizando o tempo despendido para checagem do estado operativo do equipamento pelas equipes de manutenção que percorrem a rede de distribuição de energia em busca do defeito.

- *Gabinete Plástico:* O desenvolvimento do gabinete para o equipamento sinalizador luminoso de faltas tomou mais da metade do tempo e dos recursos ao longo dos diversos projetos de pesquisa realizados, de modo que pudesse atender plenamente aos requisitos funcionais, estéticos, de durabilidade, de confiabilidade e de segurança no momento de seu manuseio e instalação em linha viva. Esse fato leva à reflexão sobre a real necessidade de investimento tão grande de tempo e dinheiro para desenvolvimento dentro do projeto de P&D de algo que não deveria ser o foco principal da equipe de projeto, formada basicamente por pesquisadores e especialistas da área de engenharia elétrica. Além disso, o desenho industrial do gabinete do produto está em parte ligado ao sistema produtivo e por esse motivo poderia ser deixado à cargo do parceiro industrial, desde que fossem respeitadas as necessidades essenciais e funcionalidades básicas esperadas desse gabinete. Voltando ao caso específico do sinalizador de faltas desenvolvido, os requisitos de segurança e agilidade na instalação foram atendidos pela utilização do sistema de grampo rosqueável, indicado pelos próprios eletricitistas de campo da CPFL como melhor opção para o sistema de fixação. Esse também é um diferencial do equipamento desenvolvido em relação a outros dispositivos similares já em utilização nas concessionárias distribuidoras de energia elétrica nacionais. Funcionalidades inovadoras,

como a catraca de proteção limitadora de torque de fechamento, permitiram o depósito de pedido de patente de inovação desse gabinete. Grande parte dos recursos utilizados foi destinada ao desenvolvimento de ferramental específico de injeção das peças plásticas que fazem parte do gabinete do equipamento, sempre pensando no barateamento da produção e inserção do equipamento no mercado a preços competitivos. O material utilizado na injeção das peças plásticas do gabinete foi estudado a fundo antes de sua definição, com o auxílio de especialistas da área química, mais especificamente da área de degradação de polímeros. Para possibilitar a vida útil desejada para o equipamento de dez anos exposto continuamente ao clima e boa resistência mecânica, está sendo utilizada uma blenda de PC/PBT com aditivos anti-UV, já bastante utilizada na indústria automotiva com bons resultados.

- *Caixa de blindagem eletromagnética:* Elemento importante para garantir a suportabilidade da microeletrônica do sinalizador de faltas aos altos campos eletromagnéticos a que é submetida pela proximidade dos fios da rede de distribuição de energia elétrica de média tensão, a caixa metálica que abriga a placa eletrônica chegou a representar algo próximo de um terço do custo total das peças e componentes do equipamento, refletindo diretamente no aumento do custo final de venda do sinalizador. Várias tecnologias e métodos de fabricação dessa caixa metálica foram pesquisados. A análise comparativa realizada neste trabalho apontou como melhor solução a injeção da caixa de blindagem em alumínio. Essa solução foi adotada na prática, com o desenvolvimento de ferramental específico para injeção das peças metálicas de forma automatizada e pronta para produção seriada a custos competitivos, que são apenas uma fração dos custos de usinagem das caixas uma a uma, como já foi feito no passado em lotes protótipos menores.

Em complemento às conclusões expostas acima, é importante apresentar uma comparação entre a versão final do sinalizador luminoso de faltas desenvolvido com os outros equipamentos mais conhecidos, presentes no mercado. Essa análise é feita a partir dos dados presentes na Tabela 1 do item 2.1.2 deste trabalho:

- Na questão do sistema de alimentação, com exceção dos sinalizadores eletromecânicos, praticamente todos se utilizam de baterias de lítio não recarregáveis. Isso provê grande durabilidade sem necessidade de manutenção, simplificando e barateando a eletrônica do dispositivo. Por isso, essa solução acabou por ser adotada também para o sinalizador luminoso de faltas.
- A sinalização luminosa está presente em todos os equipamentos que não são eletromecânicos da tabela. Entretanto, a evolução natural da tecnologia é a substituição desses elementos de sinalização local por um sistema de comunicação remota. De fato, assim como já está sendo feito com o equipamento desenvolvido para a CPFL, vários fabricantes já estão disponibilizando modelos com essa funcionalidade.
- Devido uma decisão gerencial, no sinalizador luminoso de faltas da CPFL não foi implementada a função de detecção de faltas transitórias, apesar do baixo custo de incorporação dessa funcionalidade. Diversos equipamentos concorrentes possuem essa função que é útil para as equipes de manutenção em certas ocasiões, como desligamentos recorrentes com sucesso no religamento automático. Isso motivou a incorporação da detecção de faltas transitórias no modelo do sinalizador da CPFL com o sistema de comunicação remota.
- O rearme automático do sinalizador de faltas se dá apenas pelo tempo e pela tensão. Não foi implementada a função de rearme automático pela corrente como em outros equipamentos presentes na Tabela 1 do item 2.1.2, pelo fato de que isso poderia atrapalhar o bom funcionamento da detecção de faltas monofásicas após elos fusíveis. Como o religamento da linha sempre se dará depois de corrigido por completo o problema, o valor da tensão nesse momento será sempre próxima de 1 pu e a detecção da tensão é suficiente para determinar se o equipamento atuado pode ou não ser automaticamente rearmado. O rearme automático por tempo visa economizar bateria, apesar de se saber que em alguns poucos casos a falta não será localizada antes do tempo de rearme automático do equipamento.
- Como diferencial positivo, o sinalizador luminoso desenvolvido ainda conta

com vedação com grau de proteção IP-X7 (totalmente estanque à imersão temporária), corrente de disparo mínima determinada apenas pela corrente de carga, não dependendo de um valor mínimo de corrente para atuação da sinalização luminosa, e sistema de fixação através de grampo rosqueável, indicado pelas próprias equipes de manutenção da concessionária como sendo o melhor e mais seguro sistema de fixação para o equipamento.

- Todo o desenvolvimento realizado, desde a geração da demanda do produto até a obtenção do lote pioneiro, foi pautada pelo baixo custo com competitividade técnica. Pelos dados indicativos presentes na Tabela 1 do item 2.1.2 deste trabalho, o objetivo foi alcançado, uma vez que apenas os sinalizadores eletromecânicos e com poucas funcionalidades agregadas possuem valor estimado de venda menor que o do sinalizador luminoso de faltas da CPFL.

Como sugestão de trabalhos futuros, que visam trazer um avanço tecnológico significativo para o equipamento sinalizador luminoso de faltas e/ou reduzir seu custo de fabricação e manutenção, pode-se citar: o estudo da utilização de ultracapacitores em sistemas de captação de energia do meio, substituindo as baterias recarregáveis com grandes vantagens técnicas; o desenvolvimento da funcionalidade de ajuste automático do sinalizador luminoso de faltas à tensão nominal da linha da rede de distribuição (sistema dv/dt), trazendo flexibilidade em sua utilização e maior confiabilidade na detecção de faltas monofásicas quando o equipamento estiver instalado a jusante de chaves fusíveis; pesquisar soluções de microcontroladores de baixíssimo consumo presentes no mercado e estudar a viabilidade técnica e o impacto no consumo de energia da migração da lógica de detecção de faltas do sinalizador luminoso para esse novo componente.

6. BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 9512:1986 **Fios e cabos elétricos - Intemperismo artificial sob condensação de água, temperatura e radiação ultravioleta-b proveniente de lâmpadas fluorescentes - Método de ensaio.** Setembro de 1986.

ABNT NBR 10296:1988 **Material isolante elétrico - Avaliação de sua resistência ao trilhamento elétrico e à erosão sob severas condições ambientais - Método de ensaio.** Maio de 1988.

ABNT NBR-IEC-60529 **Graus de Proteção para Invólucros de Equipamentos Elétricos.** Março de 2005.

ABREU S. R. de, RAGONE J. C., SEIXAS P. F., CORTIZO P. C., SANTOS M. J. C. dos, FIGUEIREDO A. L.. **Experiência Da CFLCL, Na Utilização De Sistema De Detecção E Localização De Falhas Em Redes De Distribuição Rurais.** XVII SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Olinda – PE. 2008.

ALLEGRO MICROSYSTEMS, **Ultra Small Mobile Phone Xenon Photoflash Capacitor Charger with IGBT Driver A8732EEETR-T.** Folha de Especificação do Produto. 2010.

ANDRADE F. J., SANTOS J. C., MONACO D. R., FERREIRA A. A., CAMARGO J.; **Redução no Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais Aplicando o Sinalizador de Falhas.** In: VIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau/SC. Anais da Conferência – VIII CBQEE. 2009.

ANEEL. **Manual do programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor de energia elétrica.** Maio de 2008a. Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – SPE/Agência Nacional de Energia Elétrica Brasil. Disponível em: <www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/ManualPeD_2008.pdf> Acesso em 23 fev. 2010.

ANEEL. Resolução normativa nº 345, de 16/12/2008, publicada no Diário Oficial, em 31/12/2008b, Seção 1, p. 182, v. 145, n. 254. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2008345.pdf>> Acesso em 15 nov. 2011.

BO Z.Q., WELLER G., REDFEM M.A., **Accurate fault location technical for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals**, IEE Proceeding, vol. 146, no. 1, p. 73-79. Janeiro 1999.

CHALOS, P. **Managing costs in todays manufacturing environment**. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

COTCO, **70 Degree 7.6 x 7.6mm LED Lamp LP377THR1-70G**. Folha de especificação do produto, ver. E, Março de 2002.

CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz). **Dispositivo sinalizador de falhas monofásico aplicável em redes aéreas de distribuição de energia elétrica**. INPI, Modelo de Utilidade MU8600792-0 de abril de 2006.

CPFL Norma Técnica “**Distribuição - Localização de Falhas e Restabelecimento de Linhas**” – Documento nº 11316, versão 1.2, Categoria: Procedimento. Publicado em 17/08/2007.

CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz). **Gabinete para equipamentos aplicáveis em fiações e cabos condutores de eletricidade suspensos no ar**. INPI, Invenção PI0903605-9 de setembro de 2009.

DAS, R.; SACHDEV, M.S.; SIDHU, T.S.; **A fault locator for radial subtransmission and distribution lines**. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, p. 443-448 vol. 1. 2000.

DAVID JOHNSON AND ASSOCIATES. **Xenon Flash Control Circuit**: desenho técnico de circuito eletrônico. JUN/2000. Disponível em: <<http://www.discovercircuits.com/PDF-FILES/xenfls1.pdf>>. Acesso em: 06 fev. 2012.

EI-HAMI, M., LAI, L.L., DARUWALA, D.J. and JOHNS, A.T. **A new travelling-wave based scheme for fault detection on overhead power distribution feeders**, IEEE Transactions on Power delivery, vol. 7, no. 4, p. 1825-1833. Outubro 1992.

FERREIRA A. A., MONACO D. R., SANTOS J. C., ANDRADE F. J., CAMARGO J.; **Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador Luminoso de Faltas**. In: XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2010, São Paulo/SP. ANAIS – Trabalhos Técnicos XIX SENDI, 2010.

FERREIRA A. A., MONACO D. R., SANTOS J. C., ANDRADE F. J., CAMARGO J., GONZALEZ J. F. V., CAVELLUCCI C.; **Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador Luminoso de Faltas**. P&D Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL. Nº 4, – ISSN 1981-9803 – p. 87-89. Agosto de 2011a.

FERREIRA A. A., MONACO D. R., SANTOS J. C., ANDRADE F. J., CAMARGO J., GONZALEZ J. F. V., CAVELLUCCI C.; **Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador Luminoso de Faltas**. In: VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2011, Fortaleza/CE. ANAIS – Trabalhos Técnicos VI CITENEL, 2011b.

FERREIRA A. A., MONACO D. R., GONZALEZ J. F. V., CAVELLUCCI C., ANDRADE F. J., CAMARGO J.; **Metodologia de Otimização para Instalação de Sinalizadores de Faltas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. In: VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2011, Fortaleza/CE. ANAIS – Trabalhos Técnicos VI CITENEL, 2011c.

HABER, J. **Uma contribuição para a análise da viabilidade de projetos envolvendo inovação tecnológica – MADM**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

HABER, J. **Ferramenta para análise de viabilidade de projetos industriais**. Exacta, São Paulo, v. 4. n. especial, p. 95-96, 25 novembro 2006.

IEEE STD C37.100-1992 (Supplement to C37.100-1981). **IEEE Standard Definitions for Power Switchgear**. Out.1992.

IEEE STD C37.114-2004 **Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines**, Jun. 2005.

IEEE Std 495™-2007(Revision of IEEE Std 495-1986) **IEEE Guide for Testing Faulted Circuit Indicators**. Dezembro de 2007

JARVETAUSTA P. & outros. **Using Fuzzy sets do Model the uncertainty in the Fault location process of Distribution Network**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 9, N.2. Abril 1994.

KRAJNAK, D.J.; **Faulted circuit indicators and system reliability**. Rural Electric Power Conference. p. A4/1 - A4/4. 2000.

LEE, H.; MOUSA, A.M.. **GPS travelling wave fault locator systems: Investigation into the anomalous measurement related to lightning strikes**. In: Power Delivery, IEEE Transactions on. V.11, p.1214-1223. 1996.

LIGITEK ELECTRONICS, **Super Bright Round Type LED Lamp LUR3333H/S46**. Folha de Especificação do Produto. 2005.

MANASSERO, G., SENGHER, E.C., GOLDEMBERG Jr., PELLINI C.E.L., IGNATOVICZ, E.. **Sistema Automatizado para Localização de Faltas**. VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle - STPC. Rio de Janeiro - RJ, 2005.

MINAMOTO, **Primary Lithium Thionyl Chloride 3.6V, 6500mAh ER26500M**. Folha de Especificação do Produto, 2009.

MUENCH, F.J.; WRIGHT, G.A.; **Fault Indicators: Types, Strengths & Applications** IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, p. 3688-3693, 1982.

OLIVEIRA C. C. B. de, SILVEIRA C. S., LANGE F. L., DUARTE D. P., ANTUNES A. U., KOEHLER M.. **Metodologia de Localização de Defeitos Utilizando Cálculo de Curto-Circuito Considerando as Incertezas dos Parâmetros Envolvidos**. XIX SENDI – Seminário Nac.de Distribuição de Energia Elétrica. São Paulo-SP. 2010.

OPTOSUPPLY, **5mm Deluxe Power Red LED OSHR5161P**. Folha de especificação do produto, ver. A.0, 2009.

PEREIRA P. S., ROSA M. V. C., LOURENÇO G. E., PEREIRA P. S., MARTINS C. M., ROSA R. R., AZEREDO E. F. de. **Estudo, Projeto e Desenvolvimento de um Sistema para Localizar Faltas em Redes de Distribuição**. XVII SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Olinda – PE. 2008.

SABIC Innovative Plastics, **Xenoy Resin 52220U**. Folha de especificação do produto, 2005.

SANTANA F. J. R., ALMEIDA L., COSTA F., **Optimal positioning of geo-referenced sensors for fast fault finding using genetic algorithm**. in Proc. 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics – ISIE '08. 2008.

SANTANA F. J. R., OTACIANO A.S.. **Rastreamento De Defeitos Nos Alimentadores Da Rede De Distribuição Utilizando A Distância De Falta Calculada Nos Reles Digitais**. XIX SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. São Paulo - SP. 2010.

SANTANA W., BRITTES J. L. P.; **Detector de Falha em Distribuição de Energia Elétrica**. In: Abinee TEC 2011, Pavilhão de Exposições do Anhembi - São Paulo/SP. <http://www.tec.abinee.org.br/2011/arquivos/s204.pdf>. Acessado em 21/10/2011.

SANTOS J. C., NOGUEIRA A. L. T., ANDRADE F. J., CAMARGO J., SILVEIRA M. M.; **Sinalizador Luminoso Monofásico de Faltas para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica até 69 kV** In: VII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2007, Santos/SP. Anais da Conferência - VII CBQEE. 2007

SANTOS J. C., JAKUBOWSKI E. F., ANDRADE F. J., CAMARGO J., SILVEIRA M. M.; **Arranjo Interinstitucional para Desenvolvimento de um Lote Pioneiro de Equipamento Sinalizador de Faltas em Redes Aéreas de Distribuição de Energia**. In: XVIII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2008, Olinda/PE. ANAIS - Trabalhos Técnicos XVIII SENDI, 2008.

SENGER, E.C., MANASSERO, G., GOLDEMBERG Jr., PELLINI C.E.L.. **Automated fault location system for primary distribution networks**. In: Power Delivery, IEEE Transactions on. V.: 20, p.: 1332- 1340, 2005.

TANG, Y.; WANG, H.F.; AGGARWAL, R.K.; JOHNS, A.T.; **Fault indicators in transmission and distribution systems**. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000. Proceedings. DRPT 2000. International Conference on. p. 238–243. 2000.

TEXAS INSTRUMENTS. **Mixed Signal Microcontroller MSP430x13x**. Folha de Especificação do Produto. 2004.

ULTRACAPACITORS.ORG. **How an ultra capacitor works**. Disponível em <<http://www.ultracapacitors.org>>. Acesso em 15/11/2011.

ZAMBENEDETTI V. C., SANTANA F. J. R., ALMEIDA L. A. L., RESENDE G. P. de, MOGNON V. R., WAGNER R.. **Sensores Inteligentes para Detecção de Faltas em Linhas Aéreas de Distribuição da COELBA**. XIX SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. São Paulo - SP. 2010.

ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A., **Automated fault location and diagnosis on electrical power distribution feeders**, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 12, Nº 2, Abril 1997.

APÊNDICE A – Alocação Otimizada de Sinalizadores de Faltas na Rede de Distribuição

A instalação de sinalizadores luminosos de faltas na rede aérea de distribuição de energia elétrica se mostra benéfica para a operação da rede e para a melhoria dos indicadores da qualidade de prestação de serviço das concessionárias. Entretanto, representa um custo significativo de aquisição e implantação desses equipamentos na rede, bem como de manutenção desses equipamentos ao longo do ano.

A instalação indiscriminada e exagerada de equipamentos sinalizadores poderia representar um custo para a concessionária maior do que o retorno esperado pela redução da Energia Não Distribuída (END) e a melhoria dos indicadores da qualidade do serviço. Portanto, percebe-se que existe um compromisso entre a quantidade de sinalizadores a serem instalados (e o custo que isso representa para a operação da rede) e o benefício trazido pela instalação desses equipamentos. No trabalho de Ferreira et al. (2011c) é explicada em detalhes essa relação e é apresentado um exemplo hipotético, cujo resultado em forma de gráfico é reproduzido na Figura 49 abaixo. A somatória das curvas mostra que existe um ponto ótimo em que é possível obter o máximo benefício da utilização de equipamentos sinalizadores de faltas com o mínimo custo total. Entretanto, não é trivial o equacionamento e a resolução desse problema.

Figura 49 – Exemplo hipotético obtido de Ferreira et al. (2011c), de relação entre custo de instalação e manutenção de sinalizadores de faltas na rede elétrica e da END com o número de sinalizadores instalados. Existe um ponto ótimo onde o custo total é mínimo.

Visando justamente maximizar os benefícios com a instalação de sinalizadores de faltas, estudou-se o problema de alocação de sinalizadores na rede de distribuição, visando gerar uma metodologia e um software de otimização para indicação dos melhores pontos para instalação dos dispositivos.

Chegou-se a uma solução de otimização baseada em algoritmos genéticos, cuja função objetivo busca minimizar a END somada aos custos de instalação e manutenção de equipamentos sinalizadores de faltas na rede elétrica, sujeita a restrições orçamentárias, quantitativas e de meta de redução do indicador de qualidade do serviço TMAE. O detalhamento da solução de otimização desenvolvida pode ser vista em Ferreira et al. (2011c).

APÊNDICE B – Simulação de Abertura Monopolar e Bipolar da Rede de Distribuição.

O modelo construído, completo, pode ser visto na Figura 50 abaixo:

Figura 50 – Modelo em ATP Draw de trecho de linha aérea de distribuição para estudo de abertura de proteção monopolar e bipolar da rede.

- **Subestação:**

Modelada com uma fonte de tensão AC em 60 Hz. A configuração dessa fonte no *ATPDraw* é feita através da entrada da amplitude da onda desejada na saída. Foram feitas simulações com os seguintes valores nominais das linhas de distribuição:

$$U = 7,2 \text{ kV} \rightarrow \text{Amplitude} = 5,87877 \text{ kV}$$

$$U = 11,9 \text{ kV} \rightarrow \text{Amplitude} = 9,716309 \text{ kV}$$

$$U = 34,5 \text{ kV} \rightarrow \text{Amplitude} = 28,16913204 \text{ kV}$$

$$U = 69 \text{ kV} \rightarrow \text{Amplitude} = 56,33826408 \text{ kV}$$

O valor da amplitude da onda foi determinado a partir da eq.(6):

$$\text{Amplitude} = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

- **Tronco do Alimentador:**

O tronco do alimentador da linha de distribuição foi representado por um segmento de linha de 10 km de comprimento. Os parâmetros característicos utilizados na simulação do tronco, apresentados na Tabela 10, a seguir, foram obtidos da concessionária, e se referem a um tipo de cabo muito utilizado nas suas redes de distribuição:

Tabela 10 – Parâmetros característicos utilizados para simulação de uma linha de distribuição típica.

REDE	$R_1(\Omega/\text{km})$	$X_1(\Omega/\text{km})$	$R_0(\Omega/\text{km})$	$X_0(\Omega/\text{km})$
3 Φ CAA 4/0 AWG	0,36792	0,47165	0,54567	1,93486

- *Chave Fusível:*

Modelada como três chaves monofásicas temporizadas independentes, de maneira a simular a abertura de um ou mais elos fusíveis da rede.

- *Transformador de Distribuição:*

Configuração delta-estrela aterrada, com os seguintes parâmetros de configuração típicos fornecidos pelos engenheiros de proteção da concessionária:

I_0 = corrente no ramo de magnetização em regime permanente = 0,0146 [A].

F_0 = fluxo no ramo de magnetização em regime permanente = 56,28 [Wb-espira].

Resistência no ramo de magnetização = 276000 [Ω].

V_{rp} = Tensão nominal do enrolamento primário = 7,2; 11,9; 34,5 ou 69 [kV].

R_p = Resistência do enrolamento primário = 1,0815 [Ω].

L_p = Indutância no enrolamento primário = 0,0659153 [Ω].

V_{rs} = Tensão nominal do enrolamento secundário = 0,220 [kV].

R_s = Resistência do enrolamento secundário = 0,0098 [Ω].

L_s = Indutância no enrolamento secundário = 0,000644 [Ω].

- *Chaves de comando de carga:*

Foram adicionadas chaves de comando de carga ao modelo de simulação para permitir o estudo de quatro cenários distintos: carga balanceada, uma fase em aberto, duas fases em aberto e transformador operando em vazio.

- *Carga trifásica:*

Foi considerada carga RLC típica simulando consumidores residenciais e comerciais, com fator de potência de aproximadamente 0,80. Os parâmetros de configuração utilizados foram os seguintes, apresentados na Tabela 11 abaixo:

Tabela 11 – Parâmetros de simulação das cargas

	Fase 1	Fase 2	Fase 3
R	0,85Ω	0,85Ω	0,85Ω
L	0,6Ω	0,6Ω	0,6Ω
C	0	0	0

- *Ponto de Medição:*

As tensões são medidas no primário do transformador de distribuição do modelo de simulação, exatamente no ponto elétrico onde seria instalado o equipamento sinalizador de faltas.

- *Temporização dos eventos de simulação:*

Os eventos de simulação são disparados automaticamente com a seguinte temporização programada, conforme ilustra a Figura 51 abaixo:

Figura 51 – Temporização dos eventos de simulação da abertura monopolar da chave fusível.

Onde:

(a) Acionamento da Fonte: -1 segundo.

(b) Fechamento das Chaves Fusíveis e da carga: -1 segundo.

(c) Abertura das Chaves das Cargas que não serão utilizadas: -0,5 segundo.

(d) Início do registro das tensões e correntes: 0 segundo.

(e) Abertura das Chaves Fusíveis Simulando Defeito Monofásico ou Bifásico: 0,2 segundo.

- *Resultados da Simulação:*

Os resultados obtidos mostraram que não há influência da carga ou do nível de tensão da linha no resultado do comportamento da tensão refletida na ligação em delta do primário do transformador. As principais conclusões são que, no caso de abertura monopolar, a tensão refletida na fase aberta é da ordem de 0,5 pu

e, no caso de abertura bipolar, a tensão refletida é de 1 pu nas duas fases abertas, respectivamente conforme os gráficos da Figura 52 e da Figura 53 abaixo:

Figura 52 – Gráfico da tensão no primário do transformador com abertura monofásica da fase A.

Figura 53 – Gráfico da tensão no primário do transformador com abertura bifásica da fase A e B. Nota-se que há 1 pu de tensão nas três fases no primário do transformador após a abertura e todas as tensões ficam em fase.

Esse resultado permitiu definir o ajuste do nível de detecção de tensão do equipamento sinalizador luminoso de faltas como sendo 0,75 pu, de maneira que o dispositivo detector de faltas identificasse uma queda de tensão quando houvesse uma falta monofásica interrompida por uma abertura monopolar de elo fusível. Desta

forma, o equipamento sinalizador luminoso de faltas pode ser instalado após chaves fusíveis, ao contrário de outros equipamentos de mercado que detectam tensões a partir de níveis muito baixos, não identificando a abertura de um único elo fusível da rede.

A ressalva é feita no caso de abertura bipolar de elos fusíveis. Uma vez que a tensão em todas as fases permanece em 1 pu, que o equipamento sinalizador luminoso de faltas é monofásico e que não monitora a fase dos sinais de tensão e corrente, fica impossível a detecção de uma abertura bipolar de elos fusíveis e a falta que gerar uma atuação da proteção dessa natureza não será detectada pelos sinalizadores instalados a jusante de chaves fusíveis.

APÊNDICE C – Montagem, procedimentos experimentais e resultados dos testes de descarga da bateria de alimentação.

A montagem experimental consistia de uma série de equipamentos sinalizadores de faltas protótipos equipados com uma eletrônica simplificada (oscilador CMOS 555 – com baixo consumo quiescente de corrente assim como a eletrônica do sinalizador) operando com frequência e ciclo de trabalho idênticos ao do sinalizador luminoso, acionando 6 LEDs de alto-brilho que estavam sendo monitorados constantemente por uma caixa transdutora de sinais luminosos em elétricos, e uma placa de aquisição de sinais digitais e analógicos, que fornecia a um programa computacional dados sobre os níveis de tensão nas baterias dos equipamentos e sobre os lampejos luminosos dos LEDs. Um programa computacional desenvolvido especialmente para o teste na linguagem de programação *LabView* fez a aquisição do nível de tensão das baterias em teste a cada 30 minutos, além de monitorar o tempo que o equipamento permaneceu piscando até o esgotamento total da bateria. O teste completo tinha duração prevista de aproximadamente 30 dias.

A bateria testada foi a seguinte:

- **Bateria ER26500M (Minamoto).** Capacidade nominal de 6.500 mAh. Tensão nominal de 3,6V. Máxima corrente contínua: 1.000 mA. Máxima corrente pulsada: 2.000 mA. Tamanho C. Li-SOCl₂ (Lithium Thionyl Chloride).

Oito equipamentos sinalizadores de faltas com eletrônicas simplificadas foram utilizados nestes testes. A eletrônica simplificada (apresentada na Figura 54 abaixo) consistia em circuitos osciladores montados com circuitos integrados 555 CMOS, configurados de maneira a simular a sinalização luminosa dos equipamentos que utilizavam o chip proprietário (frequência de 0,75 Hz e ciclo de trabalho de 2,5%). Foi utilizado o CI 555 CMOS para que o consumo quiescente do circuito fosse irrisório se comparado com o consumo da sinalização luminosa com os seis LEDs, assim como no sinalizador de faltas real:

Figura 54 – Eletrônica dos protótipos para teste da bateria.

Além dos sinalizadores com LEDs de Alto-Brilho, havia um sinalizador equipado com LEDs de Alto-Fluxo, que possui maior ângulo de abertura luminosa e maior fluxo luminoso. Consequentemente esse LED pode chegar a consumir mais do que o dobro da corrente dos LEDs usuais, cada vez que é acionado. Apesar do circuito acima contar com resistores limitadores de corrente nos LEDs, a equipe achou válido e interessante comparar o resultado apresentado pelos dois tipos de LEDs.

Na Figura 55 abaixo, são mostrados os sinalizadores utilizados neste teste e também a denominação de cada um deles. O sinalizador 4 é o que está equipado com os LEDs de Alto-Fluxo:

Figura 55 – Foto dos protótipos de sinalizadores utilizados no teste das baterias.

O intuito do teste é monitorar exatamente quanto tempo os sinalizadores permanecem piscando e qual é a tensão da bateria, a cada 30 minutos, para que sejam montadas as curvas de descarga da bateria em função do tempo.

Para que a precisão desses resultados fosse razoável, deveria ser criado um método automatizado que realizasse o monitoramento dos sinalizadores e a medição das tensões da bateria ininterruptamente e sem a necessidade da intervenção humana. Por isso, a equipe do projeto decidiu utilizar a ferramenta de instrumentação virtual *LabView*, que juntamente com uma placa de aquisição da *National Instruments*, tornaria um PC comum na ferramenta ideal para o serviço que deveria ser realizado.

A placa de aquisição da *National Instruments* (ilustrada na Figura 56) adquirida especialmente para este teste foi a USB-6008, que possui as seguintes características:

- 4 entradas analógicas diferenciais, com amostragem de 12 bits, 10KS/s;
- 12 entradas digitais, com amostragem de 12 bits, 150 KS/s;
- Conexão USB;
- Sinais Analógicos de -10 V à +10 V;
- Sinais Digitais padrão TTL.

Figura 56 – Placa de aquisição utilizada no teste da bateria não recarregável.

Foi necessária também a elaboração de um programa em *LabView*, para executar as tarefas de monitoramento necessárias. A lógica do programa é relativamente simples:

- Cada entrada digital recebe um pulso (TTL) quando os LEDs do sinalizador se acendem. Esse pulso digital faz com que um contador seja zerado. Quando o sinalizador para de piscar, o contador (ajustado para 120 segundos) atinge seu máximo e indica que aquele sinalizador esgotou a bateria. O teste se encerra quando todos os sinalizadores esgotam suas baterias.
- Cada entrada analógica diferencial é ligada em paralelo com a bateria de um sinalizador. A tensão é monitorada constantemente e é mostrada ao usuário, assim como quando é recebido um pulso digital (indicando que o sinalizador piscou). A cada meia hora, o valor instantâneo da bateria é armazenado em um arquivo de texto, juntamente com uma estampa de tempo.

Abaixo, na Figura 57, está retratada a tela de interface com o usuário do programa de teste da bateria em *LabView*:

Figura 57 – Tela de Interface com o usuário do programa de teste de perfil de descarga da bateria do sinalizador.

A estimativa de duração do teste é de 37 dias e a execução do programa não poderia ser interrompida durante esse período. Por isso foi utilizado um *no-break*, que mantinha o computador ligado em caso de queda de energia por qualquer motivo.

O último passo para a finalização da montagem do arranjo experimental foi a elaboração de alguma maneira para transformar a sinalização luminosa de um LED de cada sinalizador em pulsos digitais no padrão TTL. Para tanto, foi montado um conversor de pulsos luminosos em pulsos elétricos no formato TTL. Os LEDs foram ligados ao conversor através de fibras ópticas plásticas. Os pulsos luminosos eram detectados, convertidos em sinais elétricos e amplificados, de maneira a se adequarem exatamente aos requisitos das entradas digitais da placa de aquisição USB-6008. Abaixo, a Figura 58 mostra detalhes desse conversor de oito entradas e oito saídas, confeccionado especificamente para este teste:

Figura 58 – Transdutor óptico-elétrico com fibras ópticas plásticas para monitoramento dos lampejos luminosos dos protótipos ao longo do teste da bateria.

As tensões das baterias foram conectadas diretamente à placa de aquisição, sem necessidade de conversores. Sabendo que podem existir diferenças entre as resistências internas das baterias, entre os componentes eletrônicos utilizados nas montagens e entre os próprios CIs 555 CMOS, cada sinalizador foi analisado antes do início do teste, tendo suas condições iniciais anotadas, para que fossem realizados cálculos corretos da carga total que continha cada bateria. Essas condições iniciais abrangiam a frequência de sinalização, a largura do pulso luminoso e a corrente de pico quando do acionamento dos LEDs.

O tempo total de sinalização de cada equipamento poderia ser resgatado dos arquivos gerados pelo programa, com a estampa de tempo gerada a cada meia-hora até que o sinalizador parasse de piscar. As condições iniciais dos sinalizadores e o tempo total de sinalização são suficientes para um cálculo razoavelmente preciso da carga total de cada bateria utilizada no teste.

Além disso, as baterias dos quatro sinalizadores que estavam com o valor de suas tensões sendo monitoradas, tiveram suas curvas de descarga traçadas.

Antes do início do teste de descarga da bateria propriamente dito, foi feito uma medição em cada um dos equipamentos para caracterizá-los e permitir a correta apuração da energia consumida ao longo do teste:

Tabela 12 – Resultado da caracterização dos sinalizadores utilizados nos testes de descarga das baterias.

Número	Sinalizador	LED	Frequência [Hz]	Largura do Pulso [ms]	Corrente de Pico [mA]
1	071	Alto-Brilho (Redondo)	0,69	40	267,62
2	082	Alto-Brilho (Redondo)	1,17	28	196,19
3	064	Alto-Brilho (Redondo)	1,11	26	229,52
4	143	Alto-Fluxo (Quadrado)	1,14	28	193,33
5	068	Alto-Brilho (Redondo)	1,07	28	225,71
6	079	Alto-Brilho (Redondo)	0,83	36	205,71
7	078	Alto-Brilho (Redondo)	1,18	28	196,19
8	093	Alto-Brilho (Redondo)	1,00	29	250,48

O tempo total de sinalização de cada dispositivo foi resgatado a partir dos registros do programa de teste:

- Protótipo 1: *610h 21m*
- Protótipo 2: *771h 21m*
- Protótipo 3: *300h 21m*
- Protótipo 4: *771h 51m*
- Protótipo 5: *652h 21m*
- Protótipo 6: *705h 51m*
- Protótipo 7: *Falha na aquisição*
- Protótipo 8: *680h 21m*

A partir do registro do nível de tensão nas baterias dos protótipos de 1 a 4, tomado automaticamente pelo programa de instrumentação virtual a cada 30 minutos, foi possível levantar a curva de descarga de suas baterias. Os resultados obtidos nos quatro casos foram bem similares e são bem exemplificados pela curva de descarga da bateria do sinalizador protótipo 4, apresentada na Figura 59 abaixo:

Figura 59 – Curva de descarga da bateria do sinalizador luminoso de faltas.

Com essas informações, é possível calcular a carga total de cada bateria no início do teste, através da eq.(7):

$$\frac{\text{Largura do Pulso[s]}}{\text{Período[s]}} \times \text{Corrente de Pico[mA]} \times \text{Total de Sinalização[h]} = \text{Carga Total da Bateria[mAh]} \quad (7)$$

O resultado dos cálculos é apresentado de forma resumida na Tabela 13 abaixo:

Tabela 13 – Apuração da carga total de cada bateria utilizada no teste.

Sinalizador Protótipo	1	2	3	4	5	6	7	8
Tempo Total de Sinalização [h]	610,34	771,34	300,34	771,85	652,34	705,85	-	680,34
Carga Total da Bateria [mAh]	4.508	4.958	1.989	4.763	4.411	4.339	-	4.942

Na média, desconsiderando os resultados do protótipo de número 7 e de número 3 que claramente não possuíam baterias com carga máxima no início dos testes ou possuíam baterias com problemas, pode-se afirmar que a carga média das baterias é de 4.653,44 mAh, 35,5% superior aos 3.432,96 mAh necessários para suprir a demanda do sinalizador luminoso de faltas durante sua vida útil de 10 anos.

O perfil da curva de descarga das baterias também se mostrou bastante apropriado para a aplicação de alimentação de um circuito eletrônico por longos períodos de tempo, uma vez que a magnitude da tensão nos terminais da bateria se mantém praticamente constante próximo do nível nominal de 3,6 V até que praticamente toda a carga tenha se esgotado. Isso também está de acordo com as informações da folha de especificação passada pelo fabricante e é o comportamento esperado de uma bateria de lítio-íon.

APÊNDICE D – Análise da utilização de LEDs de Alto Brilho e de Alto Fluxo no Sinalizador Luminoso.

Os protótipos cabeça-de-série do equipamento sinalizador luminoso de faltas foram equipados com LEDs de alto-brilho de 5 mm, com a especificação técnica (LIGITEK, 2005) transcrita na Tabela 14 e diagrama de irradiação ilustrado na Figura 60 abaixo:

Tabela 14 – Especificação técnica do LED utilizado no equipamento sinalizador luminoso de faltas cabeça-de-série.

PART NO	MATERIAL	COLOR		Dominant wavelength λ_D (nm)	Spectral halfwidth $\Delta\lambda$ (nm)	Forward voltage @20mA (V)		Luminous Intensity @20mA (mcd)		Viewing angle $2\theta_{1/2}$ (deg)
		Emitted	Lens			Min.	Max.	Min.	Typ.	
LUR3333H/S46	AlGaInP/GaP	Red	Water Clear	630	20	1.7	2.6	4000	7000	30

Figura 60 – Diagrama de irradiação luminosa do LED LUR3333H/S46.

Para a escolha do ângulo de inclinação do LED em relação à normal ao solo considerou-se que a melhor situação de visualização para o observador ocorre quando o mesmo se encontra na região do diagrama de irradiação em que a intensidade luminosa é maior que 50% da máxima.

Nessa implementação do sinalizador luminoso, o LED foi instalado no gabinete com um ângulo de 60° em relação à vertical, como ilustrado na Figura 61:

Figura 61 – Cone de luz do LED utilizado no equipamento cabeça-de-série do sinalizador luminoso de faltas.

Na Figura 61 acima, é considerado que o ponto de instalação está a uma altura de 12 metros e que os olhos do observador estarão a 1,70 m do solo. Como o ângulo de abertura luminosa é de apenas 30°, a maior parte da luminosidade emitida alcança os observadores que estão entre 10,3 m e 38,44 m do ponto de instalação, resultado que foi verificado na prática, em testes de campo realizados com o equipamento cabeça-de-série.

Através de informações colhidas com os eletricitistas e técnicos de campo da concessionária relativas ao procedimento que adotam de localização de defeitos enquanto percorrem a linha problemática, verificou-se que é desejável que a sinalização luminosa do equipamento possa ser averiguada de distâncias que variam de 50 a 100 metros, no mínimo.

Com essa informação, calculou-se o novo ângulo de inclinação do LED em relação à vertical:

Distância Máxima:

Definida em 100 [m].

Distância Ótima:

$$\tan (69,11^\circ) = X/10,3 \Rightarrow X = 10,3 * \tan (69,11^\circ) = 26,98 [m].$$

Distância Mínima:

$$\tan (69,11^\circ - 30^\circ/2) = X/10,3 \Rightarrow X = 10,3 * \tan (54,11^\circ) = 14,23 [m].$$

Figura 62 – Distância mínima, ótima e máxima de visualização da sinalização luminosa.

Pela Figura 62 acima, é possível verificar que se o LED for reposicionado no gabinete para ter um ângulo de aproximadamente 69° com a vertical, os requisitos mínimos de distância da sinalização luminosa já poderiam ser atingidos. Apesar de pequena, houve uma influência negativa com essa alteração para o observador que está próximo do equipamento. Para uma boa observação da sinalização, agora é necessário que o observador esteja a, no mínimo, 14,23 metros do equipamento. Antes ele poderia estar a apenas 10,3 metros e ainda sim ter uma boa visualização.

Para ser possível a comparação entre diversos tipos de LEDs, apresenta-se neste trabalho um estudo das “áreas de sombra” ao redor do equipamento sinalizador luminoso, ou seja, áreas que não são cobertas pelos cones de luz dos LEDs de sinalização e onde o observador terá dificuldades para determinar se o equipamento está atuado ou não:

- Cálculo da Largura Máxima do Cone Luminoso (meia potência):

Figura 63 – Cálculo dos limites geométricos do cone de luminoso (meia potência) do LED do equipamento cabeça-de-série.

Cálculo de Y:

$$Y^2 = 10,3^2 + 26,98^2 \Rightarrow Y = 28,87 [m]$$

Cálculo de X:

$$\tan (30^\circ / 2) = (X/2)/28,87 \Rightarrow X = 28,87 * 2 * \tan (15^\circ) \Rightarrow X = 15,47 [m].$$

- Cálculo da Largura Máxima do Cone Luminoso (25% da potência):

Neste caso, pela especificação do LED considerado na Figura 60 acima, o ângulo de abertura luminosa será de 40° máximo.

Distância Máxima:

$$\tan (69,11^\circ + 40^\circ / 2) = X/10,3 \Rightarrow X = 10,3 * \tan (89,11^\circ) = 663,03 [m].$$

Distância Ótima:

$$\text{Mesma para } 30^\circ = 26,98 [m].$$

Distância Mínima:

$$\tan (69,11^\circ - 40^\circ / 2) = X/10,3 \Rightarrow X = 10,3 * \tan (49,11^\circ) = 11,89 [m].$$

Figura 64 – Distância mínima, ótima e máxima de visualização da sinalização luminosa, considerando 25% da potência luminosa do LED com abertura de 30°.

Figura 65 – Cálculo dos limites geométricos do cone de luminoso (25% da potência) do LED do equipamento cabeça-de-série.

Cálculo de Y:

$$Y^2 = 10,3^2 + 26,98^2 \Rightarrow Y = 28,87 [m]$$

Cálculo de X:

$$\tan (40^\circ / 2) = (X/2)/28,87 \Rightarrow X = 28,87 * 2 * \tan (20^\circ) \Rightarrow X = 21,01 [m].$$

Com estes resultados, pode-se traçar o desenho da Figura 66 abaixo, que ilustra o plano horizontal na altura dos olhos do observador (1,70 m do solo), com o sinalizador instalado a 12,0 m de altura, já com o ângulo ótimo de inclinação dos LEDs (69,11°). As áreas hachuradas internas são onde os LEDs iluminam com intensidade entre 50% e 100% da nominal; as áreas hachuradas externas entre 25% e 50% da nominal; a área branca onde a iluminação é muito baixa ou nenhuma:

Figura 66 – Zonas de luz (hachuradas) ao redor do equipamento, e áreas de sombra (em branco). Notam-se diversos pontos onde o observador teria dificuldades em determinar o estado de operação do equipamento.

O resultado da Figura 66 acima explicita porque maiores ângulos de abertura deveriam ser buscados para que houvesse melhora significativa na visualização do sinalizador. Existem muitas “áreas de sombra”, inclusive em regiões próximas ao sinalizador.

O LED de alto fluxo estudado (COTCO, 2002) possuía uma maior abertura luminosa, de 70°. Visando comparar as áreas de luz e sombra quando se substitui um LED por outro, os cálculos foram refeitos considerando as características técnicas de irradiação luminosa deste novo LED, conforme Figura 67 abaixo:

Figura 67 – Diagrama de irradiação luminosa do LED de alto fluxo típico.

Distância Mínima:

Definida em 10 [m]

Ângulo com a vertical:

$$\tan (?) = 10/10,3 \Rightarrow ? = \text{atan}(0,97) \Rightarrow ? = 44,15^\circ$$

Distância Máxima:

Sem limite. Elevação de: $(44,15^\circ + 70^\circ) = 114,15^\circ$.

Distância Ótima:

$$\tan (44,15^\circ + 70^\circ / 2) = X/10,3 \Rightarrow X = 10,3 * \tan (79,15^\circ) = 53,74 \text{ [m]}.$$

Figura 68 – Distância mínima, ótima e máxima de visualização da sinalização luminosa, considerando meia potência luminosa do LED com abertura de 70° .

- Cálculo da Largura Máxima do Cone Luminoso (meia potência):

Figura 69 – Cálculo dos limites geométricos do cone de luminoso (meia potência) do LED com abertura luminosa de 70°.

Cálculo de Y:

$$Y^2 = 10,3^2 + 53,74^2 \Rightarrow Y = 54,71 [m]$$

Cálculo de X:

$$\tan (70^\circ / 2) = (X/2)/54,71 \Rightarrow X = 54,71 * 2 * \tan (35^\circ) \Rightarrow X = 76,61 [m].$$

- Estimativa da largura mínima do cone luminoso a 100m

Figura 70 – Cálculo estimado da largura do cone de luz a 100 m do ponto de instalação do equipamento.

Cálculo de X':

$$(114,15-79,11)/76,61 = (114,15-84,11)/X' = > X' = (30/35)*76,61 = 65,66 [m]$$

Com estes resultados pode-se traçar o desenho da Figura 71 abaixo, que ilustra o plano horizontal da altura dos olhos do observador (1,70 m do solo), com o sinalizador instalado a 12,0 m de altura, com o ângulo de inclinação dos LEDs de alto fluxo a 79,15°, o que garante visibilidade mínima a 10 metros do equipamento. As áreas hachuradas são onde os LEDs iluminam com intensidade entre 50% e 100% da nominal:

Figura 71 – Zonas de luz (áreas hachuradas) ao redor do equipamento, e áreas de sombra (em branco). Nota-se que não há pontos de sombra até 50 m do dispositivo e que há boa cobertura até os 100 m, permitindo até que a sinalização luminosa seja vista de alguns pontos mais distantes.

A Tabela 15 abaixo apresenta o resultado do estudo comparativo entre as duas soluções de LED estudadas, mostrando com clareza a vantagem de um grande ângulo de abertura luminosa para a aplicação prática do sinalizador luminoso de faltas em campo:

Tabela 15 – Comparação entre LEDs com aberturas luminosas de 30° e de 70°.

<p>Alto Brilho</p>		<p>Alto Fluxo</p>	
Ângulo de Abertura Luminosa:	30°	Ângulo de Abertura Luminosa:	70°
Ângulo de Inclinação em relação à vertical:	69,11°	Ângulo de Inclinação em relação à vertical:	79,15°
Alcance Máximo do Cone Luminoso (pot. > 50%)	100m	Alcance Máximo do Cone Luminoso (pot. > 50%)	∞
Alcance Máximo do Cone Luminoso (25% > pot. > 50%)	663m	Alcance Máximo do Cone Luminoso (25% > pot. > 50%)	∞
Alcance Mínimo do Cone Luminoso (pot. > 50%)	14,23m	Alcance Mínimo do Cone Luminoso (pot. > 50%)	10m
Distância do Ponto de Visualização Ótima	26,98m	Distância do Ponto de Visualização Ótima	53,74m
Abertura do Cone Luminoso na distância do ponto de visualização ótima	15,47m	Abertura do Cone Luminoso na distância do ponto de visualização ótima	76,61m

APÊNDICE E – Análise de uma falsa atuação do sinalizador luminoso causada por problemas na proteção do alimentador.

Foi trazida ao conhecimento da equipe de desenvolvimento do sinalizador luminoso de faltas a ocorrência de um evento que parecia se tratar de um problema na atuação dos equipamentos. Durante o atendimento a uma ocorrência emergencial, a equipe de manutenção notou após um religador não atuado, que dois sinalizadores piscavam em um dos ramos da bifurcação da rede.

O trecho a jusante do religador não atuado foi isolado e uma tentativa de religamento foi feita na subestação, sem sucesso. Só então, depois de percorrer vários trechos do alimentador, percebeu-se uma cruzeta quebrada em ramal a montante do religador não atuado e ao ponto de instalação dos sinalizadores atuados.

A partir dessas e de outras informações colhidas com as equipes técnicas envolvidas nesse atendimento, foi feito um estudo sobre o que pode ter ocorrido com os equipamentos sinalizadores que, aparentemente, atuaram de maneira inadequada.

Lembrando que os sinalizadores atuam com variação brusca de corrente seguida de queda de tensão, iniciou-se um processo de levantamento de informações para explicar o que poderia ter ocorrido e analisar se, de fato, os sinalizadores estariam apresentando alguma espécie de problema funcional.

Primeiramente, retirou-se os sinalizadores atuados da rede para análise em bancada e em laboratório. Ambos foram verificados e estavam com funcionamento 100% correto.

Informações colhidas com as equipes de campo mostraram que o primeiro desligamento aconteceu às 19:30 hs do dia da ocorrência. O disjuntor da subestação atuou deixando toda uma cidade atendida por esse alimentador sem energia elétrica. Os sinalizadores de faltas estavam instalados nesse alimentador logo após um religador que não atuou, conforme ilustrado na Figura 72 abaixo:

Figura 72 – Pontos de instalação dos sinalizadores atuados.

Figura 73 – Posicionamento dos sinalizadores e do ponto do defeito em relação à subestação de distribuição.

A equipe de manutenção que atendeu a ocorrência enviou o mapa da Figura 73 acima, onde fica claro que a corrente de defeito não passou pelo sinalizador que, por sua vez, não deveria ter atuado, mesmo com o desligamento do alimentador como um todo.

Outras informações relevantes foram passadas pelos técnicos e engenheiros da região da ocorrência:

- Em nenhum momento houve atuação da proteção próxima dos equipamentos sinalizadores de faltas.
- A função de proteção que acionou a abertura do disjuntor na subestação foi o 51GS (temporizado para terra).
- O defeito na linha ocorreu devido a uma quebra de cruzeta por podridão (não foram relatadas descargas elétricas no alimentador apesar de estar chovendo na ocasião).
- Não havia geração distribuída no alimentador, portanto, não poderia ter ocorrido a alimentação do defeito pelo lado da carga.
- Dois cabos se romperam com a quebra da cruzeta e foram lançados ao solo (terra coberta por vegetação).
- Pode ter ocorrido curto bifásico entre as fases rompidas, antes de caírem ao solo.
- Na entrada do ramal onde ocorreu o defeito existia uma proteção automática que não operou porque estava com a bateria descarregada.
- A corrente de carga do ramal defeituoso era de 7,5 A e a do ramal onde o sinalizador atuou era de 98,1 A.

Com essas informações, foram realizadas simulações computacionais para testar diversas hipóteses do que poderia ter ocorrido para que houvesse atuação dos sinalizadores localizados em ponto tão distante, por onde não passou a corrente de defeito. Considerou-se a possibilidade bastante plausível de ter ocorrido uma falta bifásica momentânea entre os cabos que vieram, em momento posterior, a se partir e cair no solo. Considerou-se também que, em algum momento, ocorreu uma falta à terra, pela atuação do relé 51GS da subestação.

Com os resultados obtidos das simulações, foi possível verificar que uma série de duas faltas que ocorreram no ponto do defeito, com algumas falhas da atuação da proteção daquele ramal, fizeram com que a tensão e corrente no ponto de instalação dos sinalizadores de faltas tivessem a mesma “assinatura” de uma falta ocorrendo a jusante daquele ponto, causando o acionamento indevido dos equipamentos, como apresentado a seguir.

1 CIRCUITO IMPLEMENTADO NO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO PSCAD.

Foi utilizado o *software* PSCAD para reprodução computacional do evento que poderia ter ocorrido no alimentador em questão. O circuito elétrico utilizado para a simulação possui fonte, carga (comparável a uma cidade de pequeno a médio porte), medição no ponto onde estariam instalados os sinalizadores e falta entre fases, entre fase e terra e rompimento de cabos. O circuito utilizado foi o apresentado na Figura 74 abaixo:

Figura 74 – Circuito da simulação computacional em PSCAD de defeito que causou atuação aparentemente errônea de sinalizadores.

A partir desse circuito, e controlando o tempo de abertura e fechamento dos diferentes disjuntores presentes no mesmo, foi possível simular alguns cenários do que pode ter ocorrido, analisando o que teria acontecido com os sinalizadores (se atuariam ou não). Em todos os cenários considerados, as faltas ocorrem nas FASES B e C.

O resultado obtido pode ser visto no próximo item deste APÊNDICE.

2 RESULTADOS OBTIDOS

A partir do circuito anterior, foram elaborados e simulados alguns cenários:

1º cenário) Rompimento das fases B e C no local de defeito, com queda dos fios à terra, seguida da atuação da proteção e uma tentativa de religamento: Neste cenário não poderia haver atuação dos sinalizadores. Portanto, além da falta à terra, outro defeito deve ter ocorrido no ponto de quebra da cruzeta para que os sinalizadores atuassem.

2º cenário) Rompimento das fases B e C no local de defeito, com queda dos fios à terra em instantes distintos, seguida da atuação da proteção e uma tentativa de religamento: Neste cenário não poderia haver atuação dos sinalizadores. Portanto, não seria o simples fato dos cabos terem se partido e caído em instantes distintos que faria com que os sinalizadores atuassem.

3º cenário) Repetição do 2º cenário (rompimento das fases B e C no local de defeito, com queda dos fios à terra em instantes distintos, seguida da atuação da proteção e uma tentativa de religamento), com os fios da Fase B caindo à terra antes da quebra dos fios da fase C: Neste cenário não poderia haver atuação dos sinalizadores. Mesmo com esta particularidade, fica evidente que não ocorreu apenas um curto circuito a terra. Portanto, deste ponto em diante passa-se a estudar a ocorrência de um curto bifásico no evento de quebra da referida cruzeta.

4º cenário) Quebra da cruzeta com curto bifásico de curta duração entre as fases B e C, sem atuação da proteção, seguida pela quebra dos fios em instantes distintos e queda ao solo em instantes distintos: Neste cenário poderia haver a atuação dos sinalizadores instalados nas fases B e C, porque a queda de tensão causada pelo curto bifásico no ramo defeituoso causou uma queda temporária de corrente, que retornou aos níveis normais quando o curto foi extinto.

Esse degrau de corrente poderia sensibilizar o flag de sobrecorrente dos sinalizadores. A queda dos fios a terra sensibilizou a proteção da subestação (51GS) e fez com que a tensão fosse a zero em todo o alimentador. Aí os sinalizadores piscaram.

5º cenário) Quebra da cruzeta com curto bifásico de curta duração entre as fases B e C, sem atuação da proteção, seguida pela quebra dos fios em instantes distintos e queda ao solo em instantes distintos, considerando o ramo do defeito 10 vezes mais longo: Verifica-se que a queda de tensão no tronco principal do alimentador é bem menor quando o defeito está localizado mais longe do tronco, de modo que neste cenário os sinalizadores nem detectariam uma variação de corrente, portanto não piscariam. Isso mostra que os sinalizadores só piscaram porque o defeito ocorreu relativamente perto do tronco do alimentador.

6º cenário) Quebra da cruzeta com curto bifásico de curta duração entre as fases B e C, sem atuação da proteção, seguida pela quebra dos fios em instantes distintos e queda ao solo em instantes distintos, considerando o ramo do defeito 10 vezes mais curto: Verifica-se que a queda de tensão no tronco principal do alimentador é maximizada quando o defeito está localizado mais perto do tronco, de modo que neste cenário os sinalizadores detectariam uma maior variação de corrente, portanto poderiam piscar.

7º cenário) Quebra da cruzeta com curto bifásico de curta duração entre as fases B e C, sem atuação da proteção, seguida pela quebra dos fios em instantes distintos e queda ao solo em instantes distintos, mas com carga do ramo onde estão os sinalizadores de faltas sendo bem menores: Neste caso, como a carga já era menor, o degrau de corrente também é menor no curto bifásico, não sendo suficiente para sensibilizar os sinalizadores, que não piscariam neste cenário. Isto explica os sinalizadores não piscarem após a chave 51537.

8º cenário) Curto bifásico de curta duração entre as fases B e C, com atuação da proteção: Neste caso, não poderia haver atuação do sinalizador. A atuação da proteção (instantâneo) limpando o curto bifásico poderia impedir a quebra dos fios e faria com que os sinalizadores atuassem corretamente. A

ocorrência de um curto bifásico por si só, segundo o resultado da simulação, não faz o sinalizador a jusante piscar.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O resultado das simulações dos 1º, 2º e 3º cenários mostram claramente que o simples fato de ocorrer uma quebra de uma cruzeta em um ramal do alimentador, com consequente queda dos cabos ao chão e atuação da proteção 51GS da subestação, não poderia ocorrer o disparo do sinalizador luminoso instalado nos outros ramais.

Para que ocorresse o disparo da sinalização luminosa em outro ramal, estudou-se a ocorrência de outras “faltas” em conjunto, no mesmo evento registrado na ocasião.

É muito provável que, se uma cruzeta quebra por podridão e seus cabos caem no chão, em algum momento os cabos de pelo menos duas fases se toquem antes de se partirem. O relato da equipe de manutenção mostra que essa hipótese, além de plausível, é muito provável. Um dos cabos ficou intacto (na simulação, a FASE A), e outros dois se partiram e caíram ao solo (FASES B e C).

Antes mesmo do rompimento eles devem ter se tocado, causando um curto bifásico de curta duração, que não sensibilizou a proteção. Esse curto poderia ter causado seus rompimentos e queda, que por fim sensibilizaram o 51GS que abriu a linha.

O cenário 8 mostra que o simples curto bifásico, com consequente atuação da proteção, não provoca atuação do sinalizador de faltas de outros ramos da rede. Portanto, realmente ocorreu mais do que uma falta na ocasião.

O cenário 4 mostra, conforme a Figura 75 abaixo, que um curto bifásico B-C, seguido do rompimento e queda dos cabos ao chão, poderia fazer atuar os sinalizadores de outros ramos, desde que a proteção não fosse sensibilizada pelo curto bifásico.

Figura 75 – Resultado da simulação do cenário 4.

O cenário 5 mostra que se esse defeito ocorresse mais longe do tronco do alimentador, os sinalizadores dos outros ramos também não piscariam. O cenário 6 mostra, conforme a Figura 76 abaixo, que o fenômeno é maximizado quanto mais próximo do tronco ocorresse esse defeito.

Figura 76 – Resultado da Simulação do cenário 6.

O cenário 7 mostra que se a carga do ramo onde está instalado o sinalizador for mais baixa, mesmo com a queda da tensão provocada pelo curto bifásico em outro ramo da rede, o degrau de corrente não seria suficiente para sensibilizar o sinalizador de faltas e eles não piscariam.

A partir do relato do evento ocorrido, onde 2 sinalizadores foram sensibilizados por um defeito ocorrido em um ramal a montante do ponto de instalação, e dos resultados das simulações aqui apresentados, pode-se presumir o seguinte:

- Num ramo do alimentador, durante uma chuva, ocorreu a quebra de uma cruzeta que estava podre. A quebra da cruzeta provocou a queda de duas das fases. A terceira delas ficou intacta.
- A queda das duas fases provocou um curto bifásico entre elas.
- Não houve atuação da proteção do ramo com defeito devido ao curto bifásico, porque esse equipamento estava com a bateria descarregada.
- A tensão nas duas fases em curto, em todo o alimentador, caiu consideravelmente, inclusive no ramo onde estavam instalados sinalizadores de faltas.
- Como consequência, a corrente também caiu nessas duas fases.
- Como a falta (curto bifásico) não foi “limpa” pela proteção, os cabos se partiram e caíram ao solo.
- Nesse momento, a tensão e a corrente nos outros ramos do alimentador voltou ao normal, ou seja, para os sinalizadores de faltas ocorreu um degrau de corrente.
- Novamente, a falta bifásica à terra não pode ser “limpa” pela proteção do ramal, porque a RE estava com a bateria descarregada.
- Depois de alguns instantes, a proteção 51GS da subestação atuou, desligando todo o alimentador.
- As tentativas de religamento não foram bem sucedidas porque os cabos continuavam no solo.

A equipe de manutenção, quando foi correr o alimentador, não percebeu que o defeito estava naquele ramal, porque a RE estava sem bateria e não atuou. Quando chegaram à religadora próxima dos sinalizadores, próxima da chave 51536, perceberam que esta não estava atuada e deveriam ter concluído que o defeito estava a montante daquele ponto. Entretanto, notaram um par de sinalizadores atuados a jusante do religador (que não atuou) e decidiram verificar se o defeito estava a frente desses sinalizadores, causando demora na localização do defeito e restabelecimento da energia para a cidade atingida.

Os sinalizadores atuaram devido a detecção de um degrau de corrente seguido de uma queda de tensão (exatamente como estão programados para fazê-lo), causado por um conjunto inusitado (e pouco provável que se repita) de defeitos na rede, aliados a atuação de maneira não usual da proteção:

- O curto bifásico ocorreu em local não muito próximo e não muito distante do tronco do alimentador. Se o defeito estivesse mais longe do tronco, a tensão não cairia tanto, nem a corrente, e os sinalizadores também não teriam atuado;
- Nenhuma proteção respondeu à ocorrência do curto bifásico, que evoluiu para a quebra dos fios e queda destes à terra, durante a chuva;
- A consequente queda de tensão foi tal que a corrente de carga no ramo dos sinalizadores teve uma queda considerável (quase 50%). O retorno da corrente ao nível nominal (quando os cabos se partiram e a tensão se restabeleceu no alimentador) fez com que o sinalizador detectasse um degrau de corrente.
- Os sinalizadores que não atuaram não detectaram um degrau de corrente significativo porque, provavelmente, a corrente de carga nesse outro ramal é menor e a variação de corrente não foi suficiente para sensibilizar o di/dt dos equipamentos.
- O fato dos fios terem caído ao solo depois do curto bifásico, ocasionou a ocorrência de um novo defeito na rede – curto fase-terra. Como a proteção do ramal não poderia isolar aquele defeito porque estava sem bateria, a proteção 51GS da subestação teve de atuar, fazendo a tensão cair a zero em todo o alimentador.
- Os sinalizadores que já haviam detectado um degrau de corrente, depois da queda de tensão, “concluíram” que a atuação da proteção se deu pela sobrecorrente que haviam detectado a pouco e começaram a sinalizar.

Apesar dos sinalizadores terem atuado devido a essa sequência inusitada de eventos, a proteção não atuada a montante dos sinalizadores deveria indicar para a equipe de manutenção que dificilmente o defeito poderia estar à jusante. Resumindo, a seguinte sequência de eventos causou a atuação errônea dos sinalizadores:

1. Quebra da cruzeta por podridão;
2. Curto Bifásico;
3. Não atuação da proteção pelo curto bifásico;
4. Curto Fase-Terra durante chuva em ramal do alimentador;
5. Abertura do disjuntor do alimentador na subestação.

A atuação dos sinalizadores não se deu por um defeito intrínseco ou eventual dos equipamentos sinalizadores de faltas, especialmente os que estavam instalados naquele ponto. Testes de laboratório e as simulações apresentadas neste relatório comprovam esse fato.

4 CONCLUSÃO

As simulações apresentadas, geradas única e exclusivamente a partir dos relatos e informações da equipe de manutenção que fez o atendimento emergencial em estudo, aliadas a outros dados passados pela equipe da CPFL que atende essa localidade, mostram que os sinalizadores atuados não apresentaram problemas e o fizeram da maneira que era esperado de seu funcionamento normal.

Os sinalizadores de falta só atuam com uma variação brusca de corrente seguida de queda de tensão, “assinatura” comum de um curto circuito que ocorre a jusante do ponto de instalação do equipamento sinalizador. Essa “assinatura” foi notada pelos equipamentos sinalizadores atuados na ocorrência, apesar do defeito ter ocorrido num ponto a montante de seus locais de instalação. Isso ocorreu por uma série de eventos que raramente e dificilmente poderão ser verificados na prática novamente, se o esquema usual de proteção dos alimentadores da concessionária estiver operando de maneira correta e completa

Os sinalizadores envolvidos no incidente foram testados em bancada e na alta tensão nos laboratórios da universidade (LSO/USP), apresentando funcionamento 100% correto e dentro do esperado.

A utilização dos sinalizadores, mesmo com a probabilidade ínfima de nova ocorrência de eventos como este relatado, deve trazer ganhos significativos para a Companhia, relativos à melhoria dos indicadores de tempo de atendimento a emergências.

Alguns cuidados simples das equipes de manutenção e operação da rede podem fazer com que essas ocorrências não se repitam:

- Atentar para a manutenção preventiva dos equipamentos de proteção da rede;
- Ajustar corretamente os relés de proteção. Um tempo mais rápido na atuação do instantâneo poderia evitar o rompimento dos condutores por faltas bifásicas e evitar esses degraus de corrente que podem sensibilizar os sinalizadores, que são bastante sensíveis para que possam operar sem a necessidade de ajustes externos, conforme pedido da própria concessionária desde o início do desenvolvimento.
- Atentar, antes de qualquer coisa, para o estado da proteção durante o atendimento a ocorrências emergenciais. Um religador em bom estado de funcionamento e não atuado é sinal que o defeito deve estar a montante dele.

ANEXO A – Tabela de Consumo de Corrente do microcontrolador MSP430F133

Tabela 16 – Consumo de corrente do microcontrolador MSP430F133

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	NOM	MAX	UNIT
$I_{(AM)}$	Active mode, (see Note 1) $f_{(MCLK)} = f_{(SMCLK)} = 1 \text{ MHz}$, $f_{(ACLK)} = 32,768 \text{ Hz}$ $XTS=0$, $SELM=(0,1)$	$T_A = -40^\circ\text{C to } 85^\circ\text{C}$	$V_{CC} = 2.2 \text{ V}$		280	350	μA
			$V_{CC} = 3 \text{ V}$		420	560	
$I_{(AM)}$	Active mode, (see Note 1) $f_{(MCLK)} = f_{(SMCLK)} = 4,096 \text{ Hz}$, $f_{(ACLK)} = 4,096 \text{ Hz}$ $XTS=0$, $SELM=(0,1)$ $XTS=0$, $SELM=3$	$T_A = -40^\circ\text{C to } 85^\circ\text{C}$	$V_{CC} = 2.2 \text{ V}$		2.5	7	μA
			$V_{CC} = 3 \text{ V}$		9	20	
$I_{(LPM0)}$	Low-power mode, (LPM0) (see Note 1)	$T_A = -40^\circ\text{C to } 85^\circ\text{C}$	$V_{CC} = 2.2 \text{ V}$		32	45	μA
			$V_{CC} = 3 \text{ V}$		55	70	
$I_{(LPM2)}$	Low-power mode, (LPM2), $f_{(MCLK)} = f_{(SMCLK)} = 0 \text{ MHz}$, $f_{(ACLK)} = 32,768 \text{ Hz}$, $SCG0 = 0$	$T_A = -40^\circ\text{C to } 85^\circ\text{C}$	$V_{CC} = 2.2 \text{ V}$		11	14	μA
			$V_{CC} = 3 \text{ V}$		17	22	
$I_{(LPM3)}$	Low-power mode, (LPM3) $f_{(MCLK)} = f_{(SMCLK)} = 0 \text{ MHz}$, $f_{(ACLK)} = 32,768 \text{ Hz}$, $SCG0 = 1$ (see Note 2)	$T_A = -40^\circ\text{C}$	$V_{CC} = 2.2 \text{ V}$		0.8	1.5	μA
		$T_A = 25^\circ\text{C}$			0.9	1.5	
		$T_A = 85^\circ\text{C}$			1.6	2.8	
		$T_A = -40^\circ\text{C}$	$V_{CC} = 3 \text{ V}$		1.8	2.2	μA
		$T_A = 25^\circ\text{C}$			1.6	1.9	
		$T_A = 85^\circ\text{C}$			2.3	3.9	
$I_{(LPM4)}$	Low-power mode, (LPM4) $f_{(MCLK)} = 0 \text{ MHz}$, $f_{(SMCLK)} = 0 \text{ MHz}$, $f_{(ACLK)} = 0 \text{ Hz}$, $SCG0 = 1$	$T_A = -40^\circ\text{C}$	$V_{CC} = 2.2 \text{ V}$		0.1	0.5	μA
		$T_A = 25^\circ\text{C}$			0.1	0.5	
		$T_A = 85^\circ\text{C}$			0.8	2.5	
		$T_A = -40^\circ\text{C}$	$V_{CC} = 3 \text{ V}$		0.1	0.5	μA
		$T_A = 25^\circ\text{C}$			0.1	0.5	
		$T_A = 85^\circ\text{C}$			0.8	2.5	