

RENATO DE ARRUDA PENTEADO NETO

**SISTEMAS PARA DETECÇÃO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA E DE
ROMPIMENTO DE CONDUTORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, Área de Concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. René Robert

CURITIBA

2005

DEDICATÓRIA

**Para minha esposa e filhos, Patrícia,
André e Paula.**

Para minha mãe Carmen.

**Em memória de meu pai Renato e de
meu colega Paulo Scarpa.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Renê Robert, pelo incentivo e pelos conhecimentos transmitidos.

A Companhia Paulista de Força e Luz, CPFL, em especial ao engenheiro Paulo César Scarassati, pelo patrocínio e pela visão social no apoio a um tema de pesquisa que não visa tão somente resultados financeiros, mas a segurança da sociedade.

Ao LACTEC pela oportunidade da realização desse estudo.

Aos meus colegas do LACTEC que, com especial dedicação, participaram das diversas fases que compuseram esse trabalho.

Aos professores do PIPE, Programa de Pós Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Paraná, pelos ensinamentos oferecidos.

A todas aquelas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	2
1.2	DETERMINAÇÃO DAS PRINCIPAIS CAUSAS DE ROMPIMENTO DOS CONDUTORES.	7
1.3	RUPTURA CAUSADA PELA DESCARGA ATMOSFÉRICA	8
1.4	RUPTURA CAUSADA PELA CORROSÃO	12
1.5	RUPTURA CAUSADA PELO CONTATO COM ÁRVORES.....	15
1.6	RECOMENDAÇÕES.....	16
2	CARACTERIZAÇÃO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS E FALHAS ASSOCIADAS.	17
2.1	PRELIMINARES	17
2.2	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DAS TENSÕES APLICADAS SOBRE UM CONDUTOR	20
2.3	TESTES E RESULTADOS	24
3	PROJETO E CONSTRUÇÃO DO LABORATÓRIO EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO voltado ao estudo do rompimento de condutores	28
3.1	PRELIMINARES	28
3.2	CARACTERÍSTICAS DO LABORATÓRIO EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO.	29
3.2.1	Disposição física.	29
3.2.2	Projeto Elétrico.....	30
3.2.3	Características da Casa de Controle	31
3.3	TESTES E RESULTADOS	32
4	SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ORIGINADAS POR ROMPIMENTO DE CABOS.....	39
4.1	PRELIMINARES	39
4.2	SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA	45
4.3	TESTES E RESULTADOS	46

5	SISTEMA DE DETECÇÃO DO ROMPIMENTO DE UM CONDUTOR ATRAVÉS DA EXTENSOMETRIA EM METAIS	54
5.1	PRELIMINARES	54
5.2	A EXTENSOMETRIA – CONCEITOS E APLICAÇÕES.....	54
5.3	SISTEMA PARA DETECÇÃO DO ROMPIMENTO DE CABOS USANDO ISOLADORES INSTRUMENTADOS.....	60
5.3.1	O sensor para detecção de rompimento (isolador instrumentado)	61
5.3.2	O tratamento do sinal proveniente dos sensores de rompimento de cabos e a transmissão por meio de rádio	66
5.3.3	Os microcontroladores utilizados nos circuitos de transmissão e de recepção de sinais	70
5.3.4	A recepção do sinal e a comunicação com o microcomputador.	75
5.3.5	O gerenciamento da informação.....	78
5.4	TESTES E RESULTADOS	79
5.4.1	Célula de carga construída no LACTEC e transmissão de sinal por meio de cabo	79
5.4.2	Célula de carga construída no LACTEC e transmissão de sinal por meio de rádio.....	81
5.4.3	Isoladores instrumentados pela técnica da extensometria e transmissão de sinal por meio de rádio.....	82
5.4.4	Testes da rede experimental de distribuição.....	85
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.	89
6.1	CONCLUSÕES.....	89
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - NÚMERO DE CABOS ROMPIDOS POR ANO NAS REGIÕES SUDESTE E NORDESTE, EM FUNÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, DE CORROSÃO E DO CONTATO COM ÁRVORES.....	8
FIGURA 2 - FOTOGRAFIA MOSTRANDO OCORRÊNCIA DE CORROSÃO POR <i>PITTING</i> EM TUBO DE AÇO INOXIDÁVEL.....	14
FIGURA 3 - CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO; MEDIDAS VERTICAIS APRESENTADAS EM MILÍMETROS [35].....	19
FIGURA 4 - TENSÕES AXIAIS SOB CARGA DE TRAÇÃO AXIAL COM VINCO SEMI-CIRCUNFERENCIAL (TENSÕES EXPRESSAS EM PASCAL SENDO QUE A REGIÃO DE MÁXIMA TENSÃO ESTÁ IDENTIFICADA PELA COR VERMELHA).....	23
FIGURA 5 - TENSÕES AXIAIS SOB TRAÇÃO AXIAL COM <i>PITTING</i> (TENSÕES EXPRESSAS EM PASCAL SENDO QUE A REGIÃO DE MÁXIMA TENSÃO ESTÁ IDENTIFICADA PELA COR VERMELHA).....	23
FIGURA 6 - BANCADA DE ENSAIO DE CABOS DO LACTEC.....	25
FIGURA 7- ARRANJO PARA O ENSAIO DO CONDUTOR IRIS NA BANCADA DE CABOS.....	26
FIGURA 8 - GRÁFICO QUE APRESENTA A VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CABO COM A PERDA DE TENTOS.....	27
FIGURA 9 - GRÁFICO QUE APRESENTA A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO CABO NA REGIÃO DOS TENTOS ROMPIDOS	28
FIGURA 10 - PLANTA DO LABORATÓRIO DE DISTRIBUIÇÃO	33
FIGURA 11- FOTO COM VISTA GERAL DO LABORATÓRIO.....	34
FIGURA 12 - FOTO DO POSTE SUPORTANDO O TRANSFORMADOR DE TENSÃO.....	34

FIGURA 13 – FOTO COM DETALHE DO TERMOPAR PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NO CONDUTOR. ENSAIO COM CORRENTE, SEM TENSÃO NOMINAL.....	35
FIGURA 14 - FOTO DO POSTE QUE SE APÓIA SOBRE RODAS E PODE TER SUA POSIÇÃO ALTERADA AXIALMENTE OU TRANSVERSALMENTE.....	35
FIGURA 15 - FOTO DO LABORATÓRIO EM CONSTRUÇÃO. DETALHE DA OBRA CIVIL DO CONJUNTO DE TRILHOS.....	36
FIGURA 16 - FOTO DO CARRO DE APOIO PARA O POSTE MÓVEL	36
FIGURA 17 - FOTO DA CASA DE CONTROLE COM A FONTE DE CORRENTE E OS DISPOSITIVOS DE COMANDO E PROTEÇÃO.....	37
FIGURA 18 - FOTO DO PAINEL CONTENDO OS DISPOSITIVOS DE COMANDO E PROTEÇÃO	37
FIGURA 19 - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE CORRENTE CONTROLADA. À ESQUERDA, IMAGEM DO TRANSFORMADOR E À DIREITA, IMAGEM DO VARIAC.	38
FIGURA 20 - FOTO DO DIVISOR CAPACITIVO APLICADO NO TESTE DO CIRCUITO DE 13 KV DO LABORATÓRIO	38
FIGURA 21 – DESENHO CONTENDO OS DIAGRAMAS DE LIGAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA. A TENSÃO DA FONTE DOS ALIMENTADORES, LIGADOS EM ESTRELA, É DE 13,8 KV E AS TENSÕES DAS CARGAS, LIGADAS EM TRIÂNGULO, SÃO DE 220/127 V.....	41
FIGURA 22 - SISTEMA TRIFÁSICO EQUILIBRADO COM A FONTE LIGADA EM ESTRELA E A CARGA LIGADA EM TRIÂNGULO [45].	42
FIGURA 23 - DIAGRAMA FASORIAL CORRESPONDENTE AO CIRCUITO DA FIGURA 22.....	43
FIGURA 24 - DESENHO MOSTRANDO A ALIMENTAÇÃO DE UMA CARGA LIGADA EM TRIÂNGULO, COM UMA DAS FASES INTERROMPIDAS [46].....	44

FIGURA 25 - CONJUNTO COMPOSTO PELOS TRÊS SENSORES E PELA UNIDADE RECEPTORA [47].....	46
FIGURA 26 - FOTO DO SENSOR COM ANTENA DE TRANSMISSÃO	47
FIGURA 27 - FOTO DA INSTALAÇÃO DO SENSOR NA REDE EXPERIMENTAL.....	48
FIGURA 28 - FOTO DO SENSOR INSTALADO NA REDE EXPERIMENTAL.....	48
FIGURA 29 - FOTO DA INDICAÇÃO DA CORRENTE NA TELA DO MONITOR.....	49
FIGURA 30 - TESTES EM BANCADA, COM SENSORES APLICADOS NAS TRÊS FASES	50
FIGURA 31 – FOTO DO ARRANJO FÍSICO PARA O TESTE.....	50
FIGURA 32 - TESTES EM BANCADA TRIFÁSICA, COM SENSORES APLICADOS NAS TRÊS FASES	51
FIGURA 33 - TELA DO LABVIEW APRESENTANDO A FAI NA FASE 2 E DEFASAMENTO ENTRE AS OUTRAS DUAS	53
FIGURA 34 - TELA DO LABVIEW APRESENTANDO A FAI NA FASE 3 E DEFASAMENTO ENTRE AS OUTRAS DUAS	53
FIGURA 35 - FOTOGRAFIA DO TIPO DE EXTENSÔMETRO UTILIZADO NA DETECÇÃO DA TENSÃO MECÂNICA APLICADO NO PINO DE ISOLADOR DE DISTRIBUIÇÃO [54].....	57
FIGURA 36 - PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE E MARCAÇÃO DA POSIÇÃO DE INSTALAÇÃO DO EXTENSÔMETRO.	58
FIGURA 37 - INSTALAÇÃO DE UM EXTENSÔMETRO EM UM SUBSTRATO [57]	60
FIGURA 38 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE ROMPIMENTO DE CABOS.	60
FIGURA 39 - SIMULAÇÃO DA SITUAÇÃO NORMAL (SUPERIOR) E DE CABO ROMPIDO (INFERIOR) [65].....	63
FIGURA 40 - ISOLADOR DE ANCORAGEM INSTRUMENTADO [65].....	64

FIGURA 41 - ISOLADOR DE PINO INSTRUMENTADO. VISTAS FRONTAL E LATERAL [65]	64
FIGURA 42 - FOTO DA HASTE DO ISOLADOR INSTRUMENTADO COM EXTENSÔMETROS A SEREM CONECTADOS À PLACA DE CONEXÃO ELÉTRICA.....	65
FIGURA 43 - FORMA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA ADOTADA. QUATRO EXTENSÔMETROS LIGADOS, CONSTITUINDO CADA UM DELES UM BRAÇO DA PONTE DE WHEATSTONE [57].....	66
FIGURA 44 - CIRCUITO ELETRÔNICO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL	69
FIGURA 45 - ESQUEMA DO PIC 16F877 UTILIZADO NOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE SINAL.....	72
FIGURA 46 – CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTOS DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO CONFECCIONADAS PARA A TRANSMISSÃO DE SINAIS.....	73
FIGURA 47 - CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM OS AMPLIFICADORES.....	73
FIGURA 48 - CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM O MICROCONTROLADOR PIC16F877.....	74
FIGURA 49 - CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM A FONTE.....	74
FIGURA 50 - CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM O RÁDIO RADIOMATRIX E RESPECTIVA ANTENA DE TRANSMISSÃO A ELE CONECTADA.....	75
FIGURA 51 - CIRCUITO PARA CONDICIONAMENTO DO SINAL RECEBIDO.....	77
FIGURA 52 - CIRCUITO DE RECEPÇÃO. FOTO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO CONFECCIONADAS PARA A RECEPÇÃO DE SINAL ..	77
FIGURA 53 - CIRCUITO DE RECEPÇÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM O MICROCONTROLADOR PIC16F877, E O CIRCUITO MAX 232	78

FIGURA 54 - ISOLADOR POLIMÉRICO DE ANCORAGEM COM CÉLULA DE CARGA E TRANSMISSÃO DE SINAL POR CABO ELÉTRICO. DETALHE COM EVIDÊNCIA DA CÉLULA DE CARGA.....	80
FIGURA 55 - SIMULAÇÃO DE CONDUTOR ROMPIDO	80
FIGURA 56 - ISOLADOR POLIMÉRICO DE ANCORAGEM E CÉLULA DE CARGA CONSTRUÍDA NO LACTEC.....	81
FIGURA 57 - BANCADA PARA SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO. ISOLADOR DE ANCORAGEM COM CÉLULA DE CARGA COMERCIAL, TRANSMISSOR E RECEPTOR DE SINAL VIA RÁDIO.....	82
FIGURA 58 - FOTOGRAFIA MOSTRANDO UM ISOLADOR DE PINO INSTRUMENTADO, MONTADO EM BANCADA COM TRANSMISSÃO DE SINAL VIA RÁDIO	83
FIGURA 59 - DETALHE DO ISOLADOR DE PINO INSTRUMENTADO	84
FIGURA 60 - FOTO DO PROTÓTIPO PARA O SISTEMA DE RECEPÇÃO POR RÁDIO INSTALADO NA BANCADA DE LABORATÓRIO.....	84
FIGURA 61 - FOTOS MOSTRANDO AS TELAS DE AVISO À OPERAÇÃO RELATIVAS AO ESTADO DO CONDUTOR.....	85
FIGURA 62 - FOTO DOS ISOLADORES DE PINO INSTRUMENTADOS PELA TÉCNICA DA EXTENSOMETRIA INSTALADOS EM POSTE CONVENCIONAL. A IMAGEM CONTÉM, TAMBÉM, O CONJUNTO DE TRANSMISSÃO DE SINAL ATRAVÉS DE RÁDIO (CAIXA FIXADA AO POSTE).....	87
FIGURA 63 - FOTO NO MOMENTO DA AQUISIÇÃO DO SINAL TRANSMITIDO PARA A CASA DE CONTROLE DA REDE EXPERIMENTAL	87
FIGURA 64 - FOTO DO SINAL TRANSMITIDO E RECEBIDO EM CÓDIGO ASCII.....	88
FIGURA 65 - FOTO DO SINAL UNÍVOCO RECONHECIDO ATRAVÉS DO LABVIEW E COM A CONFIGURAÇÃO DISPONIBILIZADA AO OPERADOR DA CONCESSIONÁRIA.....	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS CABOS DE ALUMÍNIO SEGUNDO A NBR 7271	25
TABELA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS DE UM CABO SEM DEFEITO, E DO MESMO CABO COM 1, 2 OU 3 TENTOS ROMPIDOS	27

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange
AWG	- American Wire Gauge
CAA	- Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CAW	- Cabo de Alumoweld
CAZ	- Cabo de Aço zincado
CEMIG	- Companhia Energética de Minas Gerais
CIREL	- International Council on Electricity Distribution
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia
FAI	- Falta de Alta Impedância
FM	- Frequência Modulada
GE	- General Electric
GPS	- Global Positioning System
INPI	- Instituto Nacional de Propriedade Industrial
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LEME	- Laboratório de Emissões Veiculares
MIT	- Massachusetts Institute of Technology
NBI	- Nível Básico de Isolamento
NBR	- Norma Brasileira
NE	- Nordeste
NTC	- Normas Técnicas da COPEL
SE	- Sudeste
ULA	- Unidade Lógica Aritmética
UART	- Universal Asynchronous Receiver Transmitter
PC	- Personal Computer
K_t	- Fator de Concentração de Tensões
K	- Fator de Sensibilidade de Extensômetros
R	- Resistência elétrica (Ω)
ρ	- Resistividade de um material ($\Omega.m$)
A	- Área da seção transversal de um condutor (m^2)
ν	- Coeficiente de Poisson

RESUMO

O rompimento de condutores elétricos de redes de distribuição de energia elétrica, especialmente em centros urbanos, tem sido um problema estudado há muito tempo tendo em vista os acidentes que vitimam seres vivos, muitos deles conduzindo pessoas ao óbito, e causando efeitos negativos à imagem das concessionárias de energia, além da interrupção do fornecimento e o correspondente ônus financeiro que o problema acarreta.

Este trabalho teve dois objetivos principais. O primeiro foi o de levantar e estudar as principais causas que levam ao rompimento, e sugerir ações no sentido que seja isso minimizado. O segundo vem em complemento ao primeiro, e foi o de criar sistemas que detectem o rompimento e informem a concessionária de energia para a tomada das ações cabíveis.

Foram desenvolvidos dois sistemas para detecção do rompimento dos condutores, para os quais foram construídos os respectivos protótipos. Um sistema é baseado na aplicação de sensores de corrente elétrica, e outro na aplicação da técnica da extensometria. Ambos os sistemas se mostraram promissores.

O sistema baseado na técnica da extensometria representa uma contribuição inédita para a qual foi depositado um pedido de patente junto ao INPI, em 17/08/2005 com o número PI0503502-3, sob o título “Sistema de detecção e comunicação de rompimento de condutor elétrico em redes de distribuição de energia elétrica”.

No âmbito dessa tese foi, ainda, construída uma rede experimental de distribuição de energia cujas características físicas e elétricas muito se aproximam de uma rede convencional de distribuição de energia. Nessa rede é possível a realização de testes elétricos com tensão alternada de até 13,8 kV ou correntes de até 400A, e de testes mecânicos em condutores instalados em uma rede de distribuição de energia. É extremamente flexível, permite a realização de uma ampla gama de testes e não tem similar conhecido na literatura. Por tratar-se de um projeto e construção de características inéditas, teve um pedido de patente depositado junto ao INPI no dia 11/10/2005, sob o título “Rede experimental de distribuição de energia elétrica” e número PI0504175-9.

ABSTRACT

A high impedance fault results when a primary circuit conductor makes an unwanted electrical contact which restricts the flow of the current below the detection level of the protective devices. High impedance faults often occur when a conductor breaks and falls to the ground. Such a situation leaves an energized conductor at ground level, creating a public hazard. For many years until now, protection engineers and researchers have looked for solutions to this long standing problem. This search has resulted in the development of several techniques to detect high impedance faults.

This work has been divided in two main parts. In first part conductor failure reasons have been determined and suggestions have been made in order to prevent such as failures. In second part two failure detection systems have been developed and respective prototypes were constructed. One system is based on electric current sensors. The other is based on the application of the extensometer technique. Prototypes have been tested with promising results. Prototypes may be converted to commercial products.

The unique extensometer based system was protected under a patent requirement number PI0503502-3 in 17/08/2005.

As a result of this work an experiential distribution laboratory was projected and constructed. Its physical and electrical characteristics are similar to a conventional electrical distribution system. Alternating voltage 13.8 kV or controlled alternating current up to 400 A can be applied. Laboratory is absolutely flexible and unique. Another patent requirement has been made in 11/10/2005, number PI0504175-9, for this unique cable laboratory.

1 INTRODUÇÃO

Na maioria das regiões brasileiras, a distribuição da energia elétrica nos centros urbanos se faz através de ramais aéreos alimentados em tensões da ordem de 15 kV. Tal solução traz como vantagem uma redução do custo de investimento, se comparada a outras formas de condução da energia por meio de condutores isolados ou protegidos. Traz, no entanto, desvantagens como a necessidade de adequação à topologia dos demais equipamentos e estruturas urbanas, além de influir na paisagem urbana das regiões por onde passa. Uma linha de distribuição convencional apresenta condutores não isolados fixados em postes instalados no passeio (calçada) das ruas. Uma falha mecânica que ocorra em um condutor, no sistema de fixação deste ao poste, ou mesmo no poste, colocará a população circunvizinha à região onde ocorreu a falha mecânica exposta a uma condição de risco de acidentes com potencial de fatalidade elevado. Este sistema foi desenvolvido há 50/60 anos e apresenta, hoje, saturações tecnológicas, propiciando baixo nível de confiabilidade no sistema elétrico de distribuição de energia se comparado com sistemas que apresentam melhor nível de isolamento elétrico. As redes elétricas com condutores nus, disputando o mesmo espaço aéreo com as árvores, podem causar prejuízos a todos os setores da sociedade, dentre os quais se destacam a ocorrência de curto-circuito na média e baixa tensão; a queima de transformadores, pela constante ocorrência de curtos; o afrouxamento de conexões que ligam condutores aos demais componentes da rede; os desligamentos constantes da rede; a queima de aparelhos domésticos e equipamentos; os prejuízos ao comércio e indústrias, decorrentes da falta de energia; os transtornos em hospitais e estabelecimentos de utilidade social; as perdas de faturamento; os gastos acentuados com manutenções, além do prejuízo à imagem da empresa concessionária de energia junto à comunidade. Este aspecto tem preocupado as empresas de energia e não apresenta, ainda, solução adequada [1, 2].

O contato de um condutor energizado no solo caracteriza, usualmente, uma falta de alta impedância. Tais faltas põem em risco a vida de pessoas e prejudica o desempenho da rede de energia. O desenvolvimento de detectores de falta é uma

área de pesquisa bastante ativa, mas ainda não se tem notícia de um detector confiável para este tipo de defeito.

A metodologia empregada neste trabalho tem por princípio atuar em dois aspectos quais sejam: a) a determinação das principais causas de rompimento dos condutores, associadas ao estudo dos principais aspectos físicos que as provocam; b) a detecção da falta de alta impedância, no caso de rompimento do condutor e seu conseqüente contato com o solo. Assim sendo, visa estudar e analisar as condições operacionais, de projeto e de manutenção de redes de distribuição de energia elétrica, buscando identificar causas de falhas que levem à ruptura do condutor, que se caracterizem como uma falta de alta impedância. Em seguida, foram estudados dispositivos que permitam mitigar as conseqüências de uma falta de alta impedância, quando não for possível sanar as causas que originam esta falta.

1.1 FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

A preocupação das concessionárias de distribuição de energia elétrica com o rompimento de um cabo energizado que cai ao solo é constante. Nessas circunstâncias, a corrente elétrica que circula no condutor pode ser muito pequena ou até nula, principalmente quando este cai sobre o asfalto, terra seca ou pedra, tendo em vista a elevada resistividade desses meios [3]. Falhas dessa natureza levam o título de alta impedância, que serão aqui denominadas FAIs.

Uma rede de distribuição é normalmente protegida através da atuação de um sistema convencional de proteção formado, basicamente, por relés de sobre-corrente, de desequilíbrio de carga entre as fases (corrente de neutro) e de fusíveis. Esse sistema, usualmente, não detecta faltas de alta impedância. Para tomarem ações, as concessionárias, por muitas vezes, dependem da notificação de consumidores, polícia ou bombeiros e esse processo pode tomar um tempo relativamente longo. Nesse período o cabo permanece energizado representando um risco potencial de grave acidente, se houver a aproximação ou contato por pessoas ou animais [4, 5].

As principais características que contribuem para essa dificuldade de

detecção são: a) as correntes e tensões normais dos alimentadores são muito pouco afetadas pela ocorrência de FAIs; b) o desequilíbrio natural dos alimentadores pode limitar a proteção baseada em corrente de neutro ou outro parâmetro indicador de desequilíbrio; c) na maioria dos casos de FAI, a corrente diminui com a duração da falta e d) não há um parâmetro reconhecido como indicador confiável de uma FAI.

As FAIs têm suscitado muitos estudos que visam sua determinação de maneira confiável. Esse é um problema que preocupa o setor de energia há muitos anos. As abordagens mais recentes serão aqui descritas, tendo como base alguns dos importantes trabalhos realizados na última década.

Em 1995, Mamishev et al. [6] comentam que corrente e tensão de fase em um sistema de distribuição de energia mudam com certo grau de caos quando ocorre uma falha de alta impedância. Descrevem aplicações do conceito de geometria fractal para analisar propriedades caóticas de falhas de alta impedância. São usados os valores da raiz média quadrática da corrente ao invés da corrente instantânea para caracterização do comportamento do sistema temporal. Isto resulta em relativamente curto tempo necessário para a análise. É apresentado um algoritmo para o reconhecimento do padrão, e a detecção da FAI é baseada em técnicas consideradas adequadas para análise de dados. O problema encontrado com o algoritmo é que são detectadas não somente faltas, mas também transientes, e a distinção entre os dois é muito difícil de ser caracterizada.

Em 1996, Aucoin e Jones [5] comentam sobre a disponibilidade de equipamentos para detectar uma alta percentagem de faltas de alta impedância, mas o uso destes equipamentos introduz conseqüências operacionais que afetam sua aplicação como, por exemplo, a existência de diversos tipos de alarme de difícil interpretação, e a atuação dos equipamentos leva a ocorrência de desligamentos intempestivos e desnecessários de ramais. Comentam sobre um sistema desenvolvido pela Texas A&M que produz duas informações: detecção de arco ou detecção de cabo ao solo, e que o sistema não diferencia de maneira confiável esses dois fenômenos.

Em 1997, Kezunovic [7] analisa a aplicação de rede neural para relés de

proteção e análise de falhas. O propósito principal desta análise foi o de indicar as mais promissoras implementações relacionadas com análise de problemas de relés convencionais na determinação das FAIs. Aborda os benefícios que se podem obter com o novo método. Verifica, no entanto, que as redes neurais ainda não haviam obtido larga aplicação, particularmente nesse campo, pela falta de reconhecimento de seus benefícios e pelo fato de não haver suficiente experiência prática para acessar o significado real do melhoramento.

No mesmo ano Jiali et al [8] apresentam um novo princípio de proteção de barras. A descrição do sistema de proteção, suas características de projeto, construção da rede de comunicação de dados e os algoritmos de proteção são discutidos. Análise de desempenho e experimentos preliminares mostram suas vantagens sobre o princípio tradicional, centralizado. É utilizada uma rede de comunicação de dados em vez da ligação direta à rede elétrica de distribuição.

Em 1998, o CIRED Working Group WG03 [9] emitiu um relatório que identifica as diferentes soluções para o gerenciamento de faltas, dependendo da estrutura da rede, filosofia de proteção e outras circunstâncias. Apresenta vários métodos de detecção e gerenciamento e compara suas vantagens e desvantagens, bem como seu custo e benefício. Mostra as barreiras tecnológicas ainda existentes na atuação confiável dos dispositivos disponíveis até a data do estudo. À frente o leitor vai perceber que trabalhos de 2002 chegam a conclusões muito parecidas, o que demonstra a dificuldade que envolve esse assunto.

Posteriormente, Hickery et al. [10] sugerem que o uso de um modelo dependente de resistência dinâmica pode ser usado para representar o arco de falha de sistema de potência. Descrevem a implementação da dependência de resistência dinâmica modelada no ambiente MATLAB e adaptam este modelo levando em consideração características adicionais, que incluem a extensão do caminho do arco, impedância do caminho da falha e efeitos atmosféricos. Algumas aplicações do modelo, em tensões de diferentes sistemas de potência e níveis de falhas de corrente foram realizadas. Resultados foram apresentados e discutidos.

Em 2001, Roberts et al. [11] introduzem dois novos elementos para

determinar a direção de FAIs em redes de distribuição não aterradas e compensadas. Estes elementos demandam somente informação do alimentador protegido e fornecem sensibilidade muito alta. Inicialmente é revista a característica básica da rede de distribuição. Em seguida é analisada a operação estacionária de um sistema não aterrado e compensado no domínio dos componentes de fase e simétricos sob condição de falta à terra. Nessas condições são avaliados os métodos existentes para detectar falhas à terra nestes sistemas. Introduzem métodos de detecção de falha para sistemas compensados e mostram como estes métodos são implementados com tecnologia moderna de relés. Em um dos mais completos trabalhos no tema, Hänninen [12], em sua tese de doutorado, trata de falta à terra de uma fase em uma rede de distribuição de média tensão. Ressalta que as redes são normalmente operadas radialmente e, ainda, parcialmente interconectadas o que torna mais complexa sua detecção. Transientes surgem em quase todas as ocorrências. Faltas de alta impedância caem em duas categorias, aquelas em que a resistência é abaixo de algumas centenas de ohms e outras que são da ordem de milhares de ohms. Algumas faltas podem se desenvolver gradualmente, por exemplo, faltas causadas por isolador de pino quebrado, cabo ao solo ou contato com árvore. Foi usada uma aplicação nova baseada na análise da tensão do neutro e da corrente residual, com um método probabilístico, com a possibilidade de detectar e localizar faltas resistivas à terra até uma resistência de 220 k Ω . Como os alimentadores têm, via de regra, comprimento da ordem de dezenas de quilômetros o trabalho conduziu ao desenvolvimento de novas aplicações das equações diferenciais e redes neurais para estimar a distância da falta. O desempenho do método da rede neural artificial foi comparável ao algoritmo convencional. Também foi mostrado que a rede neural, configurada pelos componentes harmônicos dos transientes da tensão do neutro, é aplicável para a determinação da distância da falta à terra. O benefício deste método é que é necessária somente uma medição no lado primário do transformador. Considerando-se somente faltas a terra, com pequena resistência, o erro médio em termos absolutos foi de aproximadamente 1,0 km para o método de redes neurais e aproximadamente 2,0 km para o algoritmo convencional em testes de campo. A

restrição para o método de redes neurais é a necessidade de um grande processo de treinamento, pois muitos parâmetros afetam a amplitude e frequência do sinal transiente. Para uso prático, o método convencional, baseado no cálculo da impedância da linha com falta, provou ser mais promissor.

Em 2002, Oliveira O. et al. [3] estudaram o desempenho de relés de três fabricantes, quais sejam a Alstom, GE e ZIV, realizaram simulações computacionais de alimentadores; ensaios em laboratórios sob tensão nominal; medição de desequilíbrio de neutro em alimentadores e ensaios reais em campo. O trabalho teve a participação intensa dos três fabricantes. Os resultados experimentais confirmaram a dificuldade de atuação dos sistemas de proteção atualmente disponíveis, e também daqueles que estão em desenvolvimento pelos fabricantes de relés, incluindo os de maior inovação tecnológica. Resultados experimentais são também apresentados por Proyecto OD98UN18 [13] que, assim como Oliveira O. et al. [3], apresentou registros de vários ensaios com condutores lançados sobre diversos tipos de solos, tanto úmidos como secos.

Em 2005, Stoupis et al [14] escreveram um artigo no qual relatam as condições nas quais acontecem as faltas de alta impedância e comentam que dispositivos convencionais de proteção não são capazes de detectá-las de maneira confiável, pois tais faltas tendem a exibir não apenas baixas correntes de falta, mas um comportamento randômico com instáveis e amplas flutuações, ricas em harmônicos e componentes de altas frequências. Citam que os especialistas em sistemas de proteção têm uma grande preocupação no que diz respeito aos alarmes falsos que, se conduzirem a um desligamento inadequado da rede, podem provocar problemas, especialmente em semáforos de trânsito, elevadores, sistemas de calefação, hospitais, etc. Informam que a Asea Brown Boveri, em associação com o Lafayette College, dos Estados Unidos da América, desenvolveu um sistema de proteção baseado em conceitos da inteligência artificial que tem a possibilidade de detectar grande parte das FAIs, com uma margem de alarme falso de 8%, que consideram muito baixa. Não descrevem, entretanto, em detalhes o mecanismo utilizado.

Patentes para proteção de tecnologia na detecção de faltas de alta impedância e cabos ao solo em sistemas elétricos de distribuição têm sido registradas. Pelo menos cinco delas foram depositadas nos Estados Unidos (5.485.093, 5.512.832, 5.578.931, 5.600.526, e 5.659.453), além de uma patente européia (0679295) e outra australiana (673298). O problema de ruptura de condutor de energia elétrica (cabo ao solo) e a detecção das FAIs permanecem e continuam sendo motivo de constante pesquisa.

1.2 DETERMINAÇÃO DAS PRINCIPAIS CAUSAS DE ROMPIMENTO DOS CONDUTORES.

Nesta etapa do trabalho foi realizada uma análise dos dados históricos de uma concessionária de energia brasileira. Esses dados dizem respeito a ocorrências em duas regiões geograficamente distintas. Relacionam causa e efeito em cabos de distribuição, onde foram tabulados conforme a região (nordeste e sudeste), a causa da falha, o alimentador, o período da ocorrência da falha e o número de consumidores que sofreram desligamento devido a tais falhas. Os dados fornecidos correspondem a um período de 31 meses para a região sudeste e de 19 meses para a nordeste. Confirmou-se que as principais causas que provocam o rompimento de cabos de distribuição são [15 e 16]:

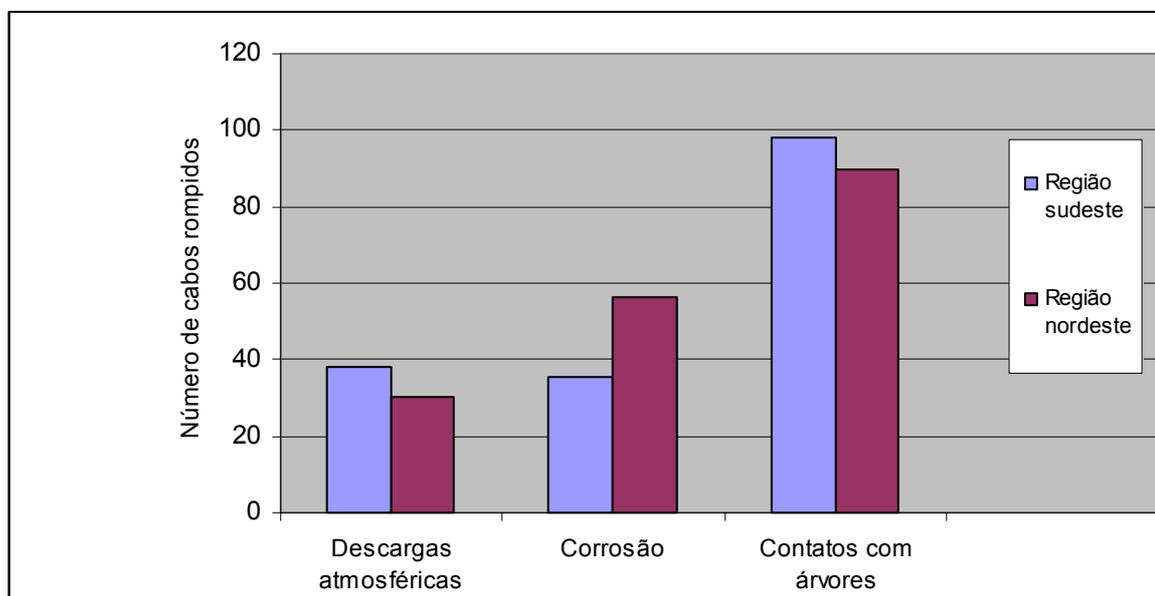
Descarga atmosférica

Corrosão atmosférica

Contato com árvores

A figura 1 mostra a quantidade de cabos rompidos, no período médio de 12 meses, em função de cada uma das causas, considerando as duas regiões analisadas [1].

FIGURA 1 - NÚMERO DE CABOS ROMPIDOS POR ANO NAS REGIÕES SUDESTE E NORDESTE, EM FUNÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, DE CORROSÃO E DO CONTATO COM ÁRVORES.



A seguir serão tecidas considerações a respeito da cada uma das principais causas que provocam a ruptura de condutores aplicados a redes de distribuição de energia elétrica.

1.3 RUPTURA CAUSADA PELA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Ao ser atingida por uma descarga atmosférica, direta ou indiretamente, uma linha de distribuição pode sofrer sobre-tensão ou ruptura do cabo, pela fusão de um ou vários fios que compõe o condutor, usualmente composto por sete fios entrelaçados entre si. Cada um desses fios tem a denominação de tento, doravante usada nesse trabalho.

Pode-se afirmar [17] que a descarga atmosférica tem tipicamente três componentes. A primeira descarga, de polaridade positiva ou negativa com amplitudes de até centenas de kA e alguns μ s de duração; os impulsos subseqüentes, com amplitudes de até dezenas de kA e centenas de μ s e o impulso de longa duração, chamado de componente de continuidade, também de polaridade positiva ou negativa, com amplitude de corrente da ordem de centenas de ampères

e duração de centenas de milisegundos.

Nem sempre a primeira descarga direta provoca a ruptura, pois esta é de curta duração (aproximadamente 60 μ s). Testes em laboratório indicam que a fusão dos tentos de um cabo ocorre com descarga de longa duração ou de continuidade [17, 18 e 19]. Nesse trabalho estará sendo usado com frequência o termo “tento”, que é o jargão técnico utilizado como sinônimo de fio, tendo em vista que os cabos condutores de energia elétrica são compostos por um conjunto de fios, ou de tentos.

Atualmente as soluções adotadas para reduzir as conseqüências das descargas atmosféricas são três, a seguir comentadas.

A primeira solução está vinculada a ações que propiciem o aumento do nível básico de isolamento (NBI), a instalação de cabo guarda nas áreas de maior incidência de descargas atmosféricas e de pára-raios.

Um maior nível de isolamento pode ser obtido com a utilização de materiais isolantes como a fibra de vidro, polímeros e epóxi. O aumento dos custos do equipamento de maior isolação é pequeno em proporção ao total do custo da construção. Tolbert et al. [20] apresentam estatísticas das falhas em linhas de distribuição de concessionária do Tennessee, EUA, onde 76% das ocorrências são provocadas por condições climáticas, 6% por animais, 28% por falha do equipamento, 28% por erro humano e 18% por causas desconhecidas. Das falhas provocadas pelas condições climáticas, 75% são atribuídas a descargas atmosféricas, razão pela qual o tema merece especial atenção. Em alguns casos a concessionária aumentou o nível de isolamento de algumas linhas em áreas de maior incidência de descargas atmosféricas, aumentando a isolação da linha de 15 kV para 34 e 69 kV.

As linhas de distribuição em questão são construídas com postes de madeira de 15 a 23 m de altura e cabo superior de guarda para interceptar descargas diretas. No Brasil não é usual cabo guarda em redes de distribuição de 15kV. Em 69 kV, no entanto, já é usual.

Chisholm et al. [21] mostram um estudo realizado na área rural de Ontário

onde a resistividade do solo é de $10 \Omega.m$ (área rural de Toronto) enquanto a leste de Ontário é de $18 M\Omega.m$. Mesmo com a baixa densidade de descargas, de 2 a 3 descargas/ km^2 /ano na região sudeste de Ontário e menor ainda na região norte e leste da província de 0,5 descargas/ km^2 /ano, existe uma tentativa de manter o NBI (nível básico de isolamento) em 300 kV para circuitos não aterrados ou 230 kV para alimentadores monofásicos com neutro aterrado. Em áreas onde a resistividade do solo é alta, é necessário aumento da isolação. Adicionalmente, para reduzir a interrupção do circuito por indução, é sugerido aumentar o nível de isolamento para valores recomendados no referido artigo.

Estudos mostram que, devido a condições climáticas, umidade e poluição, o desempenho das cadeias de isoladores pode ser prejudicado pela corrosão e diminuição do nível de isolamento, permitindo a descarga disruptiva na cadeia [22].

Para aumentar o entendimento da relação entre descargas atmosféricas e o desempenho do sistema elétrico, a CEMIG utiliza um Sistema de Localização de Tempestade, georeferenciado e baseado em GPS, combinado com o Sistema de Localização e Análise de Faltas. Com este sistema pretende localizar trechos de linhas de transmissão de maior incidência de descargas, atuando sobre sua proteção, instalando, por exemplo, pára-raios de ZnO, duplicando a blindagem ou tendo cuidados especiais com o aterramento dos dispositivos aplicados nas linhas de transmissão de energia [23]. Esse sistema de localização e de análise de falhas é descrito por Rocha e al. [24]. Gin et al. [25] apresentam um comparativo entre a intensidade de corrente das descargas atmosféricas ocorridas no Brasil e a apresentada na literatura.

A segunda solução sugere a atuação na localização precisa e em tempo real de descargas atmosféricas e correlação com desligamento da linha.

A determinação dos parâmetros para estimar a severidade de descarga atmosférica em sistemas de potência é sujeita a erros significativos já que a corrente da descarga é estimada indiretamente. Chowdhuri et al. [26] apresentam o modo como a sobre-tensão é gerada e comentam que a energia do primeiro impulso pode exceder o limite térmico do componente, causando a falha térmica (fusão do cabo).

Segundo Kappenman et al. [27] a técnica para localização remota de falhas provocadas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão pode ser aplicada com vantagem em linhas de distribuição, inclusive com benefícios maiores, pois num sistema de distribuição o consumidor é diretamente afetado, enquanto que sistemas de transmissão normalmente são redundantes, possuindo circuitos em paralelo. Qualquer distúrbio observado pode ser precisamente correlacionado no tempo com descarga atmosférica cujas fontes sejam controladas por GPS. Kappenman [28] comenta ainda que, no caso dos EUA, a precisão de localização de descargas atmosféricas tem aumentado após o *upgrade* da Rede Nacional de Detecção de Raios com melhora de eficiência de 65 para 90% e uma precisão de localização de 2 a 4 km para menos de 400 m. Esta tecnologia pode ser aplicada para se determinar o tipo de estrutura que deve ser adotada em uma determinada região tomando por base os dados históricos da exposição às descargas. A aplicação desta tecnologia em sistemas rurais de sub-transmissão e de distribuição também é vantajosa para localização precisa da falha, reduzindo o tempo de reparo.

Estudos são constantemente realizados no sentido de localizar as descargas atmosféricas. Mahanfar et al. [29] sugerem uma forma de detecção de campos eletromagnéticos gerados por descargas. Diendorfer et al. [30] analisam dados de ocorrências na Áustria, assim como Lees [31] o faz em relação ao Reino Unido, quando analisa o risco da incidência de descargas em turbinas.

A terceira solução sugere a melhora do desempenho dos materiais dos condutores.

Foram realizados ensaios em cabos CAZ (aço zincado), CAA (alumínio com alma de aço) e CAW (Alumoweld – aço, revestido com alumínio), submetidos a descargas de curta duração conforme NBR 14 589 e impulsos de longa duração, ou de continuidade de descarga [17]. Somente neste último caso houve ruptura parcial ou total do cabo. O que apresentou melhor desempenho foi o CAZ. Ravaglio et al. [18] observaram que cordoalhas de fios de aço galvanizado apresentam menor degradação do que fios de aço-alumínio, frente a descargas atmosféricas. Loewenthal [19] apresenta sugestão para normalização de ensaio para avaliar os

efeitos de descargas aplicando-se ao cabo uma descarga de corrente de continuidade.

Verifica-se que o tema atrai uma atenção especial, tendo em vista a característica aleatória do fenômeno e as conseqüências por ele provocadas.

1.4 RUPTURA CAUSADA PELA CORROSÃO

A corrosão pode ser definida como sendo o processo de deterioração de um material através da ação química, eletroquímica ou microbiológica exercida pelo meio ambiente sobre os materiais.

Os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas, ou reações eletroquímicas, que ocorrem geralmente na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo. Trata-se de um processo espontâneo de oxidação-redução, no qual o metal age como redutor e cede elétrons ao oxidante, existente no meio corrosivo. Normalmente o material metálico isolado está num estado de energia muito mais elevado do que no minério correspondente. A corrosão é, portanto, um regresso a estados mais baixos de energia, através de reações com o meio ambiente, tendendo para formas combinadas como óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos, sulfetos e sulfatos.

Os condutores de redes de distribuição aéreas estão sujeitos, principalmente, à ação da corrosão atmosférica. Essa forma de corrosão está relacionada à deposição de material não-metálico; à exposição a substâncias que retêm umidade; à presença de sais e de material metálico e, ainda, de partículas sólidas que, embora inertes para o material metálico, podem reter sobre a superfície gases corrosivos existentes na atmosfera. Além desses fatores, a corrosão atmosférica depende da ação da temperatura, do tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica, da umidade relativa e da direção e velocidade dos ventos.

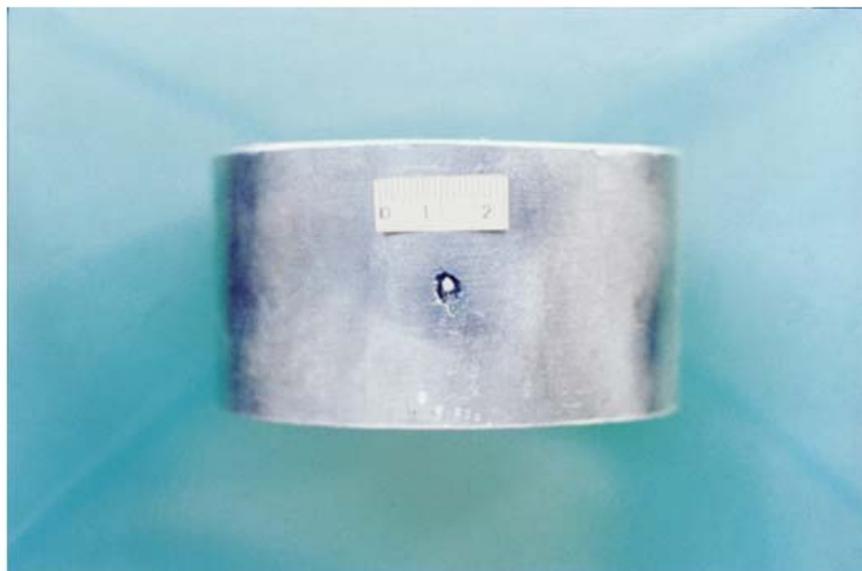
O cloreto de sódio (NaCl) e o dióxido de enxofre (SO₂) são os principais contaminantes e os agentes corrosivos mais comuns encontrados na atmosfera. O cloreto de sódio se incorpora à atmosfera a partir do mar, tendo seus efeitos muito

intensificados nas regiões próximas à orla marítima. Isso ocorre pelo fato do ar transportar grandes quantidades de sal, produzindo uma contínua pulverização da água. Observou-se, no litoral do Paraná, que a ação da maresia se dá principalmente no cabo guarda de linhas de transmissão tendo em vista que neste não há passagem de corrente e não sofre aquecimento, mantendo-se úmido continuamente. A utilização de cabo de cobre ou o afastamento da linha da área de influência da maresia pode prolongar a vida do cabo [32]. O dióxido de enxofre é encontrado em atmosferas poluídas por fumaças de origem industrial e pela queima de combustíveis fósseis.

Para o caso do alumínio exposto à atmosfera, na ausência de umidade, forma-se uma camada de alumina amorfa. A excelente resistência do alumínio puro, e de suas ligas, a distintos climas é devida a formação de uma camada contínua, tenaz, muito aderente, insolúvel em água e fortemente passivante de óxido de alumínio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), que constitui uma excelente barreira contra a corrosão atmosférica.

O alumínio, no entanto, pode ser atacado de maneira uniforme pela dissolução da camada de óxido, por ácidos ou outros íons reativos, conduzindo a formação de sais solúveis tais como o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ou sais básicos que se incorporam à camada de produtos da corrosão. O dano principal do alumínio está relacionado com seu ataque por *pitting* [33]. A corrosão por *pitting* é uma forma localizada de corrosão através da qual são produzidas cavidades no material. A figura 2, cedida por José Maurílio da Silva, mostra a ação da corrosão por *pitting* em um corpo metálico de aço inoxidável.

FIGURA 2 - FOTOGRAFIA MOSTRANDO OCORRÊNCIA DE CORROSÃO POR *PITTING* EM TUBO DE AÇO INOXIDÁVEL



Na avaliação dos dados fornecidos pela concessionária de energia patrocinadora desse estudo, verificou-se que a corrosão provocou danos aos condutores afetando 3,7% de consumidores na região NE e provocando 1,8% de interrupções nos alimentadores da região SE. Os alimentadores mais afetados por corrosão são, em média, aqueles próximos a ambientes industriais. Ressalta-se que as regiões em avaliação ficam distantes da orla marítima.

O cabo guarda de uma linha de transmissão que atravessa áreas industriais com alta concentração de enxofre também sofre corrosão. É possível, neste caso, aplicar uma proteção catódica por corrente impressa. Esta solução, a princípio, não é aplicável a cabos de força. Outra solução, para pequenos ramais, é o revestimento do cabo com material inerte à corrosão (chumbo, polímero).

Linhas de distribuição que atravessam pequenas áreas com atmosfera corrosiva podem ser deslocadas destas de modo a não sofrerem o efeito da poluição.

1.5 RUPTURA CAUSADA PELO CONTATO COM ÁRVORES

Apesar dos inúmeros benefícios que proporciona ao meio ambiente, a presença da arborização no meio urbano não é isenta de conflitos. A arborização, assim como os demais componentes urbanos de uma cidade, disputa espaço físico e recursos para a sua manutenção. Exemplo disso é a convivência, nem sempre pacífica, de árvores e redes elétricas.

A concentração de atividades humanas em núcleos urbanos é motivada pela perspectiva de potencialidades econômicas, sociais e culturais. Nesses núcleos, onde oportunidades e conflitos se estabelecem, as concessionárias de energia elétrica têm seus principais mercados, prestam um serviço essencial, utilizam e disputam espaços físicos e econômicos, interferindo com o meio ambiente.

Processos de melhoria continuada para gerir e mitigar essas interferências, dentre as quais as melhorias da qualidade ambiental e da qualidade da distribuição de energia elétrica são, hoje, requisitos básicos em economias competitivas e em núcleos urbanos onde se pretende melhorar a qualidade de vida da população.

Dois conflitos são objeto de atenção das concessionárias de energia elétrica:

impactos sobre as redes elétricas – contatos de galhos com cabos nus, provocando curtos-circuitos e impondo desligamentos da rede pelo sistema de proteção; ou contatos de galhos com condutores isolados, capazes de danificá-los por abrasão;

impactos sobre a arborização – podas mutiladoras que prejudicam a estética ou as condições fito-sanitárias das árvores [2,34].

A implantação e o manejo da arborização urbana implicam em custos que são pagos, em última instância, pela população, tanto através de impostos – geridos pelas prefeituras – quanto através das tarifas de energia elétrica, as quais também remuneram as podas efetuadas a título de convivência das redes elétricas com a arborização viária.

Na literatura pesquisada não foi encontrado nenhum artigo que trate especificamente da perda de material do cabo decorrente da ação do contato de árvores. Por essa razão foi realizada uma simulação no laboratório do Departamento de Mecânica do LACTEC, que considera a ação de agentes externos sobre condutores, relatada na Seção 2 desse trabalho.

1.6 RECOMENDAÇÕES

O levantamento de informações revelou que são três as principais causas da ocorrência do rompimento em condutores, e das faltas de alta impedância: descargas atmosféricas, corrosão e contato com árvores.

Para mitigar a incidência de descargas atmosféricas, três tipos de solução são propostos. Uma primeira solução está vinculada a ações que propiciem o aumento do nível básico de isolamento (NBI), da instalação de pára-raios e de cabo guarda nas áreas de maior incidência de descargas atmosféricas. Um maior nível de isolamento pode ser obtido com a utilização de materiais isolantes como a fibra de vidro, polímeros e epóxi. O custo desses materiais tende a ser mais elevado, se comparado aos convencionais, mas em regiões de alto índice de descargas, pode ter uma relação conveniente do custo e respectivo benefício. A segunda solução sugere a atuação na localização precisa e em tempo real de descargas atmosféricas e correlação com desligamento da linha. Essa informação permite que se aplique, na região afetada, o tipo de estrutura mais apropriado, tomando por base os dados históricos da exposição às descargas. A terceira solução sugere a melhora do desempenho dos materiais dos condutores.

Para reduzir o efeito da corrosão, sugere-se uma avaliação e eventual sobre-dimensionamento dos condutores em regiões geográficas onde o efeito da corrosão é mais acentuado. Em localidades especialmente críticas, sugere-se o revestimento do cabo com material inerte à corrosão (chumbo, polímero). Linhas de distribuição que atravessam pequenas áreas com atmosfera corrosiva podem ser deslocadas destas de modo a não sofrerem o efeito da poluição. Redes instaladas na orla marítima sofrem menor efeito da corrosão, na proporção direta de sua

distância com o mar. Recomenda-se que, quando possível, os troncos principais de distribuição sejam instalados na quadra anterior àquela da orla marítima, e ramais secundários atendam as cargas situadas na orla.

Para minimizar o efeito do contato das árvores, sugere-se a realização de podas freqüentes e realizadas por mão de obra treinada, para se obter o resultado desejado e não prejudicar a estética ou as condições fito-sanitárias das árvores. Outra sugestão é pela escolha de árvores com características físicas, por exemplo, a altura, que melhor convivam com as redes de energia elétrica.

Um quarto fator de rompimento de cabos é o uso da pipa, também conhecida como papagaio, raia ou pandorga, com cerol aplicado em seu fio. O cerol é constituído por pequenos fragmentos de vidro colados na superfície de cordões usados para controlar pipas em vôo. Quando em contato com os cabos elétricos o cerol provoca, usualmente, vincos semi-circunferenciais em sua superfície. Com a ação do tempo, pode provocar o dano. Estudos dos dados relativos às duas regiões de atuação da concessionária avaliadas nesse trabalho, mostram que o aumento na incidência de rompimento de cabos, provocado pelas pipas, está relacionado com os meses de férias escolares e acontece nas periferias das cidades. Sugere-se que seja feito um trabalho de educação nas escolas, mostrando os danos que o uso do cerol nas pipas provoca, e incentivando os jovens a não adotarem essa prática.

2 CARACTERIZAÇÃO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS E FALHAS ASSOCIADAS.

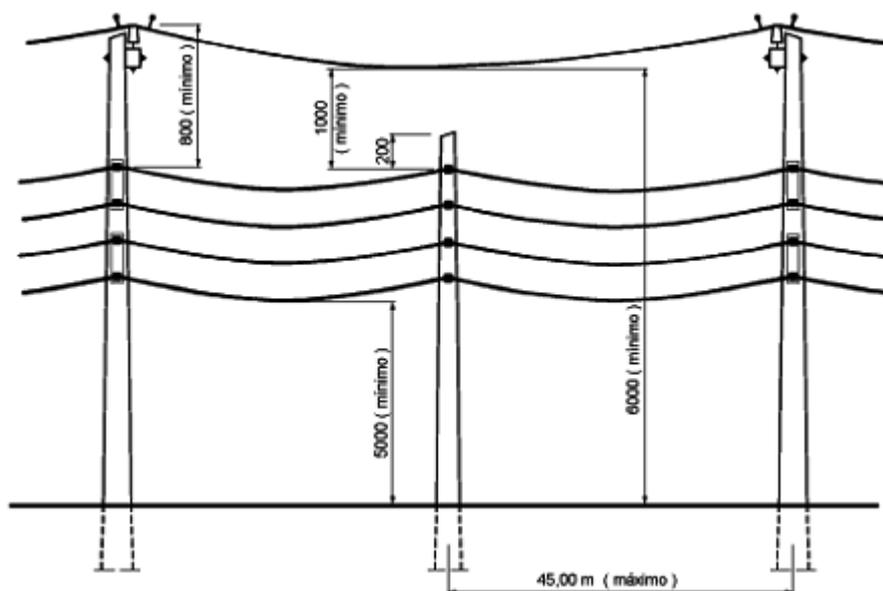
2.1 PRELIMINARES

Nesse capítulo analisam-se as características, especialmente mecânicas, do micro-sistema típico de distribuição – poste, isolador, condutor – buscando identificar como estas características podem ser empregadas para o desenvolvimento de uma metodologia que visa evitar a falha de um condutor ou monitorar sua continuidade, de modo que seja possível predizer uma falha iminente.

Estas características físicas estão relacionadas com o princípio de funcionamento desse micro-sistema e com as causas de rompimentos de condutores, discutidas na Introdução. A configuração típica de uma linha de distribuição consta da figura 3.

Os condutores em uma linha de distribuição são lançados em um vão, de um poste a outro, e acomodam-se segundo uma catenária. Por questões operacionais e de segurança é definida uma altura mínima para o ponto mais baixo da catenária, em relação ao solo. Para satisfazer esta especificação os condutores são tracionados até a altura limite. Portanto, para manter a posição especificada o condutor estará submetido a uma tensão de tração, que será função do peso específico do condutor e do tamanho do vão entre os postes. Alterações de rigidez do condutor farão com que, sob a mesma condição de fixação inicial – ou seja, mesma condição de restrição geométrica dos extremos do vão – a carga de tração se altere de forma a atender aos modelos constitutivos do material. Conseqüentemente, a configuração geométrica apresentada pelo condutor será ainda uma catenária, porém com cota mínima diferente da inicial.

FIGURA 3 - CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO; MEDIDAS VERTICAIS APRESENTADAS EM MILÍMETROS [35].



Deve-se levar em conta que a configuração geométrica também será alterada pela dilatação térmica do condutor em função da temperatura ambiente e da carga transmitida pela linha de distribuição, por efeito Joule. Portanto, o monitoramento da rigidez somente seria eficiente se fosse acompanhado do monitoramento da temperatura do condutor, para que se possa separar a influência da temperatura na alteração de rigidez por falha mecânica do condutor.

A rigidez do condutor será alterada devido à redução de seção transversal (rompimento de tentos do condutor, vincos, escoamento ou corrosão) e/ou por variação no comprimento (alongamento por fluência ou por escoamento). Podem-se identificar alguns defeitos geométricos no condutor como vincos ou *pitting*. Vincos podem ser gerados pela ação de galhos de árvores que, além da ação mecânica sobre os tentos do condutor, provocam abertura de arco elétrico, ainda que de pequena intensidade em função da impedância do complexo árvore / solo, ou pela ação abrasiva de cordões revestidos com cerol. *Pitting* pode ser originado pela ação corrosiva do meio sobre o condutor ou por uma descarga atmosférica que atingiu o condutor de forma a danificá-lo superficialmente, porém sem o rompimento de

tentos. Em qualquer dos casos, vincos ou *pitting*, ocorre uma variação de geometria que vem a ocasionar uma concentração de tensões mecânicas na região. Esta concentração será tão maior quanto mais severo for o gradiente de variação de geometria. A concentração de tensões pode ser apresentada em relação às tensões reinantes na vizinhança da região afetada através de um fator de concentração de tensões – K_t – maior que a unidade, aplicado aos valores de tensões da vizinhança. Em princípio, uma estrutura mecânica é projetada para apresentar vida infinita quanto à fadiga. Porém, materiais não ferrosos, como é o caso do alumínio, com o qual são produzidos os condutores de distribuição e transmissão, não apresentam a possibilidade de vida infinita à fadiga. A vida quanto à fadiga é função primária dos níveis de tensão reinantes no componente. As tensões, por sua vez, são função primária dos carregamentos aplicados sobre o componente, da geometria e do material do componente. Uma variação de geometria pode gerar um aumento de tensões e alterar a vida útil prevista para o componente. No caso de componentes de alumínio, como o cabo condutor, a vida útil, que de projeto já não seria infinita, será reduzida [35].

Outro fator que pode alterar a rigidez são ciclos de altas temperaturas, como o que ocorre em uma descarga atmosférica, drenada pelo condutor, sem que este se rompa. Ainda, uma conexão inadequadamente instalada pode apresentar superaquecimento e provocar tensões térmicas no condutor. Nestas situações a rigidez e o alongamento do material mudam. Logo, as deformações transversais, devidas ao efeito de Poisson, também são modificadas produzindo variações nas seções transversais deformadas sob carga. Estas modificações de seções transversais equivalem a uma concentração de tensões.

2.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DAS TENSÕES APLICADAS SOBRE UM CONDUTOR

Na Introdução mostrou-se o resultado do levantamento, que teve como objetivo determinar as principais causas de rompimentos nos cabos. Nesta parte

serão simulados os defeitos provocados pela ação dos agentes causadores dos problemas procurando avaliar, quantitativamente, sua influência sobre um condutor. Foram realizadas simulações numéricas em um tento de condutor de alumínio com quatro tipos de defeitos: vinco circunferencial, vinco semi-circunferencial, *pitting* e duplo *pitting*. Os dois primeiros seriam provenientes da ação mecânica (por exemplo, do cerol), e os dois últimos da incidência de descargas elétricas.

As simulações foram feitas com a utilização do programa ANSYS [36, 37]. O ANSYS é um programa de análise de elementos finitos que permite ao usuário a realização de uma série de trabalhos dentre os quais se destacam a construção de variados modelos computacionais; a simulação de aplicação de cargas dinâmicas em estruturas; a otimização de projetos em sua fase de concepção de modo a reduzir custos de produção; a realização de testes em protótipos para aplicação em ambientes especialmente críticos, como por exemplo o interior do corpo humano; o estudo de resposta a agentes físicos como distribuição de temperatura, campos eletromagnéticos e tensões mecânicas. Estas últimas foram objeto de análise no presente estudo.

A simulação foi feita com a utilização do módulo ANSYS, intitulado ANSYS Multiphysics versão 5.5.1, e é composta, resumidamente, por quatro fases. Na primeira, definiu-se o problema que, nesse caso, é a determinação do fator de concentração de tensões em um tento de cabo elétrico, ou fator K_t . Na segunda, denominada de pré-processamento, definiu-se a geometria da peça sob análise; o material e suas propriedades (composição, módulo de Young, etc.); o tipo de elemento, ou seja, a unidade geométrica básica que subdivide a área sob análise (em triângulos, em retângulos, etc.) e a malha da geometria, composta pelo conjunto de unidades geométricas. Na terceira, é realizado o processamento. Na última, chamada de pós-processamento, os resultados são obtidos e analisados. Como resultado da aplicação do ANSYS, determina-se o fator K_t , fator de concentração de tensões na região sob análise, que é obtido pela razão entre a tensão máxima no defeito geométrico e a tensão nominal na vizinhança, suficientemente afastada do defeito. A figura 4 e a figura 5 mostram alguns dos resultados obtidos. Para os

defeitos analisados, tem-se o seguinte, onde as tensões mecânicas estão expressas em pascal [35].

Para o caso de vinco semi-circunferencial, o fator de concentração de tensões sob tração axial (figura 4) é:

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,222E09}{0,487E08} = 4,55$$

Para o caso de *pitting*, o fator de concentração de tensões sob tração axial é:

Tensões axiais sob tração axial (figura 5)

$$K_t = \frac{\text{Tensão máxima}}{\text{Tensão nominal}} = \frac{0,111E09}{0,559E08} = 1,98$$

Como se pode observar pelos resultados, as tensões podem ser até quatro e meia vezes maiores do que seriam, se não houvesse defeitos geométricos. O processo de fadiga também pode ser acelerado quando da ocorrência de defeitos geométricos, podendo ocorrer uma falha por ruptura do condutor algum tempo depois de nucleado o defeito geométrico. Ou seja, uma árvore pode, em certo momento, nuclear um defeito geométrico com a característica de vinco no condutor. Essa mesma árvore pode ser podada e, algum tempo depois, o condutor sofrer ruptura naquele defeito nucleado, o que dificulta sobremaneira a identificação da causa do defeito.

FIGURA 4 - TENSÕES AXIAIS SOB CARGA DE TRAÇÃO AXIAL COM VINCO SEMI-CIRCUNFERENCIAL (TENSÕES EXPRESSAS EM PASCAL SENDO QUE A REGIÃO DE MÁXIMA TENSÃO ESTÁ IDENTIFICADA PELA COR VERMELHA)

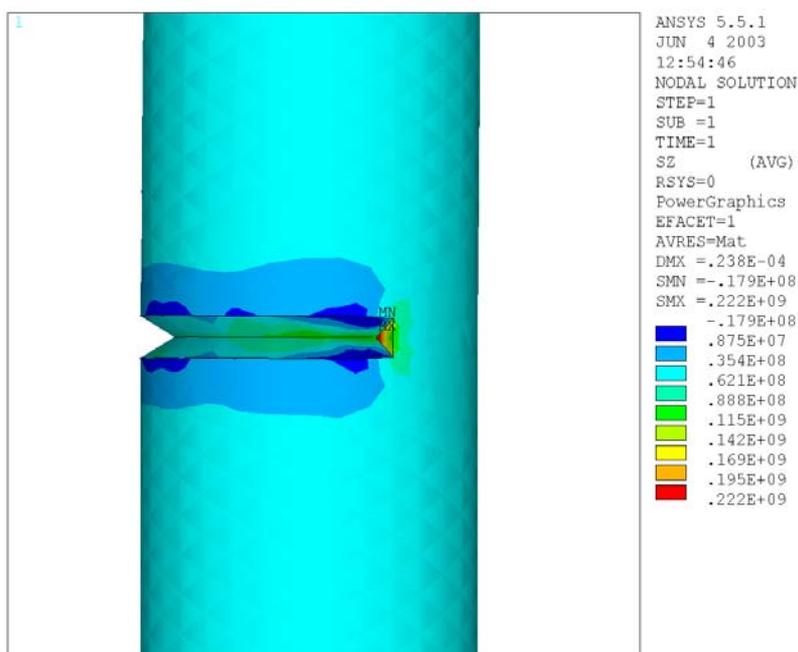
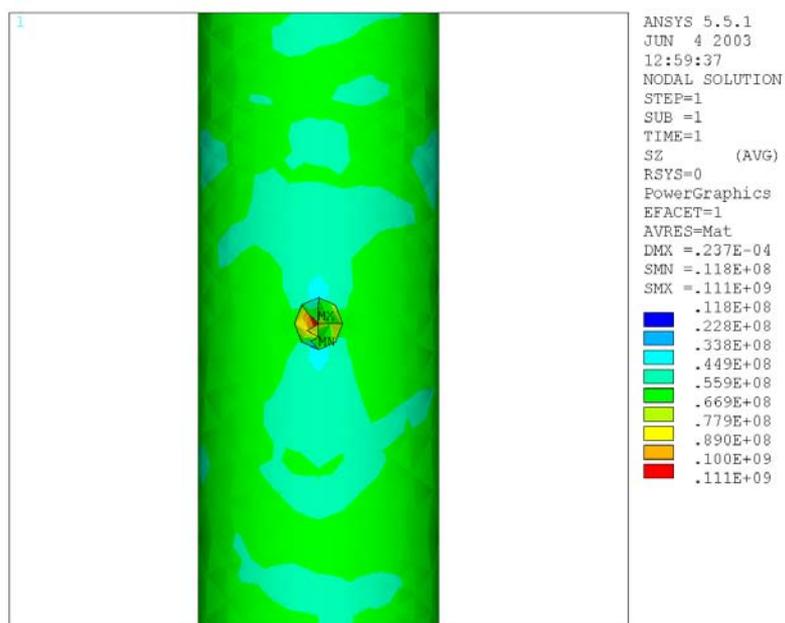


FIGURA 5 - TENSÕES AXIAIS SOB TRAÇÃO AXIAL COM *PITTING* (TENSÕES EXPRESSAS EM PASCAL SENDO QUE A REGIÃO DE MÁXIMA TENSÃO ESTÁ IDENTIFICADA PELA COR VERMELHA)



2.3 TESTES E RESULTADOS

O rompimento de um ou mais tentos de um condutor pode ocorrer, entre outros fatores, por ação mecânica de galhos de árvores, por ação abrasiva do cerol aplicado em pipas e por descargas atmosféricas. Estes eventos não necessariamente causarão dano imediato ao condutor. O rompimento de tentos do cabo aumenta a solicitação mecânica e térmica sobre o condutor, de modo que propriedades mecânicas venham a ser alteradas ao longo do tempo. Destas propriedades cabe citar as características mecânicas do material, como a fluência, que podem ter seus parâmetros afetados, bem como a vida à fadiga, que poderá ser encurtada em função do aumento da solicitação estática e dinâmica sobre o condutor.

O rompimento do cabo pode acontecer por um único golpe, por cisalhamento, por exemplo, ou ser gradual com o rompimento individual, tento a tento. Nos condutores de redes de distribuição é possível que uma parcela dos cabos se danifique por um processo de perda gradual dos tentos. Como não foi possível a localização de informações nesse sentido, um trabalho foi realizado no laboratório de cabos do LACTEC, no qual foram condicionados condutores em quatro diferentes situações: Um condutor íntegro; com um tento rompido; com dois tentos rompidos; e com três tentos rompidos. Em cada situação foram ensaiadas três amostras [38]. Os ensaios foram realizados na bancada de ensaios do LACTEC cuja foto está apresentada na figura 6, com cabo Íris 2 AWG cujas características constam da tabela 1. Convém ressaltar que uma parcela significativa dos cabos usados em redes de distribuição é da bitola 2 AWG. A tabela 1 mostra dois valores relativos à ampacidade. O primeiro corresponde a uma condição sem a presença de vento e com sol. Para o segundo é considerada a presença de ventos de 2,2 km/hora a 25 °C, com sol.

TABELA 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS CABOS DE ALUMÍNIO SEGUNDO A NBR 7271

Nome	Bitola	Seção	Formação	Diâmetro do Fio	Diâmetro Nominal do Cabo	Resistência Elétrica a 20°	Massa Nominal	Relação	Ampacidade	
	AWG	(mm ²)	(nºfios)	(mm)	(mm)	(Ω / km)	(kg/km)	(m)	(A) ¹	(A) ²
Iris	2	33,54	7	2,47	7,41	0,8535	91,8	10,90	110	185

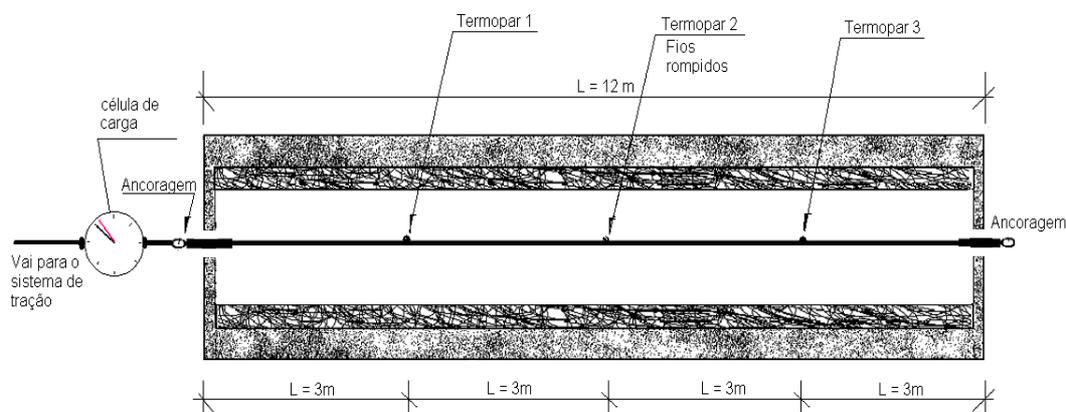
FIGURA 6 - BANCADA DE ENSAIO DE CABOS DO LACTEC



Os cabos, de 12m de comprimento, foram fixados nas duas extremidades, aplicando-se uma carga de 1,41 kN, correspondendo a 25% da carga nominal de ruptura que é de 5,64 kN [39]. A carga aplicada a um cabo em uma linha de distribuição é, usualmente, de 10 a 15% do valor nominal.

Os cabos foram instrumentados com três termopares, sendo um no local onde foi cortado o tento do cabo e os outros dois a cerca de 3 m do primeiro, como pode ser observado na figura 7.

FIGURA 7- ARRANJO PARA O ENSAIO DO CONDUTOR IRIS NA BANCADA DE CABOS



Foi aplicada uma corrente de 175 A e, após estabilização da temperatura, um, dois ou três tentos foram cortados, observando-se o resultado que consta da tabela 2, da figura 8 e da figura 9 [40]. A seguir os cabos foram submetidos à tração até atingir o ponto de ruptura e os resultados são apresentados na tabela 2.

A avaliação dos resultados dos testes permite concluir que defeitos que levem à diminuição da seção do condutor reduzem, naturalmente, a resistência mecânica do cabo. Como um condutor é lançado sob uma tração que é uma fração da capacidade máxima do cabo, o rompimento de tentos, se não levar ao colapso imediato do cabo, coloca-o em uma condição de operação com menor nível de segurança mecânica e folga operacional. Ainda, uma redução de seção eleva a temperatura localizadamente, em função do aumento da densidade de corrente, fazendo com que se crie uma heterogeneidade de comportamento mecânico do material. O material poderá apresentar características de fluência e fadiga em uma região localizada do condutor. Este aspecto poderá levar um condutor, mesmo com tração inferior ao limite, a uma falha por fadiga termo-mecânica.

TABELA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS DE UM CABO SEM DEFEITO, E DO MESMO CABO COM 1, 2 OU 3 TENTOS ROMPIDOS

	Cabo sem defeito	Um tento rompido	Dois tentos rompidos	Três tentos rompidos
Redução de área (%)	0,00	14,29	28,57	42,86
Temperatura máxima na seção rompida (°C)	72,00	73,47	81,29	90,34
Carga de ruptura. Média de três amostras (kN)	6,30	5,29	4,31	3,31
Desvio padrão de três amostras	0,14	0,21	0,06	0,17
Redução da carga de ruptura (%)	0,00	16,03	31,59	47,46

FIGURA 8 - GRÁFICO QUE APRESENTA A VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CABO COM A PERDA DE TENTOS

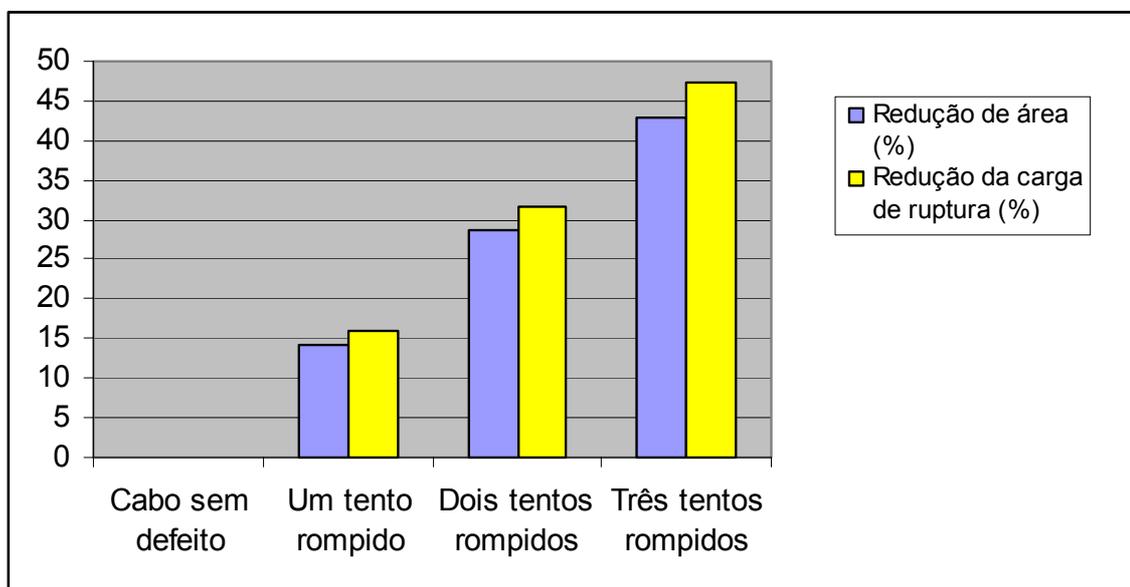
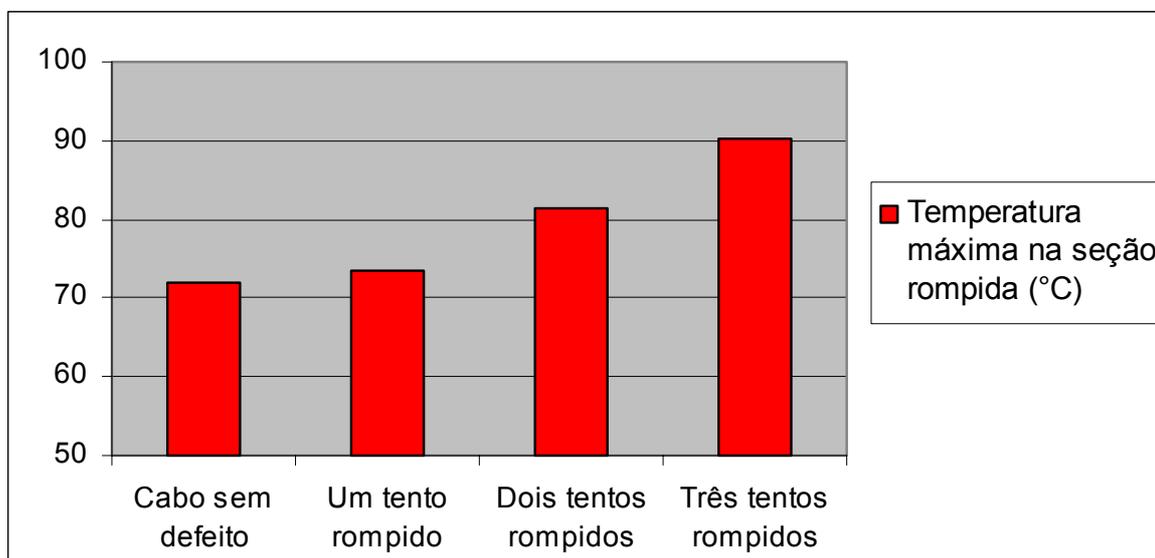


FIGURA 9 - GRÁFICO QUE APRESENTA A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO CABO NA REGIÃO DOS TENTOS ROMPIDOS



3 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO LABORATÓRIO EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO VOLTADO AO ESTUDO DO ROMPIMENTO DE CONDUTORES

3.1 PRELIMINARES

A pesquisa e desenvolvimento de soluções visando o aumento da segurança operacional de linhas de distribuição, particularmente quanto à falhas em condutores, requer capacidade de experimentação em laboratório para o completo entendimento dos fenômenos envolvidos no processo, e para a validação de técnicas ou metodologias para a solução do problema. Um laboratório típico de ensaios em baixa e média tensão é, usualmente, limitado e não contempla situações que abrangem os agentes agressores aos quais os condutores de distribuição são expostos. Logo, um laboratório construído a partir de uma linha experimental de distribuição, empregando elementos convencionais de construção, além de todo o aparato necessário para a execução e avaliação de testes, tende a permitir um maior domínio do problema e a simulação de situações reais de operação.

Neste sentido, foi desenvolvido um projeto para o laboratório de rede experimental de distribuição, seguindo os padrões construtivos e de operação normalizados por concessionárias brasileiras. O laboratório foi projetado para operar com tensão nominal e corrente nominal, porém com baixa potência.

Esse laboratório foi projetado e construído especialmente sob a égide do presente trabalho de tese, e conta com características absolutamente peculiares, das quais não se conhece um paralelo no Brasil. Permite a análise do desempenho de redes de distribuição em condições muito aproximadas das reais, tendo em vista sua semelhança com tais redes, incluindo sua instalação ao tempo, portanto desabrigado, da mesma forma como ocorre com as redes urbanas. A instalação física é a mesma das redes urbanas, mantendo os mesmos patamares de distância entre postes. A angulação na linha pode variar desde grau zero até o limite permitido pela legislação; são instalados os mesmos acessórios de uma rede convencional como postes, cruzetas, isoladores, cabos, conexões, etc. A fonte de tensão proporciona as tensões nominais previstas nas normas, permitindo que sejam realizados variados testes de isolamento elétrico. A fonte de corrente propicia correntes de até aproximadamente 400 A, para condução de testes relacionados a aspectos térmicos. Os sinais são aquisitados em uma casa de comando, construída ao lado da rede experimental, a partir da qual se faz o acompanhamento dos testes. O projeto da rede permite a realização de uma série de testes, com elevado grau de flexibilidade e liberdade [41].

3.2 CARACTERÍSTICAS DO LABORATÓRIO EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO.

3.2.1 Disposição física.

O laboratório foi construído nas instalações do LACTEC/LEME (Laboratório de Emissões Veiculares). O comprimento da rede é de 108 m. No vão central foi instalado um poste móvel, fixado sobre uma base de modo a ser possível deslocá-lo para permitir a variação dos comprimentos de vão bem como produzir uma montagem com angulação de até 40°, como pode ser observado na seqüência que

vai desde a figura 10 até a figura 20. O poste móvel foi fundido sobre um bloco de concreto apoiado sobre rodas que correm em trilhos, permitindo que o vão possa ter seu comprimento alterado no intervalo de 35 a 100 m, ou deslocando-o a 90° de modo a permitir a angulação da rede. Os acessórios utilizados na instalação da rede são aqueles que constam das normas das principais concessionárias brasileiras, que determinam os tipos de equipamentos a serem aplicados em projetos de redes urbanas de distribuição [42].

3.2.2 Projeto Elétrico

A potência requerida para simular os efeitos simultâneos da tensão e da corrente numa linha experimental, em condições controladas, é muito elevada. Para uma alimentação monofásica com tensão de $13,8/\sqrt{3}$ kV e corrente da ordem de 200 A, seriam necessários aproximados 1,6 MVA, potência muito elevada para os recursos disponíveis para esse trabalho [43].

Para contornar este problema, a solução adotada foi a de projetar um laboratório que realizasse testes com aplicação de tensão e de corrente, mas não simultaneamente. Dessa forma foi dimensionada uma fonte de tensão, para realização de testes dos aspectos relacionados com o isolamento elétrico [35, 43]. Foi, também, projetada uma fonte controlada de corrente para os testes relacionados com a corrente alternada, como por exemplo, aquecimento, ciclos térmicos, propriedades mecânicas, etc.

Para viabilizar a realização de testes de aquecimento, um sistema de controle de temperatura foi projetado, de modo a medir e manter a temperatura do cabo dentro de um valor escolhido. Um sensor de temperatura (termopar), fixado no cabo sob teste (figura 13), atua sobre um controlador que, por sua vez, atua sobre a fonte variável de tensão que alimenta a corrente aplicada ao circuito.

A fonte de corrente foi construída a partir de um núcleo de transformador de distribuição de 112,5 kVA, 13,2 kV / 220 - 127 V. Após remoção do enrolamento original, a unidade central foi enrolada com um primário (N1) e dois secundários (N2-a e N2-b) com as seguintes características:

Enrolamento N1 com 49 espiras de cabo flexível de 16 mm², classe 750 V, corrente de entrada: ≤ 40 A;

Enrolamento N2 – a: 8 espiras de cabo de cobre flexível de 120 mm². Corrente de saída: 0 a 200 A;

Enrolamento N2 – b: 4 espiras de cabo de cobre flexível de 240 mm². Corrente de saída: 0 a 400 A.

Este transformador é alimentado por um auto-transformador de relação variável, com controle motorizado, do modelo Variac de 20 kVA, tipo VRME-20, n° STP – 007. Entrada: 220 V; saída: 0 a 240 V, isolado a óleo.

Para fornecer a tensão necessária às simulações de fenômenos com alta tensão em corrente alternada, foi especificado e adquirido um transformador elevador para uso externo, em poste, conforme normas NBR 5356, NBR 5380 e NTC 810027. Esse transformador é utilizado como fonte de tensão fase-terra, tendo apenas uma bucha no lado de alta tensão. O transformador, portanto, é alimentado pelos terminais de baixa tensão. Possui as seguintes características básicas:

Potência: 30 kVA, com comutador para ser operado sem carga, de acionamento externo.

A tensão primária é de 440 V e as tensões secundárias são $14500/\sqrt{3}$ V, $13500/\sqrt{3}$ V e $12500/\sqrt{3}$ V [35 e 43].

3.2.3 Características da Casa de Controle

A casa de controle tem a finalidade de abrigar a instrumentação necessária para a operação do laboratório, como o Variac, o transformador de corrente, os demais equipamentos de medição, controle e aquisição de sinal. Foi construída em alvenaria, nas dimensões de 6 m x 4 m, com altura de 2,5 m, com piso cerâmico e sistema apropriado de aterramento com três eletrodos do tipo Copperweld com dimensões de 2,4 m x 1/2". Contém, ainda, telas de proteção dos equipamentos. A parte que diz respeito à construção civil usa elementos usuais construtivos para esse tipo de instalação [43, 44].

3.3 TESTES E RESULTADOS

Foram realizados ensaios preliminares nos circuitos de tensão e de corrente no laboratório experimental.

O teste no circuito de tensão consistiu em se aplicar uma tensão conhecida no secundário do transformador elevador, e medir no primário. Como instrumentos de medição, foram utilizados um multímetro digital calibrado e um divisor capacitivo, usado para medição da tensão no secundário e mostrado na figura 20. A alimentação foi feita desde a sala de controle, pelo módulo de controle, circuito de 440 V. O valor da tensão aplicada foi de 418,7 V e a tensão obtida na fase ligada ao enrolamento de alta tensão do transformador foi de 7,95 kV. Os resultados confirmam que a relação de transformação está correta. Confirmam, também que o isolamento elétrico da rede suportou a tensão a ela aplicada.

O teste no circuito de corrente consistiu em injetar na linha uma corrente elétrica de modo que a temperatura, num determinado ponto do condutor, se mantivesse em aproximadamente 50°C.

Nesse caso, os ajustes na entrada do transformador de corrente ficaram em 160 V/29 A e, na saída, de 28,7 V/165,4 A. Com a injeção de 165,4 A no cabo, verificou-se que a temperatura oscilou entre 48°C e 52°C, atendendo os requisitos esperados. Vide figura 19 que mostra o transformador de corrente e a fonte de tensão. O dia estava nublado, vento fraco e temperatura ambiente de aproximadamente 24°C.

Não se tem conhecimento, através da literatura nacional e internacional, da existência de um laboratório para estudo de redes de distribuição semelhante ao construído sob a égide deste trabalho de tese. De modo a caracterizar e proteger esse ineditismo foi depositado um pedido de patente junto ao INPI, no dia 11/10/2005, sob o número PI0504175-9 com o título “Rede experimental de distribuição de energia elétrica”.

FIGURA 11- FOTO COM VISTA GERAL DO LABORATÓRIO



FIGURA 12 - FOTO DO POSTE SUPORTANDO O TRANSFORMADOR DE TENSÃO



FIGURA 13 – FOTO COM DETALHE DO TERMOPAR PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NO CONDUTOR. ENSAIO COM CORRENTE, SEM TENSÃO NOMINAL.

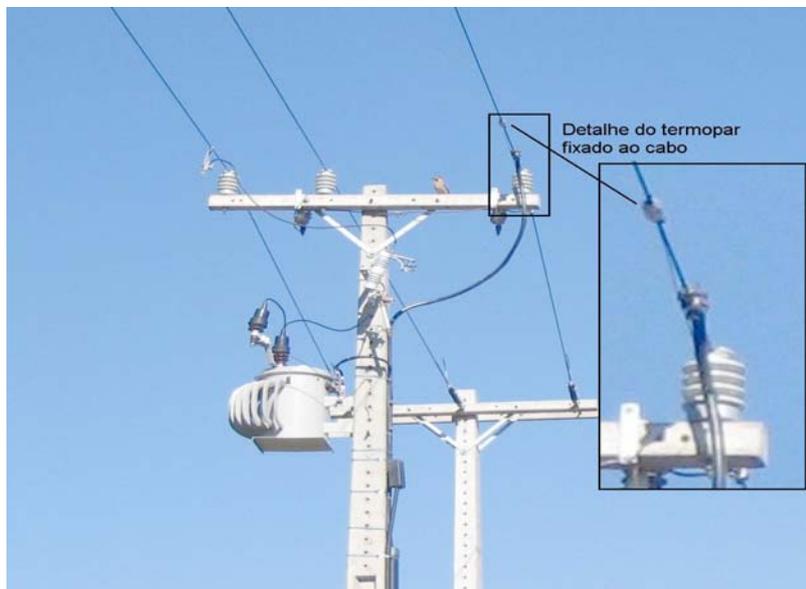


FIGURA 14 - FOTO DO POSTE QUE SE APÓIA SOBRE RODAS E PODE TER SUA POSIÇÃO ALTERADA AXIALMENTE OU TRANSVERSALMENTE



FIGURA 15 - FOTO DO LABORATÓRIO EM CONSTRUÇÃO. DETALHE DA OBRA CIVIL DO CONJUNTO DE TRILHOS.



FIGURA 16 - FOTO DO CARRO DE APOIO PARA O POSTE MÓVEL



FIGURA 17 - FOTO DA CASA DE CONTROLE COM A FONTE DE CORRENTE E OS DISPOSITIVOS DE COMANDO E PROTEÇÃO



FIGURA 18 - FOTO DO PAINEL CONTENDO OS DISPOSITIVOS DE COMANDO E PROTEÇÃO

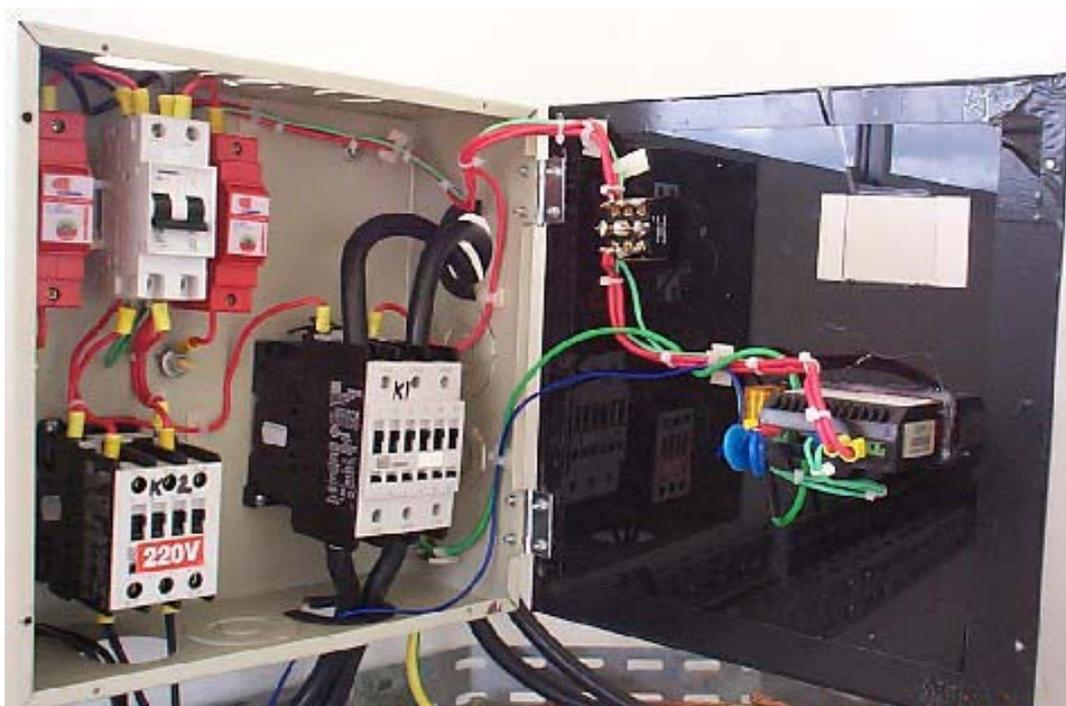


FIGURA 19 - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE CORRENTE CONTROLADA. À ESQUERDA, IMAGEM DO TRANSFORMADOR E À DIREITA, IMAGEM DO VARIAC.



FIGURA 20 - FOTO DO DIVISOR CAPACITIVO APLICADO NO TESTE DO CIRCUITO DE 13 KV DO LABORATÓRIO



4 SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ORIGINADAS POR ROMPIMENTO DE CABOS

4.1 PRELIMINARES

Quando ocorre rompimento de condutores de alta tensão, sua queda provoca contato deficiente com o solo, provocando uma FAI. Em terrenos de alta resistividade, os valores de corrente fase-terra estabelecidos desta forma são limitados pelo elevado valor da resistência de aterramento que se estabelece no ponto de contato entre o condutor e o solo. Mesmo em terrenos argilosos, as correntes de falta resultantes normalmente acabam sendo inferiores à corrente nominal do circuito faltoso. Assim, as proteções usuais, instaladas na subestação fonte, não conseguem detectá-las adequadamente como correntes de falta.

A detecção deste tipo de falta é tanto mais difícil quanto menor for o nível de tensão do circuito. Na classe de 15 kV vários métodos têm sido empregados.

Pelas razões acima expostas, a detecção de FAIs em alimentadores a partir da própria subestação, por meio de análise de sinais (ruídos) que acompanham estes eventos, até o momento se mostrou ineficiente. Apesar do enorme desenvolvimento das técnicas digitais de reconhecimento de sinais, que empregam algoritmos baseados, por exemplo, em inteligência artificial, lógica *fuzzy*, etc.; problemas relacionados com a variabilidade do fenômeno e com a sensibilidade requerida têm comprometido o sucesso destas técnicas na identificação de FAIs a partir dos sinais da instrumentação (convencional ou especial) instalada na subestação.

Várias grandezas elétricas podem ser utilizadas na identificação de FAIs (campo elétrico, campo magnético, desequilíbrio de tensões e correntes, por exemplo). O sistema aqui proposto usa grandezas elétricas simples, basicamente os módulos e ângulos das correntes do alimentador.

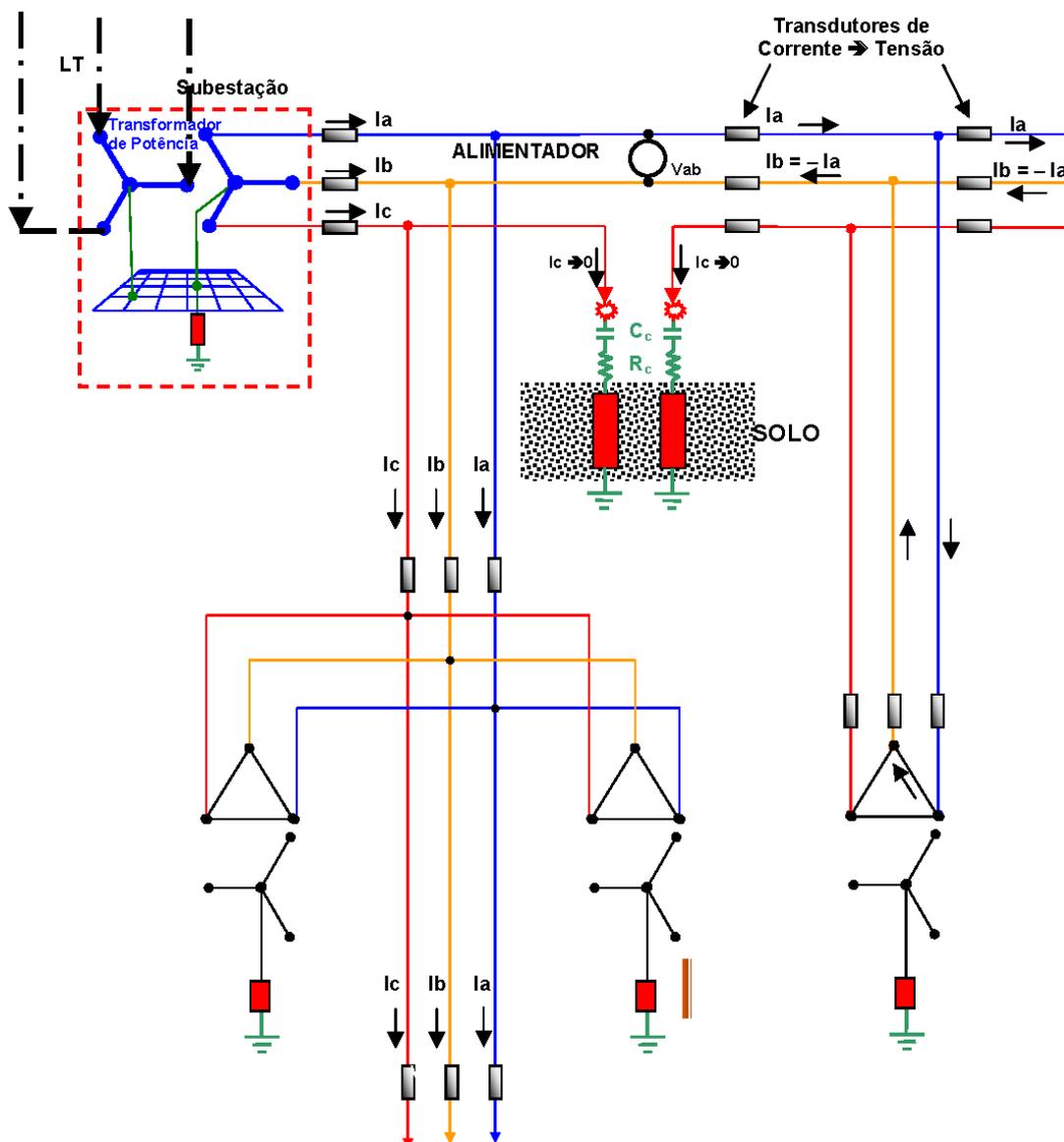
Optou-se pelos sinais de corrente para identificar FAIs, para aproveitar a experiência que o LACTEC adquiriu em trabalhos de detecção de faltas (curtos-circuitos), tendo já desenvolvido transdutores de corrente (sensores) que operam expostos ao tempo, em circuitos de alta tensão, e são dotados de sistema de comunicação por meio de rádio.

Nas redes de distribuição analisadas nesse trabalho, as fases dos alimentadores são ligadas em estrela, na saída da subestação (fonte), e os transformadores de distribuição (carga) têm o primário ligado em triângulo, como pode ser observado na figura 21. A figura mostra um conjunto composto por um alimentador primário que alimenta diversos transformadores de distribuição, além da representação da ocorrência de uma interrupção em um condutor. Mostra, também, os três sensores que detectam a mudança no ângulo entre as correntes, identificando quando há interrupção de um dos condutores.

Na figura 21, a corrente I_c é interrompida e, por conseqüência, as correntes da carga passam a ser I_a e I_b , iguais em módulo, porém de sentido oposto, mudança detectada pelos sensores.

Quando, após o rompimento do condutor, ocorre um contato com o solo, a característica da corrente remanescente I_c pode variar de acordo com a impedância de contato com o solo, normalmente caracterizada pela presença de cargas resistivas e capacitivas.

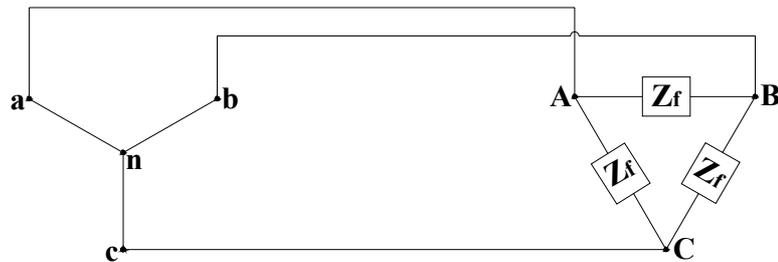
FIGURA 21 – DESENHO CONTENDO OS DIAGRAMAS DE LIGAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA. A TENSÃO DA FONTE DOS ALIMENTADORES, LIGADOS EM ESTRELA, É DE 13,8 KV E AS TENSÕES DAS CARGAS, LIGADAS EM TRIÂNGULO, SÃO DE 220/127 V.



A figura 22 reproduz o circuito elétrico similar ao que se está estudando. Apresenta um sistema trifásico, equilibrado, com a fonte ligada em estrela, e as cargas ligadas em triângulo, representadas pela impedância Z_f . A seguir são tecidas considerações a respeito das tensões, das correntes e do diagrama fasorial

para o respectivo circuito [45].

FIGURA 22 - SISTEMA TRIFÁSICO EQUILIBRADO COM A FONTE LIGADA EM ESTRELA E A CARGA LIGADA EM TRIÂNGULO [45].



As tensões de linha (tensões entre linhas) são:

$$V_L = |\mathbf{V}_{ab}| = |\mathbf{V}_{bc}| = |\mathbf{V}_{ca}|$$

As tensões de fase são:

$$V_f = |\mathbf{V}_{an}| = |\mathbf{V}_{bn}| = |\mathbf{V}_{cn}|$$

Onde

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_f$$

Por exemplo, uma das tensões de linha, fica:

$$\mathbf{V}_{ab} = \sqrt{3} \cdot \mathbf{V}_{an} \angle 30^\circ$$

Como a tensão em cada ramo da ligação em triângulo é conhecida, as correntes de fase são obtidas, de modo que:

$$\mathbf{I}_{AB} = \frac{\mathbf{V}_{ab}}{\mathbf{Z}_f}$$

$$\mathbf{I}_{BC} = \frac{\mathbf{V}_{bc}}{\mathbf{Z}_f}$$

$$\mathbf{I}_{CA} = \frac{\mathbf{V}_{ca}}{\mathbf{Z}_f}$$

A diferença entre as correntes de fase fornece o valor das correntes de linha:

$$\mathbf{I}_{aA} = \mathbf{I}_{AB} - \mathbf{I}_{CA}$$

As três correntes de fase seriam de igual magnitude,

$$I_f = |I_{AB}| = |I_{BC}| = |I_{CA}|$$

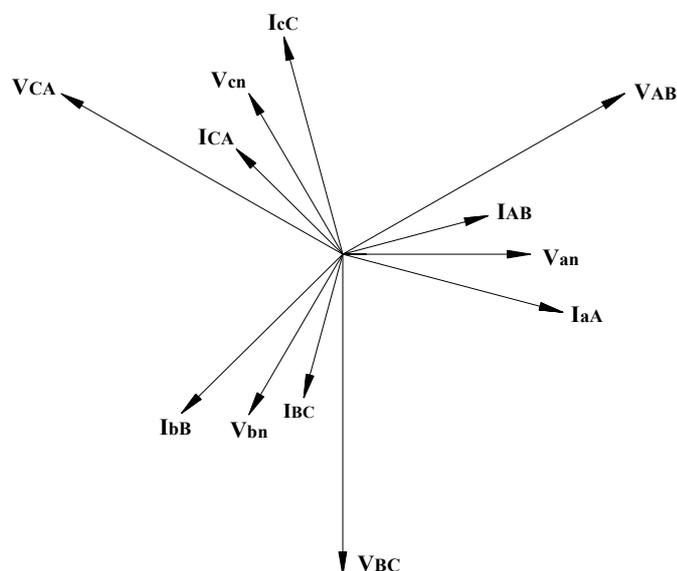
As três correntes de linha também seriam de igual magnitude e com defasamento de 120° entre si como pode ser observado no diagrama fasorial, com seqüência positiva de fases, mostrado na figura 23. Dessa forma,

$$I_L = |I_{aA}| = |I_{bB}| = |I_{cC}|$$

e

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f$$

FIGURA 23 - DIAGRAMA FASORIAL CORRESPONDENTE AO CIRCUITO DA FIGURA 23

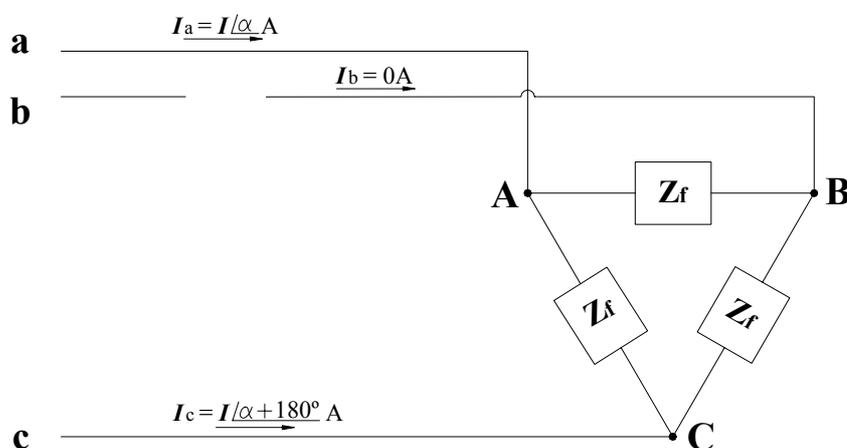


Se um dos condutores da linha trifásica estiver aberto, como ocorreria no caso do rompimento de um dos condutores de uma rede de distribuição, a alimentação da carga passará a ter uma característica bifásica, com a respectiva alteração nas correntes. Dessa forma, as correntes de linha passarão a ser [46]:

$$I_a = I \angle \alpha \text{ A} \quad I_c = I \angle \alpha + 180^\circ \text{ A} \quad I_b = 0 \text{ A}$$

Nesse caso as correntes das fases sãs serão iguais em módulo, porém defasadas de aproximadamente 180° entre si, e não mais de 120° como em condição normal, como mostrado na figura 24.

FIGURA 24 - DESENHO MOSTRANDO A ALIMENTAÇÃO DE UMA CARGA LIGADA EM TRIÂNGULO, COM UMA DAS FASES INTERROMPIDAS [46]



Outro aspecto conhecido destes eventos é o aparecimento de uma corrente errática, na fase onde ocorreu a falta, de valor baixo, com componentes de alta frequência, oscilando de acordo com as indutâncias e capacitâncias do circuito. Centelhamento no ponto de contato com o solo é possível, dadas às características do contato deficiente e mutável que se estabelece com o solo [47].

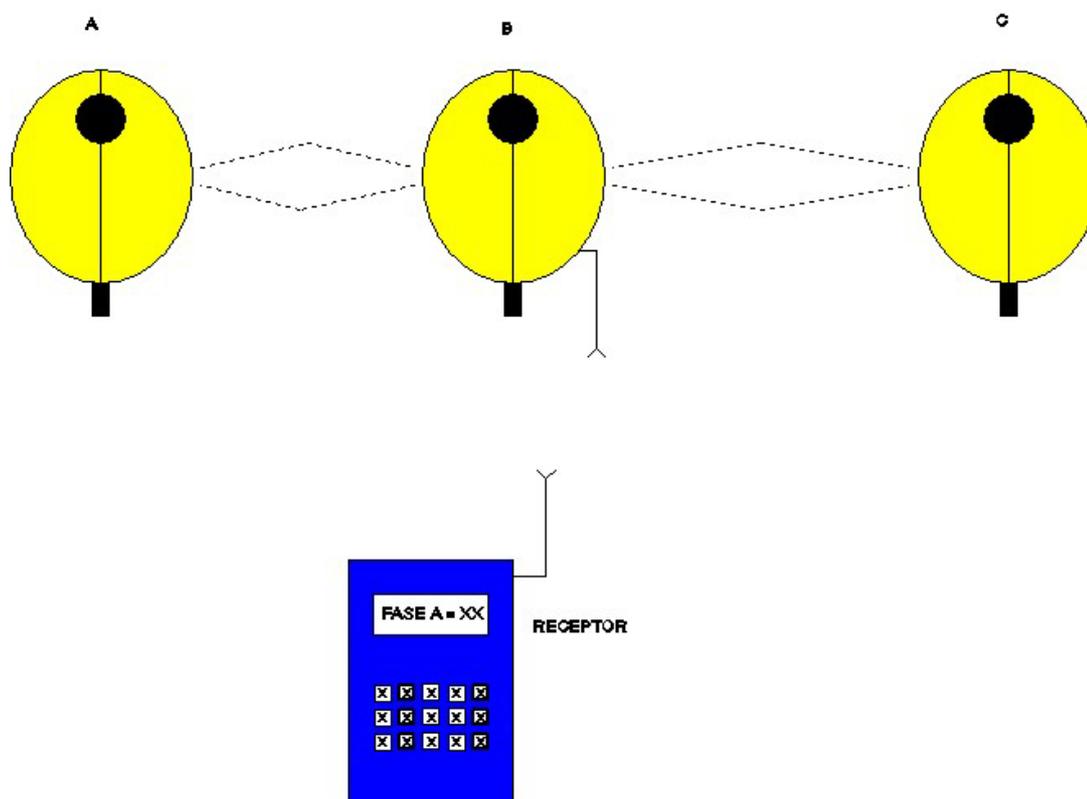
4.2 SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

O sensor de corrente utilizado foi desenvolvido a partir de um encapsulamento mecânico de aplicação geral, podendo ser utilizado como sensor de corrente, tensão, temperatura, detector e registrador de faltas, além de processar e sinalizar eventos em linhas de média tensão. Trata-se de um desenvolvimento que teve início, no LACTEC, anteriormente ao presente trabalho de tese, na busca de um dispositivo que permitisse medir e registrar corrente nas três fases de uma linha de distribuição, e já resultou no protótipo de um conjunto de sensores para medição de corrente em linhas aéreas de 13,8 kV e 34,5 kV. A utilização desses sensores na detecção de rompimento de condutores elétricos, no entanto, é inédita.

O conjunto é composto por três sensores sendo um deles instalado em cada fase do circuito de distribuição. Os sensores detectam a defasagem angular entre as correntes trifásicas que circulam pelo alimentador. Um sensor principal, localizado entre os outros dois, recebe informações dos sensores laterais, e as armazena, segundo ilustra a figura 25. Essas informações são adquiridas em intervalos que variam desde cinco segundos até uma hora, dependendo da necessidade e respectiva programação. São, então, transferidas através de rádio para uma unidade receptora e de aquisição de dados.

FIGURA 25 - CONJUNTO COMPOSTO PELOS TRÊS SENSORES E PELA UNIDADE RECEPTORA

[47]



4.3 TESTES E RESULTADOS

Os testes foram realizados em duas etapas.

A primeira etapa teve a finalidade de validar a proposta da utilização de projetos de sensores anteriormente desenvolvidos no LACTEC, utilizando-os como elementos de detecção de rompimento de cabos elétricos. Foi, então, construído um sensor, que é mostrado na figura 26, que foi ajustado e testado em bancada de laboratório e, posteriormente, na rede experimental. O teste na rede experimental mostrou que o sensor reconhece a presença da corrente elétrica que circula pelo condutor. Utilizando os recursos da rede experimental, que conta com uma fonte variável de corrente, a magnitude da corrente elétrica que circula pelo sensor foi, periodicamente, alterada com objetivo de verificar a resposta do sensor a tais alterações. Tanto a corrente como as respectivas alterações foram reconhecidas

pelo sensor. A figura 27 e a figura 28 mostram a instalação do sensor no laboratório experimental. O sensor é dotado de um sistema de transmissão de sinal que envia, por rádio, à distância de até 500 metros, o sinal captado pelo sensor até a casa de controle. O sinal transmitido é adquirido em um PC, dotado de um programa desenvolvido pelo LACTEC para tal finalidade.

O conjunto foi monitorado por um período de aproximadamente três semanas e os resultados validaram a proposta do monitoramento do sinal de corrente por meio de sensores. A figura 29 mostra a tela do PC no momento em que se realizava, em tempo real, a leitura da corrente da ordem de 85 ampères.

FIGURA 26 - FOTO DO SENSOR COM ANTENA DE TRANSMISSÃO



FIGURA 27 - FOTO DA INSTALAÇÃO DO SENSOR NA REDE EXPERIMENTAL



FIGURA 28 - FOTO DO SENSOR INSTALADO NA REDE EXPERIMENTAL

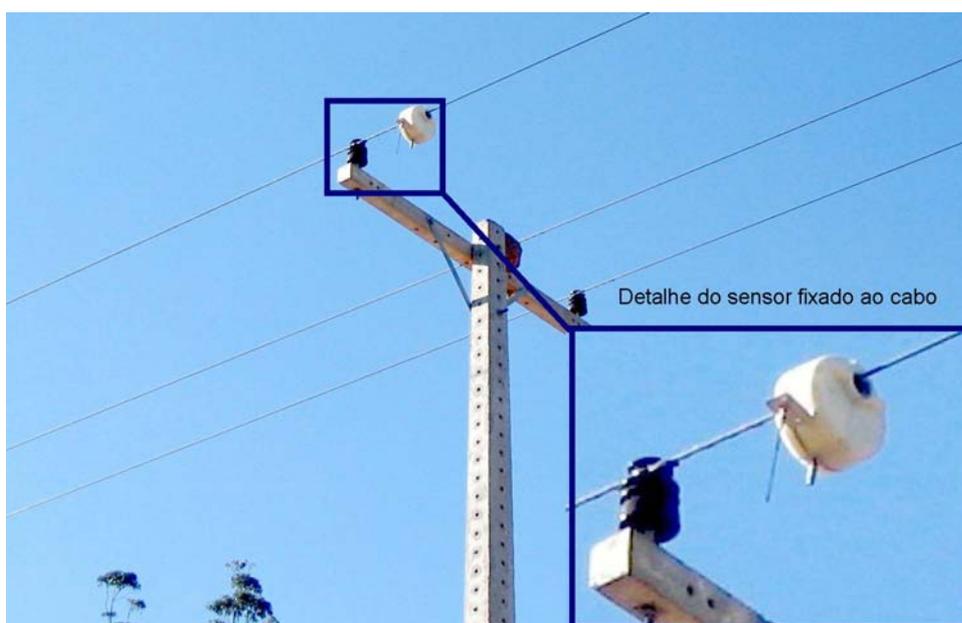
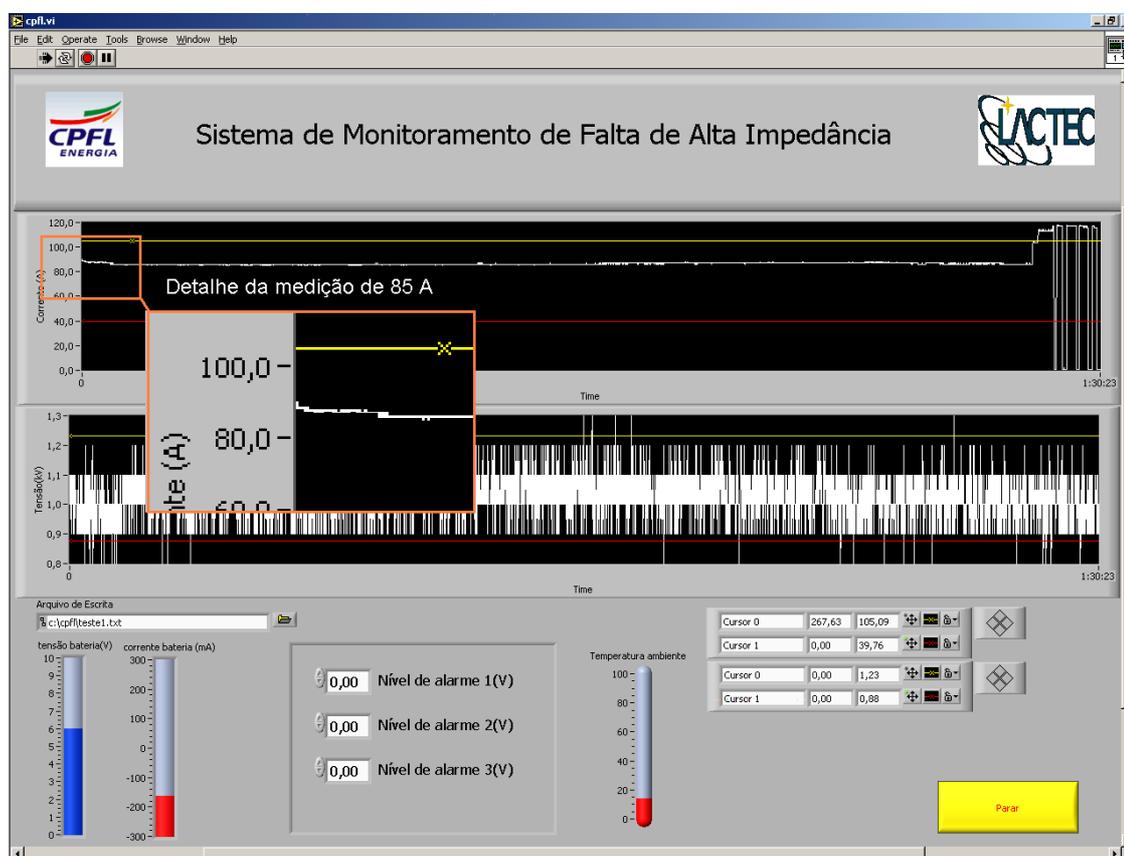


FIGURA 29 - FOTO DA INDICAÇÃO DA CORRENTE NA TELA DO MONITOR



Na primeira etapa foi testado um único sensor. Na segunda etapa construíram-se três sensores a partir da experiência e resultados da etapa anterior. Essas unidades foram testadas em bancada, em um circuito trifásico. O teste consistiu em monitorar as correntes elétricas em um circuito trifásico operando em duas situações: em condição normal e em condição de FAI induzida. Para a realização do testes foi montada uma bancada no Laboratório de Baixa Tensão do LACTEC, constituída de três fontes de tensão monofásica, caracterizando uma alimentação trifásica, alimentando uma carga de baixa impedância, permitindo, dessa forma, a circulação de correntes de valor próximo àquelas dos circuitos reais e controladas através da variação na tensão das fontes monofásicas. As FAIs são provocadas pela interrupção do circuito, feita através da abertura de chaves do tipo faca que também são parte do arranjo físico, como pode ser observado na figura 30, na figura 31 e na figura 32, nas quais também aparecem os sensores aplicados a cada uma das fases.

FIGURA 30 - TESTES EM BANCADA, COM SENSORES APLICADOS NAS TRÊS FASES

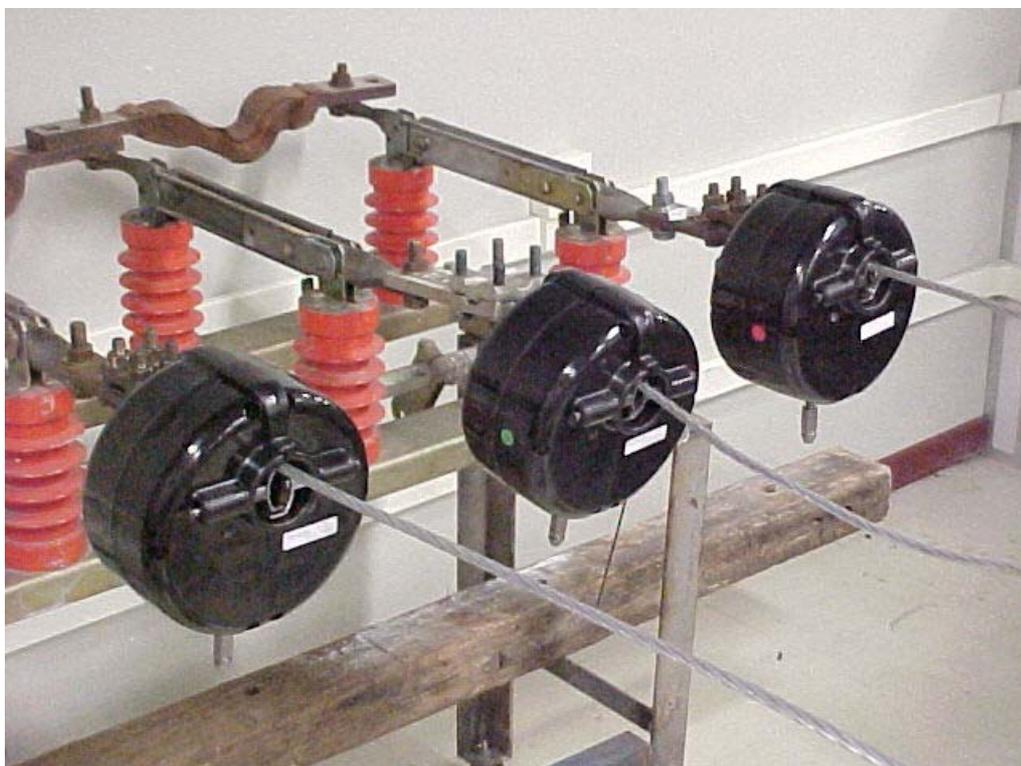


FIGURA 31 – FOTO DO ARRANJO FÍSICO PARA O TESTE

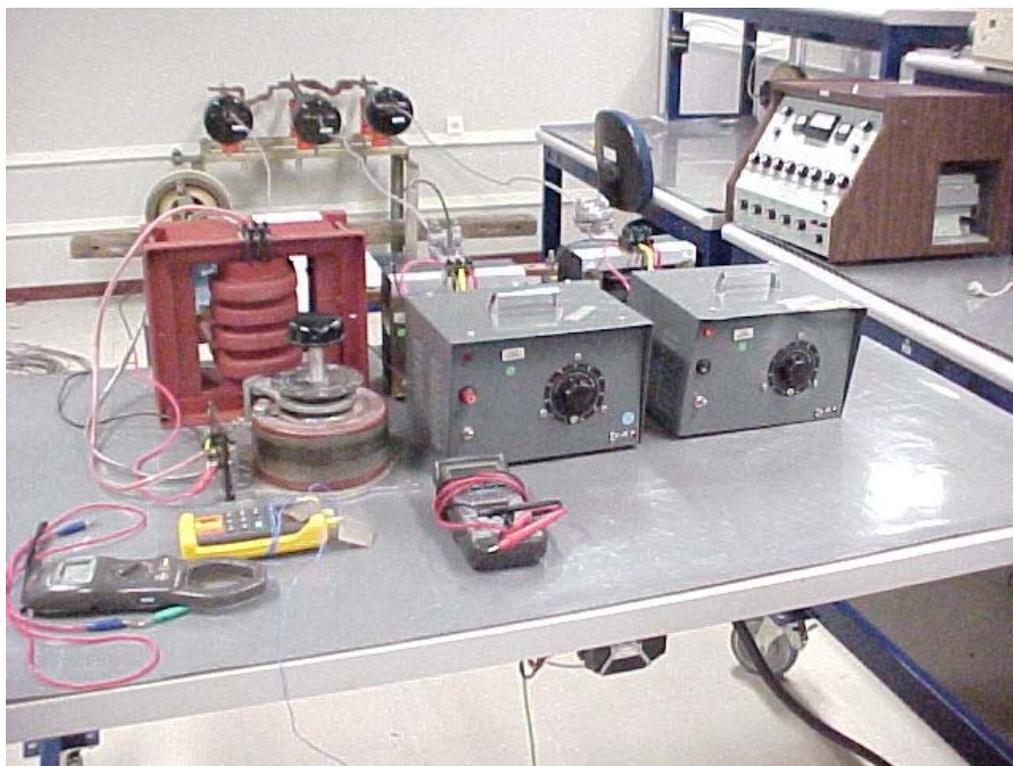
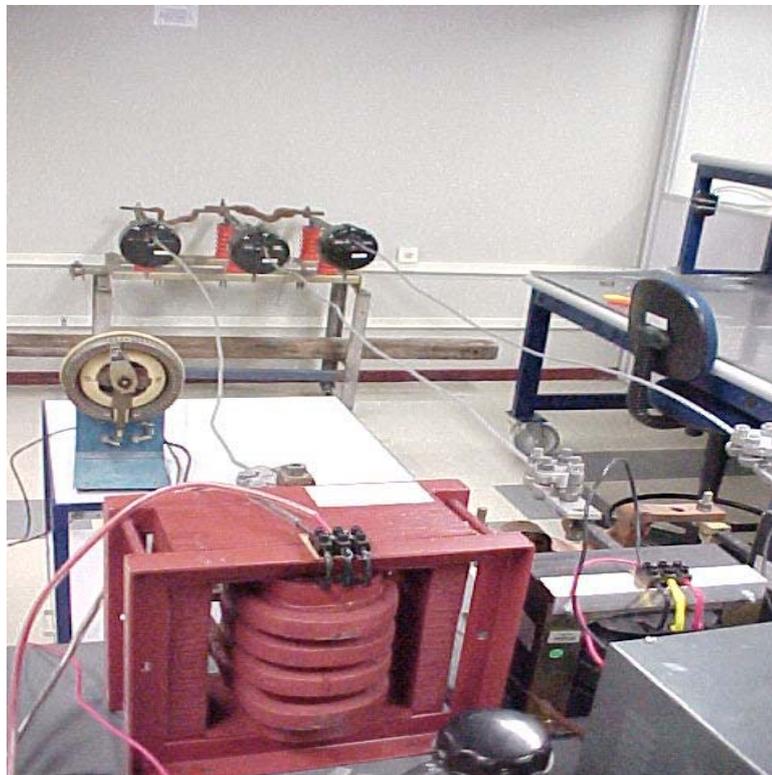


FIGURA 32 - TESTES EM BANCADA TRIFÁSICA, COM SENSORES APLICADOS NAS TRÊS FASES



O sinal foi transmitido por meio de rádio e adquirido em um microcomputador que, através do programa LabVIEW da National Instruments [48], indicava numérica e graficamente a condição das correntes elétricas presentes no circuito e as FAIs, quando simuladas.

O LabVIEW é um programa desenvolvido pela National Instruments e se constitui num poderoso ambiente de desenvolvimento gráfico para a aquisição de sinais, análise e apresentação de dados. Tem sido usado em diversas aplicações industriais, acadêmicas e em laboratórios. É desenvolvido em um ambiente aberto e oferece a flexibilidade de uma linguagem que não tem a complexidade das ferramentas tradicionais de programação. O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica que se utiliza de símbolos ao invés de texto para criar as aplicações. Em contraste com as linguagens baseadas em texto, onde as instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW usa a programação baseada em fluxograma, na qual o fluxograma determina a execução do programa. Os programas

LabVIEW são conhecidos como sendo instrumentos virtuais, porque suas simbologia e operação imitam instrumentos como, por exemplo, osciloscópios e multímetros. No LabVIEW se constrói a interface do usuário com um conjunto de ferramentas e objetos. A interface do usuário é conhecida como o “painel frontal”, e são adicionadas representações gráficas das funções para controlar os objetos a partir do “painel frontal” [49].

Ao interromper a corrente em uma das fases, simulando a ocorrência de uma FAI, a defasagem angular entre as correntes deve se alterar, situando-se em aproximadamente 180° entre aquelas duas que não sofreram a interrupção. A figura 33 e a figura 34 mostram telas do LabVIEW com situações de FAIs provocadas no laboratório. Essas figuras mostram o resultado do teste em bancada no qual a corrente em uma das fases foi interrompida e as outras permaneceram ativas. Nelas pode-se observar que a defasagem de aproximadamente 180° acontece entre as fases que permanecem conduzindo corrente, da mesma forma que a fase interrompida se apresenta como uma linha reta.

Apesar do avanço e bons resultados obtidos, uma barreira tecnológica ainda deve ser vencida, pois, em alguns casos, o tempo de resposta do sistema ultrapassa a 1 minuto podendo, no entanto, ser reduzido. Esse fato se dá em função da autonomia da carga da bateria. O sistema possui uma rotina de auto-cheque de razoável consumo. Em algumas ocasiões (cerca de 20% das vezes) o rádio não completa a comunicação por falta de carga da bateria. Essa dificuldade pode ser minimizada com uma mudança no programa, que altere o período de auto-cheque, mas possivelmente irá requerer mudança de *hardware*, para assegurar uma condição operacional mais apropriada e confiável. Essa otimização poderá ser objetivo de continuidade desse trabalho, no futuro próximo, em novo trabalho de tese.

FIGURA 33 - TELA DO LABVIEW APRESENTANDO A FAI NA FASE 2 E DEFASAMENTO ENTRE AS OUTRAS DUAS

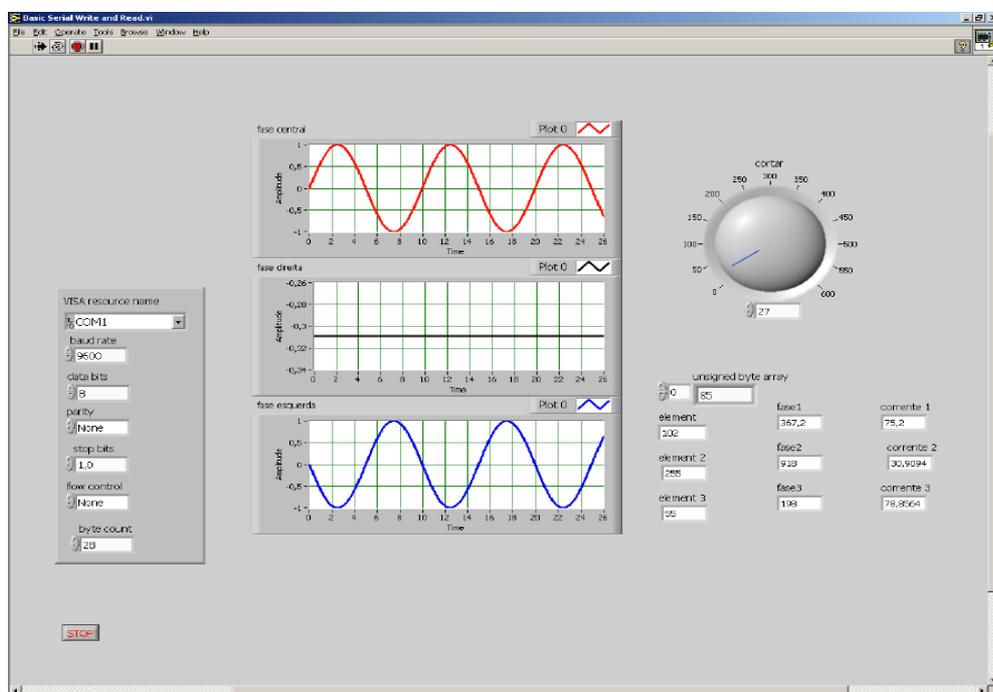
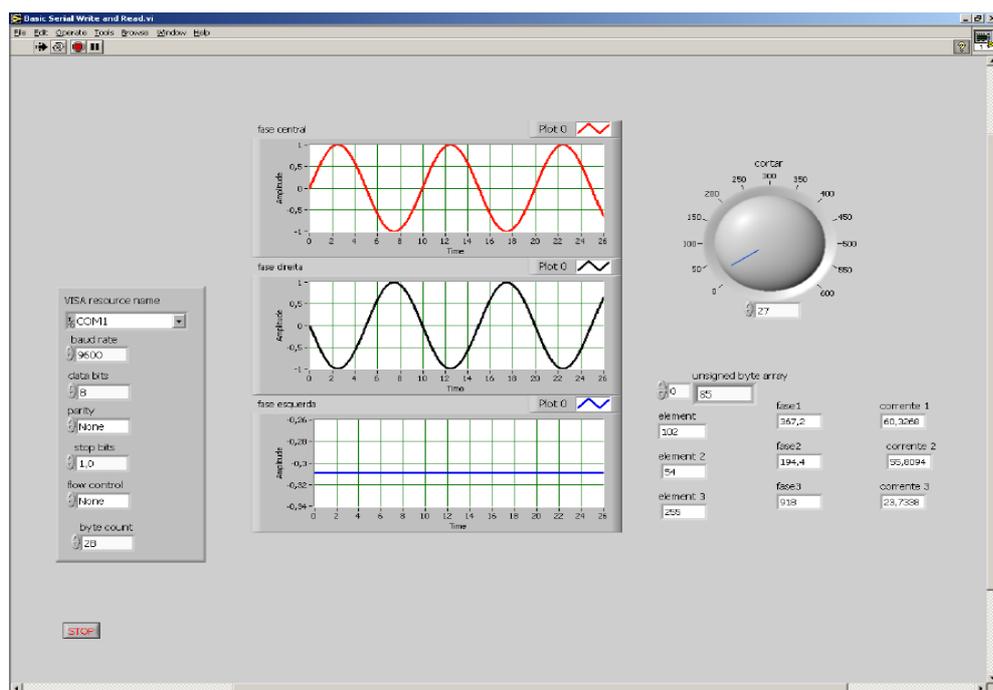


FIGURA 34 - TELA DO LABVIEW APRESENTANDO A FAI NA FASE 3 E DEFASAMENTO ENTRE AS OUTRAS DUAS



5 SISTEMA DE DETECÇÃO DO ROMPIMENTO DE UM CONDUTOR ATRAVÉS DA EXTENSOMETRIA EM METAIS

5.1 PRELIMINARES

O sistema aqui proposto se fundamenta no fato que, na ocorrência do rompimento de um condutor instalado em uma rede de distribuição de energia, a tração mecânica no condutor rompido irá se alterar. Esta alteração é detectada e comunicada remotamente, de modo a permitir ações por parte do operador da rede. Neste trabalho foram desenvolvidos sensores que detectam a alteração da carga mecânica, e tal desenvolvimento se fundamentou na técnica da extensometria apresentada, resumidamente, em 5.2.

5.2 A EXTENSOMETRIA – CONCEITOS E APLICAÇÕES

William Thomson, também conhecido como Lord Kelvin, em 1856, realizou experiências com cobre e ferro e constatou que a resistência elétrica desses materiais variava conforme a deformação que experimentavam. Ele usou uma Ponte de Wheatstone e um galvanômetro para realizar tal análise. Roy Carlson foi pioneiro na utilização de um fio resistivo para medições de tensão em 1931, remetendo ao trabalho de Thomson. É creditado ao Dr. Arthur C. Ruge do MIT e a Edward E. Simmons da CalTech a invenção simultânea, porém independente, do extensômetro (em inglês *strain gage*). Tal acontecimento se deu no período de 1937 a 1939. A invenção do extensômetro elétrico teve uma grande influência na maneira como eram efetuadas medidas de força e pressão na época de sua invenção e permanece uma alternativa de extrema relevância nos dias de hoje. Existem diversos tipos de extensômetros. Para esse trabalho utilizou-se o do tipo metálico [50, 51].

Pode-se ter uma noção do funcionamento de um extensômetro analisando a equação que determina a resistência de um condutor cilíndrico em função de suas características físicas:

$$R = \frac{\rho L}{A}, \quad \text{onde:}$$

R : resistência elétrica (Ω)

ρ : resistividade do material ($\Omega \cdot m$)

L : comprimento do condutor (m)

A : área da seção transversal (m^2)

Ao se tracionar o condutor, seu comprimento L aumenta e a área transversal A diminui, aumentando assim a resistência do condutor. A resposta à compressão é inversa, isto é, há uma diminuição na resistência uma vez que ocorre uma diminuição do comprimento L e um aumento da área A .

Será usada uma equação derivada da recém apresentada, que explicita o diâmetro da seção transversal.

$$R = \frac{4\rho L}{\pi D^2}, \quad \text{onde:}$$

D : diâmetro da seção transversal do condutor (m).

É interessante analisar a taxa de variação da resistência em função do comprimento, área da seção transversal (diâmetro) e resistividade. A variação de R é dada por:

$$\ln R = \ln 4 + \ln \rho + \ln L - \ln \pi - 2 \ln D$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \cdot \frac{dD}{D} \quad (1)$$

O coeficiente de Poisson (ν) descreve a relação entre comprimento e seção transversal do condutor, quando deformado. Onde:

$$\nu = -\frac{\frac{dD}{D}}{\frac{dL}{L}} = -\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_a} \quad \text{onde}$$

ε_L : deformação axial ou transversal

ε_a : deformação longitudinal

Dividindo a expressão (1) por $\frac{dL}{L}$ e fazendo uso de ν , tem-se:

$$K = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = 1 + 2 \cdot \nu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}},$$

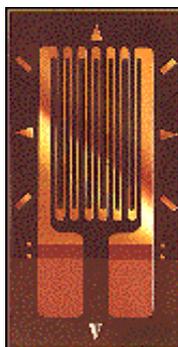
onde K representa a variação da resistência do material com a deformação aplicada ao mesmo. O termo K possui várias denominações, entre elas fator do extensômetro (do inglês *gage factor*), fator de sensibilidade e fator de calibração. Esta expressão revela a influência no valor de K devido a fatores geométricos $(1+2\nu)$, e $(d\rho/\rho)/(dL/L)$ mostra a influência do material [51, 52, 53 e 54].

A alteração da resistência ocorre parcialmente em função da deformação do condutor, e parcialmente devido à mudança da resistividade do condutor, como resultado de mudanças micro-estruturais [50].

É vasta a aplicação da extensometria em diversos ramos da Engenharia e os fabricantes oferecem dezenas de modelos para atender às demandas específicas dos usuários que variam em função da aplicação. A especificação do extensômetro a ser aplicado não é trivial. Uma escolha adequada requer conhecimento de vários aspectos relacionados ao objetivo de sua aplicação, ao processo de medição e aos materiais aplicados. Existe uma ampla gama de modelos, disponibilizados pelo mercado por diversos fabricantes. Para atender a finalidade do presente trabalho de tese, foram utilizados extensômetros da marca Kyowa, do tipo KFG-1-120-C1-11, uniaxiais, cujas características passam a ser descritas [55]. A denominação KFG diz respeito à série selecionada, e as letras iniciais são oriundas das palavras Kyowa Foil Gages, relacionadas a extensômetros de uso geral e que possuem uma forma plana. Os extensômetros da série KFG podem ser de três tipos, denominados uni, bi ou triaxiais, em função das direções nas quais se pretende medir os esforços mecânicos. São também fornecidas unidades para uso à prova d'água; unidades

para uso sob extremas temperaturas com aplicações desde -269 até 950 °C. As séries variam, ainda, em função do material sobre os quais serão aplicados como, por exemplo, metais, concreto, materiais compósitos e papéis. As séries são divididas, também, pela finalidade para as quais os extensômetros são especificados como, por exemplo, para a medição de tração; para o acompanhamento do desenvolvimento de fissuras e respectiva velocidade de propagação, medição de tensão residual, etc. O código 1, diz respeito ao comprimento do extensômetro, que nesse caso é de 1 milímetro. O código 120, diz respeito à resistência ôhmica que é de 120 ohms. C1 é o *lay-out* do extensômetro, dentre os aproximadamente 40 modelos oferecidos pelo fabricante. O número 11 se refere ao coeficiente de expansão linear que, neste caso, é de $11,7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Uma fotografia do extensômetro utilizado pode ser vista na figura 35.

FIGURA 35 - FOTOGRAFIA DO TIPO DE EXTENSÔMETRO UTILIZADO NA DETECÇÃO DA TENSÃO MECÂNICA APLICADO NO PINO DE ISOLADOR DE DISTRIBUIÇÃO [54].



A técnica de instalação de extensômetros é dividida em fases. Inicialmente se preconiza uma preparação da região do substrato, por lixamento manual, para a remoção de materiais não aderentes, regularização da superfície e homogeneização da rugosidade superficial de modo a permitir o ancoramento do adesivo de fixação do extensômetro à superfície. A superfície assim preparada deverá ser limpa com acetona aplicada com um tecido que não deixe resíduos na superfície, segundo mostra a figura 36. Se ocorrer condensação de umidade na superfície do substrato, deve ser removida através de fluxo de ar quente. A presença da condensação prejudica a efetividade do adesivo, comprometendo a fixação adequada do extensômetro ao substrato. A posição de instalação dos extensômetros deve ser

demarcada através da execução de marcação alinhada com a direção de referência, definida conforme o tipo de solicitação mecânica esperada para o substrato na região de medição. Esta marcação deverá ser o mais suave possível, porém, permitindo perfeita visualização para o alinhamento adequado do extensômetro [56].

FIGURA 36 - PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE E MARCAÇÃO DA POSIÇÃO DE INSTALAÇÃO DO EXTENSÔMETRO.



Os extensômetros são colados com adesivo específico. A cola pode ser dos tipos cianocrilático, epóxi monocomponente ou epóxi bicomponente. Para todas as possibilidades o prazo de validade do produto deve estar em vigência, bem como deve ser armazenado conforme recomendações do fabricante. Caso estas condições não sejam atendidas o adesivo deve ser descartado. Para o adesivo epóxi bicomponente a preparação deve levar em conta “tempo de pote”, ou seja, o período máximo de tempo que o adesivo preparado pode aguardar antes da aplicação sem curar no próprio recipiente de preparação.

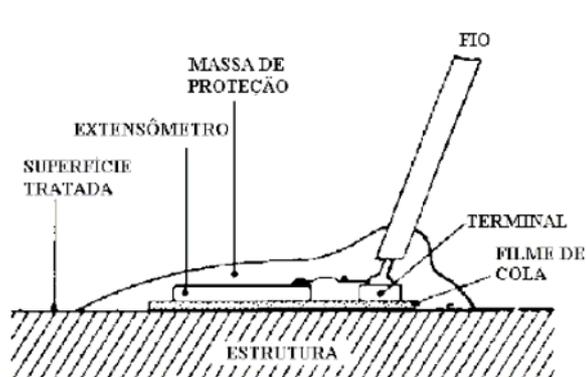
O extensômetro deverá ser fixado em um pedaço de fita adesiva, mantendo sua superfície inferior exposta. O adesivo deverá ser aplicado na superfície inferior do extensômetro, em toda a sua extensão. O extensômetro, então, será aplicado no ponto escolhido mantendo-se o alinhamento entre as marcas existentes na base do extensômetro com aquelas traçadas no substrato. O alinhamento preciso influi no resultado do processo. Assim que instalado, o extensômetro deverá receber sujeição mecânica para permitir a formação de uma película mínima e homogênea de

adesivo entre o extensômetro e o substrato, bem como para proporcionar a cura anaeróbica do adesivo. Esta sujeição mecânica deverá ter intensidade e duração conforme instruções do fabricante do adesivo. Especial cuidado deverá ser tomado para que não se formem bolhas de ar sob o extensômetro. Ainda, a adequada homogeneização do adesivo evitará a formação de cristais que poderão danificar a grade do extensômetro. O conjunto é levado a um forno onde se mantém por duas horas a uma temperatura de aproximadamente 200°C, para cura da cola e fixação do extensômetro sobre a superfície.

Cada extensômetro apresenta dois terminais que deverão ser soldados ao cabo de ligação para o complemento de ponte de Wheatstone. Esta operação é muito delicada e deve ser realizada com uma fonte de soldagem com controle de temperatura e com ferro de soldar com extremidade afilada. A liga de metal de adição deverá ser a liga eutética de estanho e chumbo. A fonte de soldagem deve estar regulada para controlar a temperatura de trabalho em aproximadamente 200°C. A soldagem deve ser executada por profissional experiente para que não venha ocorrer os defeitos do tipo solda fria, retenção de fluxo e excesso de metal de adição.

Tendo em vista a importância que uma adequada instalação representa na qualidade dos resultados, os fornecedores tradicionais de extensômetros fornecem os principais produtos e orientações sob o título de acessórios. Dessa forma recomenda-se adquirir tais acessórios dos próprios fornecedores, quando da compra dos extensômetros, pois uma fixação inadequada do extensômetro ao substrato colocará em risco a qualidade do trabalho. A figura 37 mostra, esquematicamente, a instalação de um extensômetro em um substrato [57].

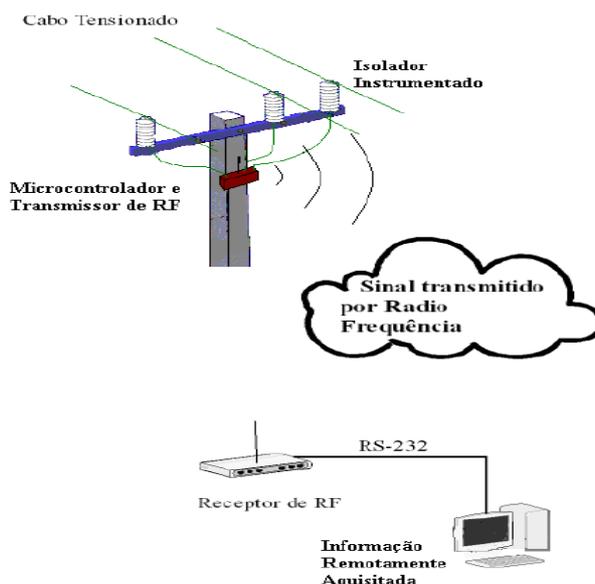
FIGURA 37 - INSTALAÇÃO DE UM EXTENSÔMETRO EM UM SUBSTRATO [57]



5.3 SISTEMA PARA DETECÇÃO DO ROMPIMENTO DE CABOS USANDO ISOLADORES INSTRUMENTADOS

O sistema desenvolvido é composto por um sensor, que detecta o rompimento do cabo; por uma unidade de transmissão remota de dados; por uma unidade receptora; e por uma unidade de gerenciamento da informação. A figura 38 mostra, esquematicamente, o sistema desenvolvido.

FIGURA 38 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE ROMPIMENTO DE CABOS.



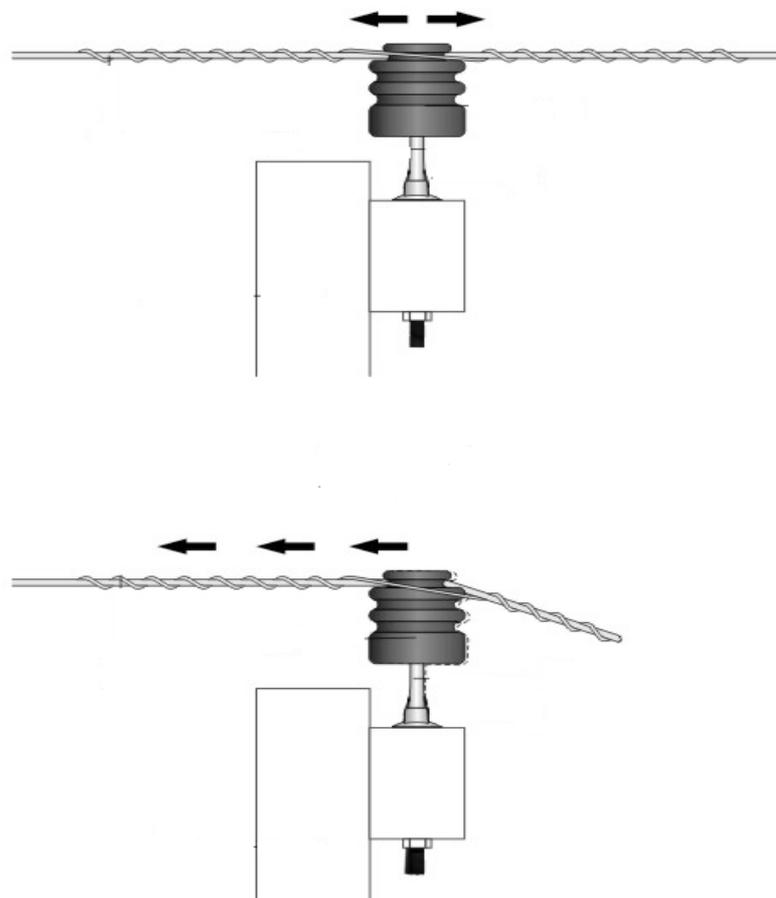
5.3.1 O sensor para detecção de rompimento (isolador instrumentado)

O sensor, também denominado isolador instrumentado, foi concebido usando a técnica da extensometria, que se fundamenta no fato de que a resistência elétrica dos materiais varia conforme a deformação física que experimentam. Dessa forma, converte-se o efeito mecânico em um sinal elétrico proporcional. Nos ramais de distribuição de energia em 13 kV, a construção de isoladores instrumentados é inédita. O sensor é composto por um isolador de porcelana convencional e normalizado, comumente aplicado nas redes de distribuição de energia, porém instrumentado com um conjunto de extensômetros em seu corpo. A aplicação desses extensômetros na superfície do isolador requer uma técnica que demanda a correta escolha do tipo e modelo de extensômetro, a determinação da localização no corpo do isolador, a adequada preparação da superfície do isolador, a fixação confiável com alto nível de aderência extensômetro-isolador e as conexões elétricas apropriadas.

Os circuitos de distribuição de energia elétrica são, geralmente, trifásicos, e os sensores são instalados em cada uma das três fases. Se um condutor se romper, ocorre a variação do esforço mecânico (alteração da tração). O sensor detecta esta variação e gera um sinal correspondente. Os cabos de uma rede de distribuição de energia são tracionados, normalmente, em 200 kgf, para vãos básicos entre postes, de 80 metros. Na ocasião do rompimento do cabo essa tração se reduz sensivelmente, e é detectada pelo sensor. As redes de distribuição de energia utilizam dois tipos de isoladores, os de ancoragem e os de pino. Os de ancoragem são instalados, por exemplo, nas extremidades das linhas, onde existe tração em somente um dos lados da rede. São usados, também, em condições especiais de travessias de pista, em passagens de nível e em situações em que os traçados requeiram um ângulo da ordem de 40° ou, ainda, alternadamente entre os postes. Os isoladores de ancoragem absorvem toda a tração mecânica em uma das extremidades da rede, de modo que se um dos cabos se romper, a tração remanescente é muito menor que os 200 kgf, o que sensibiliza muito facilmente o sensor, que é um isolador de ancoragem instrumentado. Os de pino, por sua vez,

são utilizados como elementos de suporte dos cabos, na situação de passagem de um ramo para outro. Os cabos são fixados aos isoladores de pino através de um laço preformado, que restringe o movimento do cabo quando fixado ao isolador. Os isoladores de pino, por serem de “passagem”, sofrem esforços nos dois sentidos (a montante e a jusante do poste). Em situação normal essas trações tendem a se anular. No momento do rompimento do cabo, a tração de 200 kgf se reduz em um dos sentidos e tende a provocar um movimento de flexão no isolador. Esse movimento de flexão é, então, detectado pelo sensor. O sensor, que é um isolador de pino instrumentado, foi projetado e construído de modo a possuir sensibilidade suficiente para detectar o rompimento nos condutores situados na adjacência do poste. A figura 39 mostra, esquematicamente, as condições de normalidade e de cabo rompido em isolador de pino.

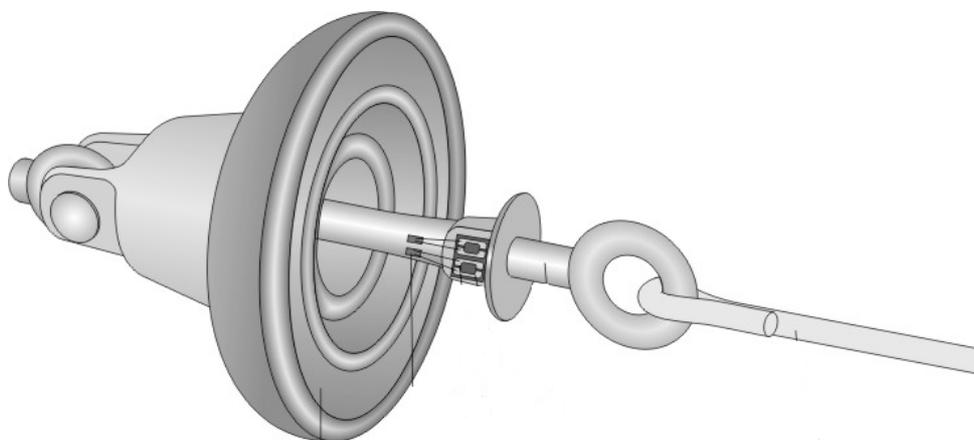
FIGURA 39 - SIMULAÇÃO DA SITUAÇÃO NORMAL (SUPERIOR) E DE CABO ROMPIDO (INFERIOR) [65].



Os sensores são inéditos e sua construção se fundamenta na instrumentação de isoladores amplamente utilizados em redes de distribuição, de modo que suas características elétricas e mecânicas se mantêm inalteradas conferindo, assim, a necessária confiabilidade operacional ao ramal elétrico. Essa solução não é de alto custo, tendo em vista tratar-se da preparação de um isolador que já seria imprescindível, mesmo no arranjo convencional das redes.

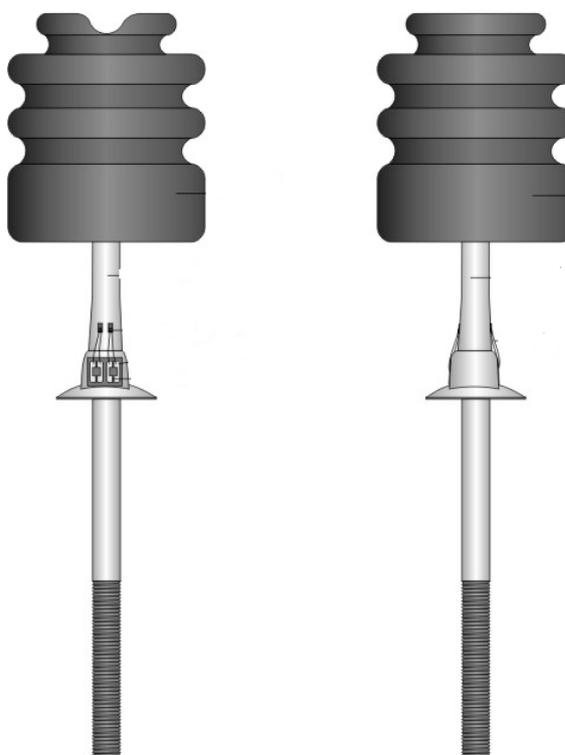
A figura 40 mostra a aplicação de extensômetros em isoladores de ancoragem, aqui denominados de isolador de ancoragem instrumentado, ou de sensor.

FIGURA 40 - ISOLADOR DE ANCORAGEM INSTRUMENTADO [65].



A figura 41 mostra a aplicação de extensômetros em isoladores de pino, aqui denominados de isolador de pino instrumentado ou de sensor.

FIGURA 41 - ISOLADOR DE PINO INSTRUMENTADO. VISTAS FRONTAL E LATERAL [65]



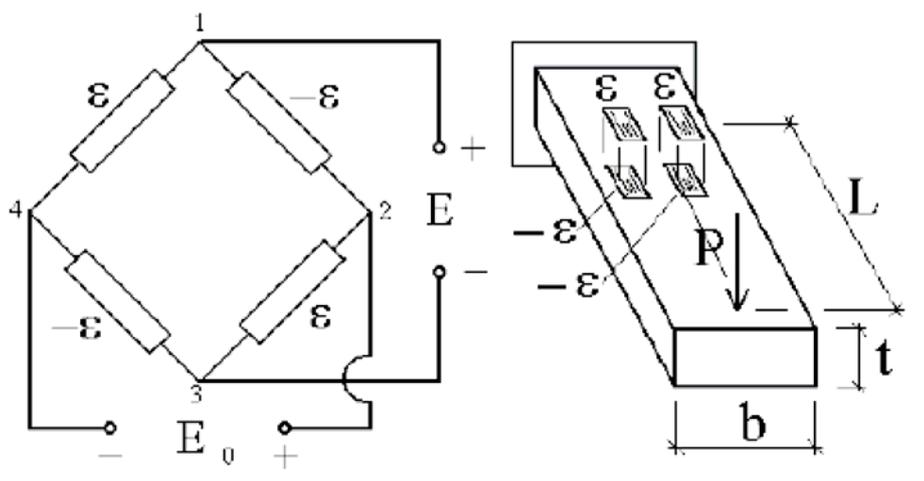
Na figura 41 pode-se observar que dois extensômetros estão fixados lado a lado. Convém ressaltar que, no total, são quatro unidades instaladas sendo que as outras duas estão em posição diametralmente opostas. Foram utilizados quatro

extensômetros, constituindo, dessa forma, uma ponte de Wheatstone de quatro braços. Com essa configuração obtém-se um conjunto no qual o efeito da variação de temperatura é compensado [52, 57]. A figura 43 mostra, à esquerda, a ligação dos extensômetros na ponte e, à direita, sua fixação em uma peça sujeita a flexão. Se não houver flexão, a ponte se encontra em equilíbrio e a tensão de saída é nula.

FIGURA 42 - FOTO DA HASTE DO ISOLADOR INSTRUMENTADO COM EXTENSÔMETROS A SEREM CONECTADOS À PLACA DE CONEXÃO ELÉTRICA.



FIGURA 43 - FORMA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA ADOTADA. QUATRO EXTENSÔMETROS LIGADOS, CONSTITUINDO CADA UM DELES UM BRAÇO DA PONTE DE WHEATSTONE [57]



5.3.2 O tratamento do sinal proveniente dos sensores de rompimento de cabos e a transmissão por meio de rádio

As deformações medidas através de extensômetros são, usualmente, muito pequenas. Como conseqüência, as variações nas resistências dos extensômetros também o são. No presente estudo, as resistências são conectadas sob a forma de uma ponte de Wheatstone com 4 fios, representadas na figura 44 como R_1 a R_4 . Os sinais gerados pelo desbalanceamento da ponte de Wheatstone são muito sutis e necessitam de um tratamento, e amplificação, para que possam ser transmitidos remotamente. A alimentação da ponte de Wheatstone é de 2 V. Esse valor foi escolhido por atender o compromisso entre uma aceitável relação sinal-ruído e uma corrente máxima limitada, que não danifique o extensômetro quando por ele circular. No circuito da ponte foi também inserido um trimpot (R_{13}) que tem a finalidade de regular o nível zero da ponte, ou seja, quando o isolador estiver em condição normal (isolador sem deflexão) não há sinal de saída da ponte.

Para amplificar o sinal proveniente da ponte foi utilizado um amplificador de instrumentação, formado pelos amplificadores operacionais AOP1 a AOP4, do qual a primeira etapa consiste em amplificar os dois sinais provenientes da ponte através de uma configuração não-inversora dos amplificadores operacionais AOP1 e AOP2 que apresentam como característica intrínseca uma resistência de entrada

idealmente infinita. O ganho de ambos amplificadores operacionais desta primeira etapa é controlado pelo trimpot R_8 . A segunda etapa consiste em um subtrator utilizando o amplificador operacional AOP4, ou seja, faz a diferença entre os sinais amplificados na etapa anterior. Circuitos subtratores permitem que se obtenha na saída uma tensão igual à diferença entre os sinais aplicados, multiplicada por um ganho [58,46]. Essa diferença pode assumir valores positivos ou negativos que variam de acordo com o sentido da solicitação da carga mecânica sobre o isolador. Por sua vez, o microcontrolador não atua com sinais negativos, razão pela qual se faz necessária a instalação de um quarto amplificador operacional denominado AOP3. Trata-se de um circuito seguidor de tensão que, em conjunto com o trimpot R_{12} , promove na saída do AOP4 um deslocamento no nível do sinal de tensão (offset), de modo a atender os requisitos de tensão do microcontrolador. Os trimpots R_8 e R_{12} são ajustados de forma a, em situação de não deflexão do isolador, entregar 2,5V na saída do amplificador AOP4 ou, em caso de ruptura de cabo, entregar 0 ou 5V, conforme o lado do cabo rompido, se a jusante ou montante do poste. A saída do amplificador AOP4 é conectada a um filtro passa-baixa Butterworth de 2ª ordem, de frequência de corte de aproximadamente 1 Hz, que possui a finalidade de eliminar parte do ruído presente no sistema. Este filtro é implementado com o amplificador operacional AOP5, os capacitores C_1 e C_2 , e os resistores R_{14} e R_{15} . Os filtros podem ser classificados quanto a sua função-resposta, que está relacionada à função matemática específica para cada um. Filtros passa-baixa Butterworth oferecem uma resposta considerada plana e, pelo fato de serem de 2ª ordem, sua resposta se aproximará mais da ideal, se comparado com um de ordem inferior [58, 59].

As três fases são instrumentadas, e o circuito da figura 44 se repete para cada fase. As saídas, já filtradas, dos três amplificadores são conectadas às portas analógicas de um microcontrolador, PIC16F877 produzido pela Microchip [60], que terá como papel a digitalização dos níveis de tensão dos sensores, o processamento destes sinais, e a transmissão dos dados para o rádio, que irá transmitir informação para uma central de comando da concessionária de energia no caso de uma ruptura. Uma descrição mais detalhada do microcontrolador, também denominado PIC,

poderá ser observada em 5.3.3.

O transmissor capta o sinal digital do PIC e o modula em FM, em banda estreita, na frequência de 173,225 MHz. O sinal transmitido via rádio tem alcance de até 10 km. Nesse trabalho foi utilizado o rádio Radiomatrix [61], de procedência inglesa, modelo TX1-173.225-10. O circuito completo composto pelo transmissor propriamente dito, PIC e sensores, é alimentado através da energia secundária da rede (110 ou 220 V) ou por meio de baterias. A figura 46 mostra fotografia das placas de circuito impresso projetadas para a parte da transmissão do sinal, compostas pela fonte, pelo amplificador, pela unidade de aquisição de sinal e pelo transmissor.

5.3.3 Os microcontroladores utilizados nos circuitos de transmissão e de recepção de sinais

Nos circuitos de transmissão e de recepção de sinais são utilizados microcontroladores. Segundo Souza [62] os microcontroladores são componentes eletrônicos, dotados de uma inteligência programável, utilizados no controle de processos lógicos. O microcontrolador conta com uma unidade lógica aritmética (ULA) onde as operações lógicas e matemáticas são executadas. É de tamanho reduzido, pois uma única pastilha de silício encapsulada abriga todos os componentes necessários ao controle de processos sendo provido, portanto, de memória de programa, memória de dados, portas de entrada e saída, temporizadores, contadores, conversores analógico-digitais, entre outros. Nesse trabalho foram utilizados microcontroladores produzidos pela Microchip, da família PIC [60].

O modelo dos PICs utilizados tanto na transmissão quanto na recepção é o PIC16F877, que possui 40 pinos, uma unidade lógica aritmética (ULA) de 8 bits, um total de 33 I/Os (entradas e saídas) separadas em 5 grupos denominados de portas, codificadas de A,B,C,D e E. Possui um protocolo de comunicação serial assíncrono (UART) implementado em *hardware* que é utilizado tanto na comunicação entre o transmissor e o receptor, quanto na comunicação entre o receptor e o computador. UART, ou Receptor/Transmissor Assíncrono Universal, constitui o coração da porta serial. Nesse tipo de porta, os *bytes* são transmitidos como uma sucessão de bits representados por pulsos de corrente. A principal função do UART é converter bytes no fluxo de bits correspondente e vice-versa, acrescentando alguns pulsos de controle para permitir a detecção de erros [63]. Nos circuitos montados, os microcontroladores utilizam um cristal de 4 MHz, sendo capazes de executar uma instrução a cada 1 μ s [60]. Nos microcontroladores PIC o sinal do *clock* é internamente dividido por quatro. Portanto para um *clock* externo de 4MHz, há um outro interno correspondente, e de 1 MHz. Conseqüentemente, cada ciclo de máquina dura 1 μ s [60].

Os PICs são, obviamente, programáveis. Existem várias ferramentas de

programação, muitas delas apoiadas em programas para PC, como o MPLAB, compatíveis com o Windows, que são ambientes para desenvolvimento de programas. Para o presente estudo, o ambiente utilizado para a programação do PIC foi o MPLAB, da própria Microchip. Para gravação do programa na memória do PIC foi utilizado o gravador modelo McFlash da fabricante Mosaico.

Como os circuitos de distribuição são trifásicos, são necessários três sensores de rompimento, no mínimo, sendo um para cada fase. O PIC é um circuito eletrônico cuja finalidade é gerenciar a leitura, digitalização (conversão analógico-digital) e processamento do sinal emitido pelos três sensores, identificar e diferenciar o sinal gerado por cada um dos três, de modo a permitir que fique claramente identificado, de forma unívoca, o sinal proveniente de cada um dos sensores em particular.

Através de instruções de *software*, gravadas no PIC, é possível definir a lógica de funcionamento do sensor, ou seja, a partir de qual valor de tensão mecânica o sistema deve entender que o cabo está rompido ou não. Depois de definido este nível de tensão, o PIC fará a interpretação do sinal, enviando ao rádio os sinais a serem transmitidos.

O circuito do PIC, mostrado na figura 45, ainda possui chaves para a seleção de endereço do módulo para identificação do mesmo por parte do receptor. Na fase inicial de testes do sistema de comunicação, percebeu-se um elevado nível de ruído, e a conseqüente atuação falsa do sistema. De modo a assegurar uma comunicação confiável entre os módulos de rádio, o transmissor foi, então, programado para, somente na ocorrência de rompimento de cabo, enviar por rádio a seqüência de letras I, J, K, L, M codificadas de acordo com a tabela ASCII, de modo que o receptor só considera informações válidas aquelas que iniciarem com esta mesma seqüência de letras. Existe também um pino no transmissor que é utilizado para a sua habilitação, o qual é controlado pelo PIC no momento em que se faz necessária a transmissão de dados. Dessa forma a transmissão não acontece de forma permanente, mas somente no momento em que for acionada pelo PIC, reduzindo consumo de energia a aumentando a confiabilidade. O código

apresentado na tabela ASCII, *American Standard Code for Information Interchange*, tem a forma binária e é composto por sete bits. O código faz uso de letras, números decimais e símbolos para representar os respectivos números binários. Da tabela se extrai, por exemplo, que a letra I corresponde ao número binário 100 1001[52], a letra J corresponde ao número 100 1010, e a letra K corresponde ao número 100 1011.

FIGURA 45 - ESQUEMA DO PIC 16F877 UTILIZADO NOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE SINAL.

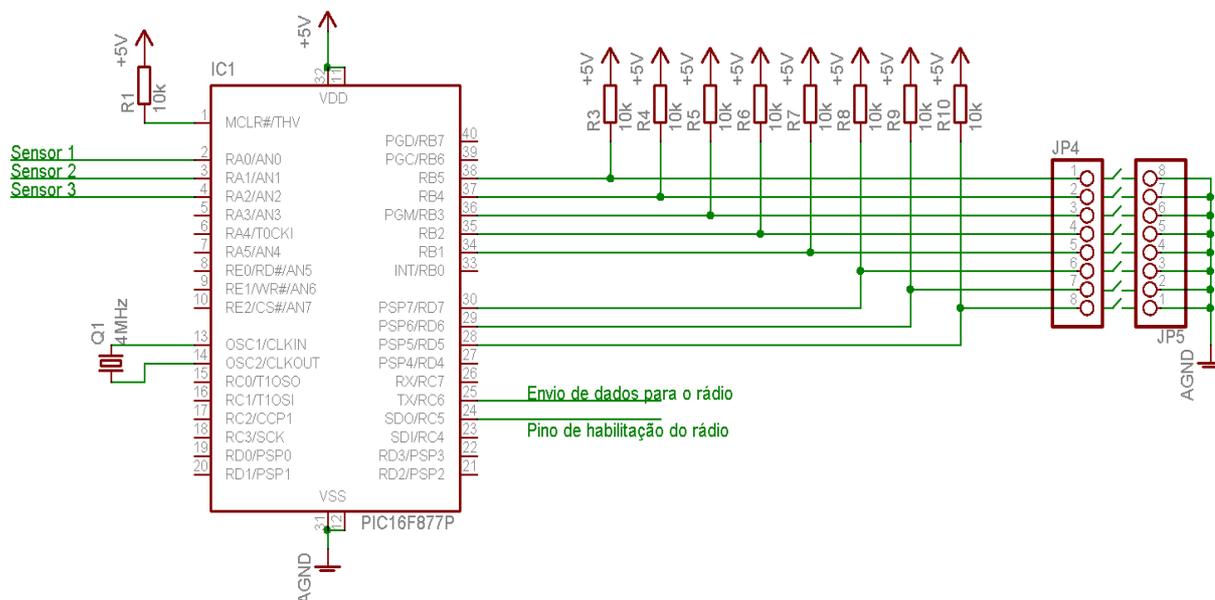


FIGURA 46 – CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTOS DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO CONFECCIONADAS PARA A TRANSMISSÃO DE SINAIS

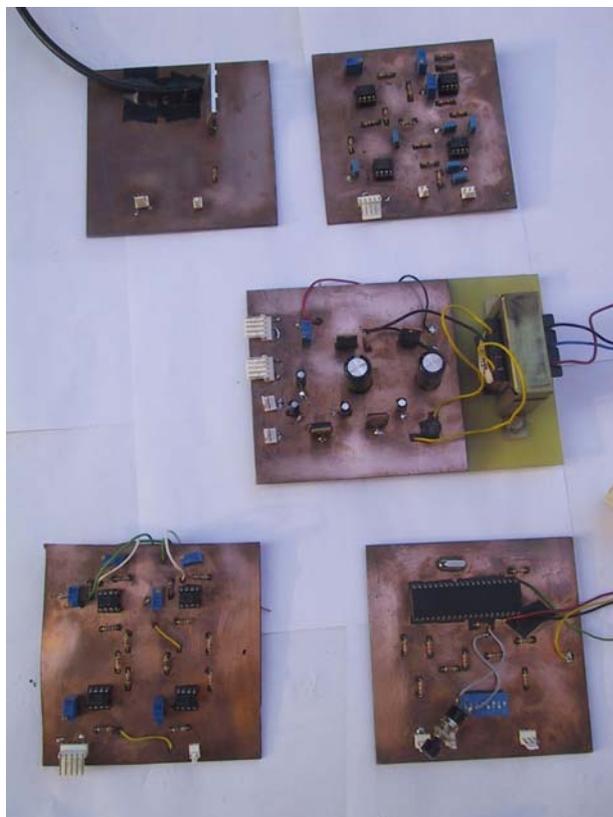


FIGURA 47 - CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM OS AMPLIFICADORES

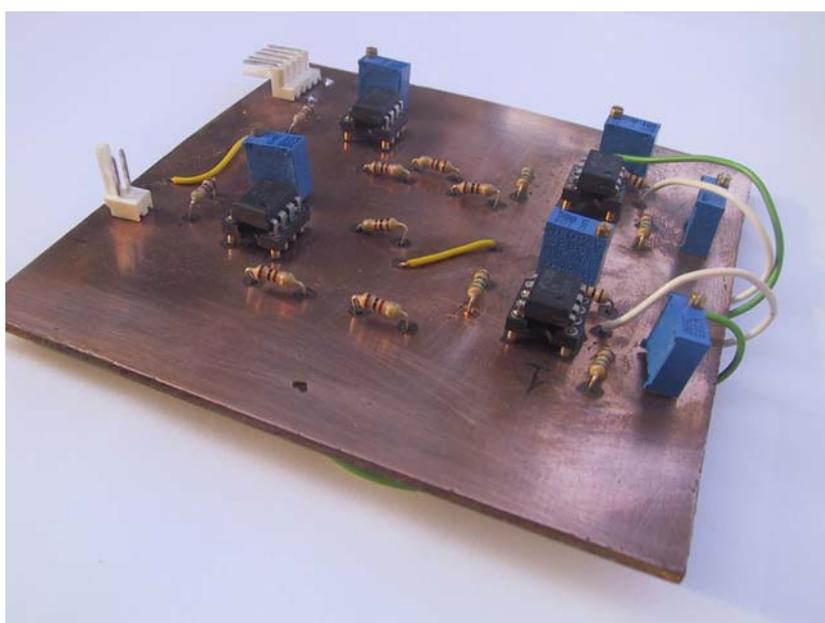


FIGURA 48 - CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM O MICROCONTROLADOR PIC16F877

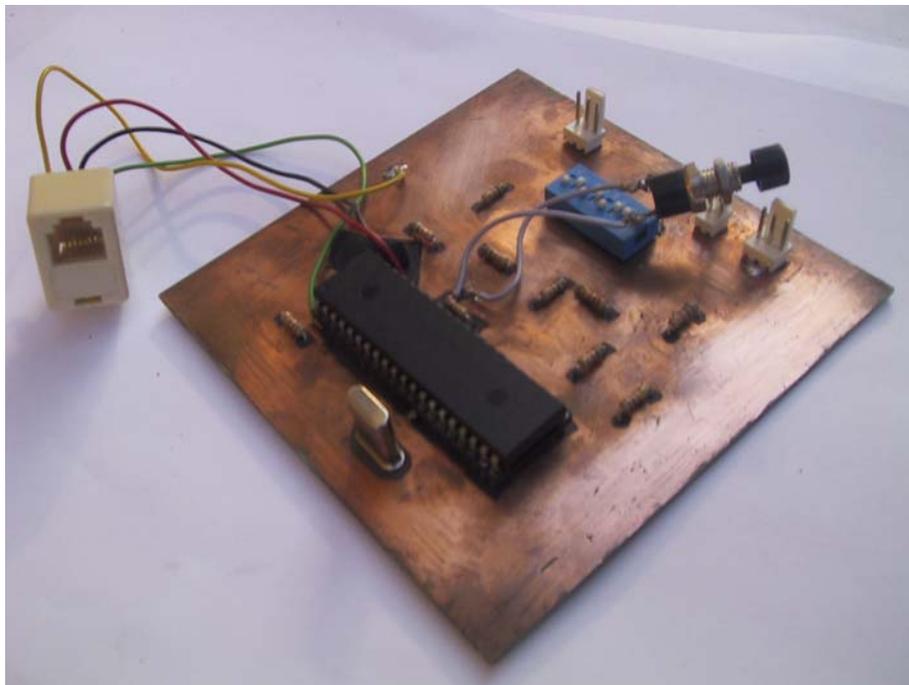


FIGURA 49 - CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM A FONTE

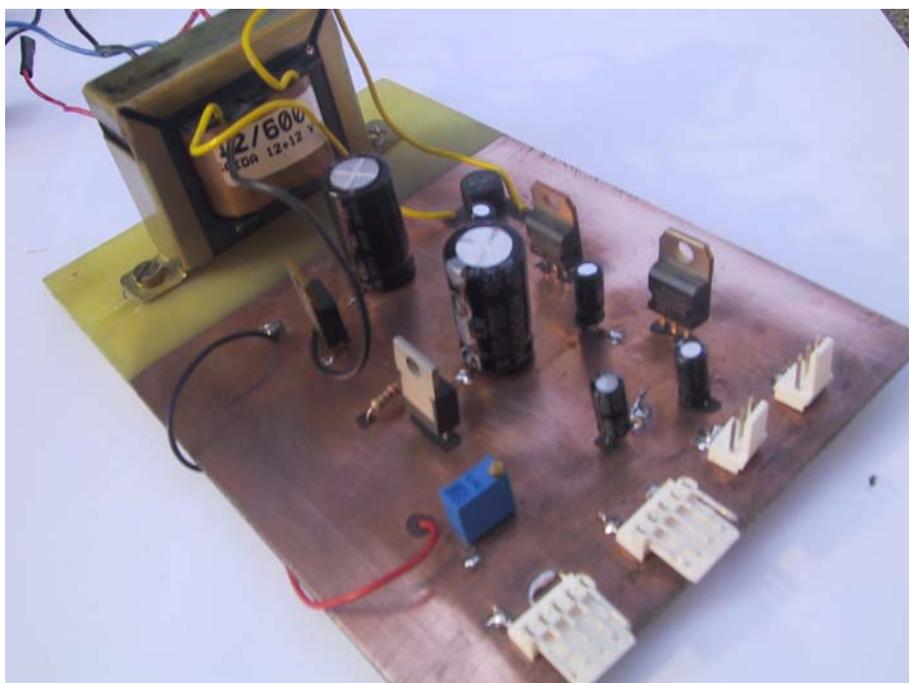
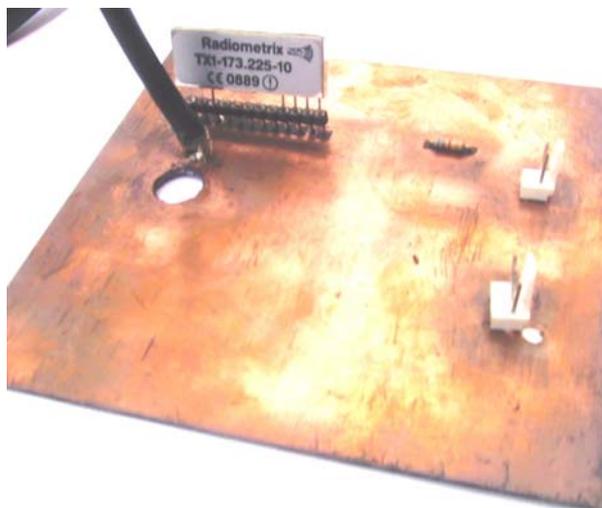


FIGURA 50 - CIRCUITO DE TRANSMISSÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM O RÁDIO RADIOMATRIX E RESPECTIVA ANTENA DE TRANSMISSÃO A ELE CONECTADA.



5.3.4 A recepção do sinal e a comunicação com o microcomputador.

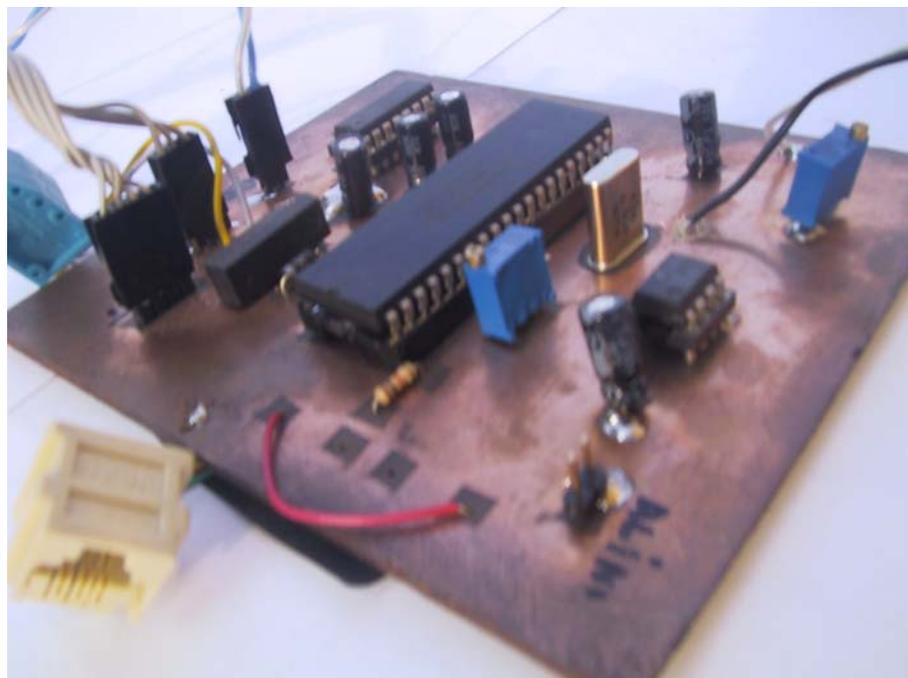
À distância de até dez quilômetros é instalado o receptor, compatível ao transmissor, ou seja, sintonizado na mesma frequência de 175,225 MHz. Para que o sinal enviado pelo transmissor possa ser processado por um microcomputador, é necessário que este sinal seja recebido e tratado eletronicamente com a finalidade de condicioná-lo aos níveis de tensão compatíveis ao protocolo de comunicação RS-232, de modo que o receptor possa se comunicar com o microcomputador através de sua porta serial. O receptor é alimentado através da energia secundária da rede (110 ou 220 V). O circuito para condicionamento do sinal recebido é apresentado na figura 51. O sinal que provém do receptor possui um nível DC de aproximadamente 1V sobreposto ao sinal correspondente à informação de tensão pico a pico de aproximadamente 600 mV, além de possuir uma certa distorção. Para o apropriado condicionamento deste sinal utiliza-se um comparador não-inversor com histerese (Schmitt trigger) que é ajustado de modo a garantir uma aceitável imunidade contra ruídos. O trimpot R_1 regula a largura do laço de histerese e R_2 tem a finalidade de ajustar o nível central de comparação. O sinal de saída deste comparador é conduzido a um microcontrolador PIC16F877 que terá como papel receber estes dados e repassá-los para o computador caso seja uma informação válida, ou seja,

caso a informação corresponda com a seqüência de letras I, J, K, L, M. Para realizar tal função o microcontrolador é programado da forma anteriormente descrita, ou seja por meio da utilização do programa MAPLAB. Outra função do microcontrolador é acionar um relé em caso de ruptura do cabo, que poderá ser utilizado pela subestação para automação do chaveamento do circuito correspondente à fase do cabo rompido.

Um circuito integrado adicional, cuja denominação é MAX232, modelo 16PDIP, da Maxim, é utilizado para realizar a comunicação entre o PIC e o computador. Este circuito integrado é da família denominada por *Drivers/Receivers de Linha*, e tem por função adequar os níveis de tensão do PIC àqueles exigidos pelo computador. Os sinais fornecidos pelo PIC são de 0 V (nível lógico 0) e 5 V (nível lógico 1), já os sinais entendidos pela porta serial do computador devem ser de 10 V (nível lógico 0) e -10 V (nível lógico 1), portanto o papel do circuito MAX232 é fazer a conversão destes níveis de tensão. Todos os capacitores conectados ao MAX 232 são de 1 μ F[64].

Foram projetadas e confeccionadas placas de recepção e condicionamento de sinal que constam da figura 52 e da figura 53.

FIGURA 53 - CIRCUITO DE RECEPÇÃO. FOTO DA PLACA QUE CONTÉM O MICROCONTROLADOR PIC16F877, E O CIRCUITO MAX 232



5.3.5 O gerenciamento da informação

No PC é instalado um *software* que monitora, em tempo real, o sinal proveniente do sensor, compara com um sinal de referência, comunica permanentemente o estado dos sensores (tração nos cabos) e aciona um contato em uma de suas saídas no caso de ocorrência de um desvio, identificando o rompimento de um cabo e permitindo ações cabíveis do usuário. O *software* é baseado na plataforma do tipo LabVIEW [48], da National Instruments, que permite uma interação amigável com um usuário e com acesso à informação do desvio através de um aviso sonoro, luminoso, ou ainda, uma atuação automática de dispositivos de proteção e segurança como, por exemplo, disjuntores para desligamento dos circuitos sob avaliação.

O processo pode, ainda, ser estendido para um número maior de sensores, tendo em vista que cada sensor terá seu sinal digital de saída identificado e diferenciado dos demais. A transmissão de sinal a distâncias maiores que aquelas cobertas por rádio, pode ser realizada através da telefonia celular ou por meio de satélite.

5.4 TESTES E RESULTADOS

O desenvolvimento e respectivos testes do sistema de detecção de rompimento de condutor foram realizados em quatro etapas distintas que são, a seguir, discriminadas.

5.4.1 Célula de carga construída no LACTEC e transmissão de sinal por meio de cabo

Inicialmente foram realizados testes em bancada com um isolador de ancoragem, usando uma célula de carga construída no LACTEC cujo sinal foi transmitido por meio de cabo elétrico. Esses testes foram, posteriormente, realizados na rede experimental simulando o rompimento do condutor de uma das fases. O teste na rede foi importante porque foi feito em condições muito próximas à realidade de um cabo rompido. A figura 54, a figura 55 e a figura 56 mostram fotos do teste. Nesses testes ficou evidenciado que o rompimento do cabo é percebido pela célula, mas a transmissão por meio de cabo restringe demasiadamente a abrangência da utilização do sistema. Como pode ser observado nas figuras, nessa etapa a célula de carga se caracteriza por ser um corpo independente do isolador. Na figura 55 verifica-se a existência de uma haste localizada transversalmente ao poste. Trata-se de uma peça aterrada que tem a finalidade de provocar um curto-circuito franco à terra quando tocada pelo cabo, não sendo parte do objeto dessa tese.

FIGURA 54 - ISOLADOR POLIMÉRICO DE ANCORAGEM COM CÉLULA DE CARGA E TRANSMISSÃO DE SINAL POR CABO ELÉTRICO. DETALHE COM EVIDÊNCIA DA CÉLULA DE CARGA

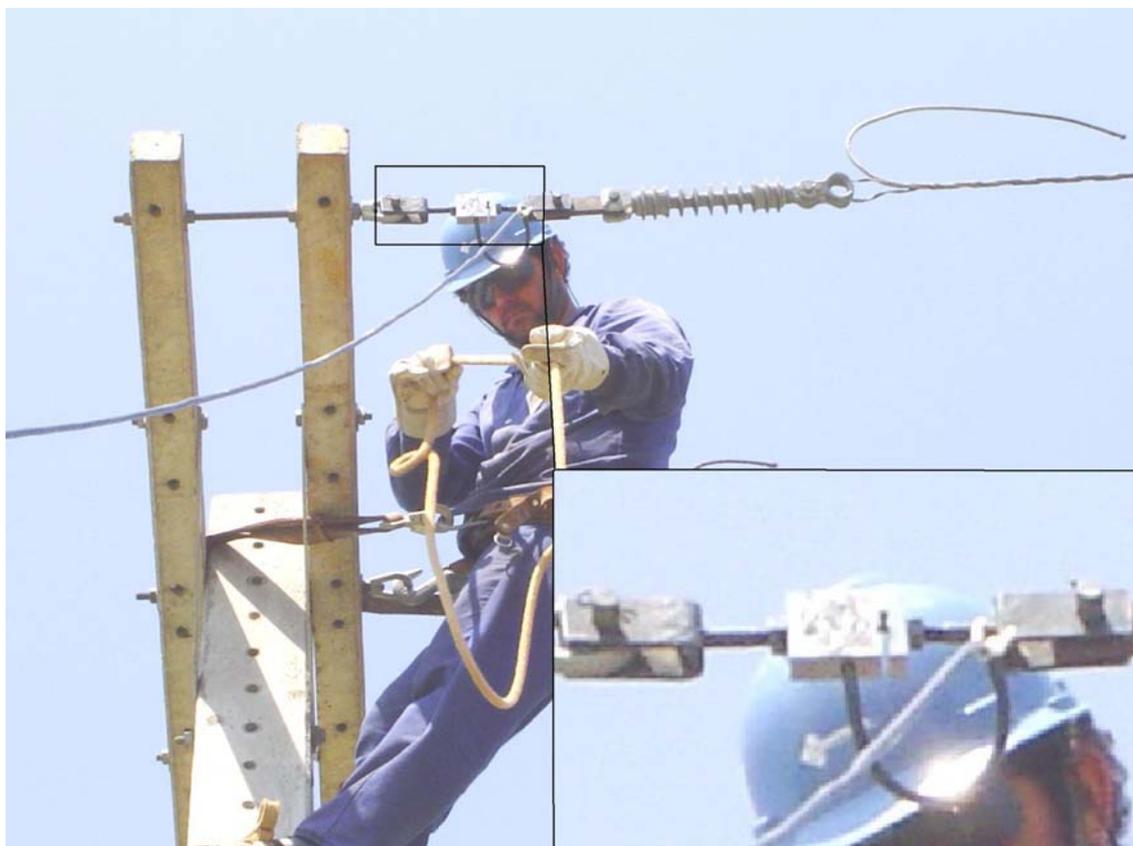


FIGURA 55 - SIMULAÇÃO DE CONDUTOR ROMPIDO

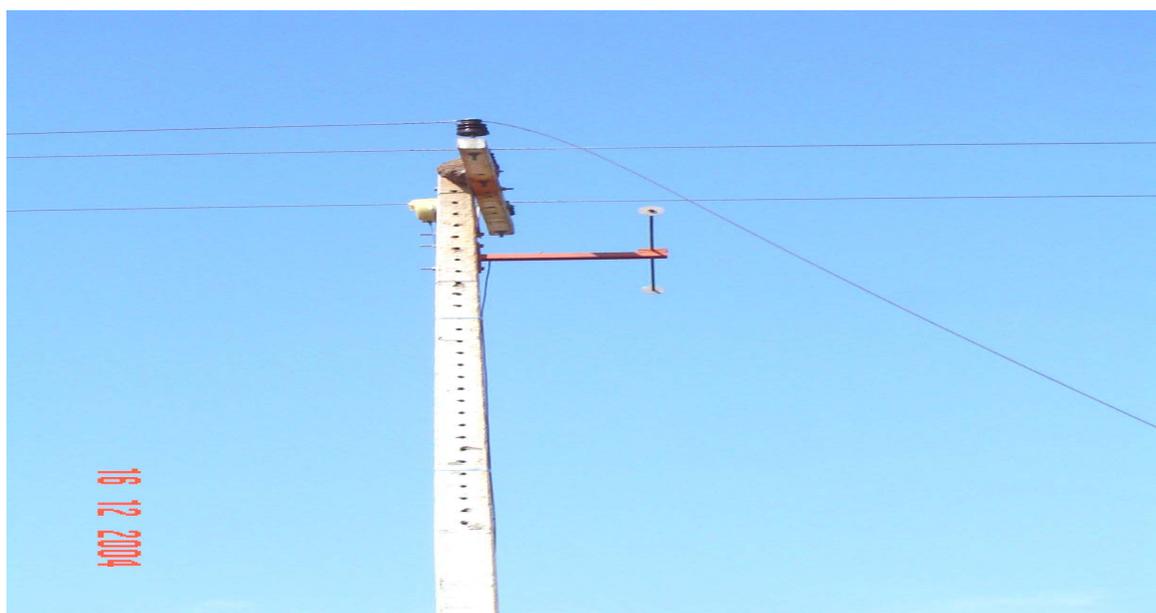


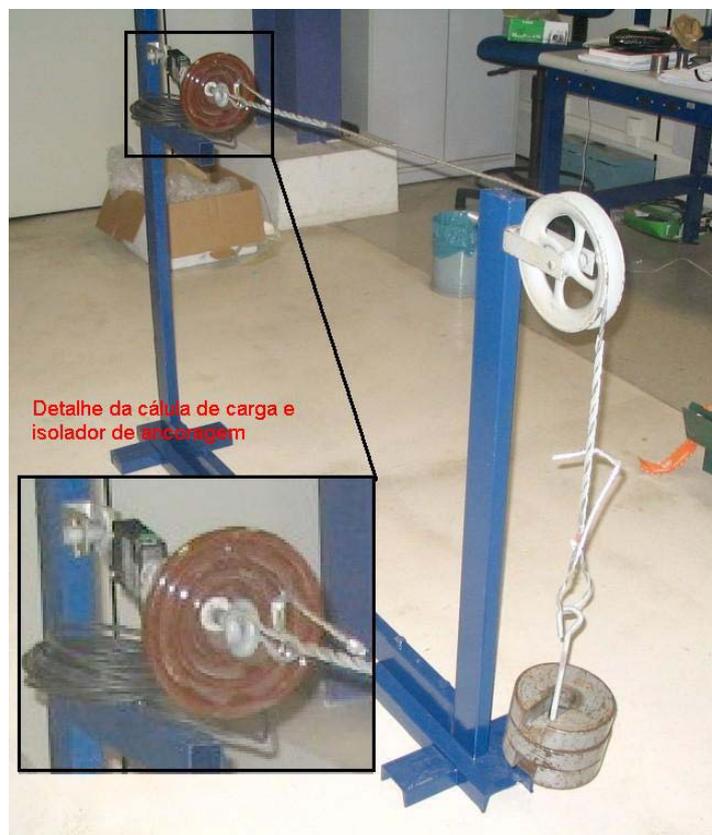
FIGURA 56 - ISOLADOR POLIMÉRICO DE ANCORAGEM E CÉLULA DE CARGA CONSTRUÍDA NO LACTEC



5.4.2 Célula de carga construída no LACTEC e transmissão de sinal por meio de rádio.

Nessa segunda etapa foi estudada a transmissão de sinal por meio de rádio e construída uma bancada para testes em laboratório, para simulação do rompimento do condutor. Manteve-se a utilização de uma célula de carga convencional, um isolador de ancoragem, a transmissão via rádio e com recepção de sinal à distância de alguns metros. Testes foram realizados nessa configuração, com sucesso. O arranjo do ensaio pode ser visto na figura 57.

FIGURA 57 - BANCADA PARA SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO. ISOLADOR DE ANCORAGEM COM CÉLULA DE CARGA COMERCIAL, TRANSMISSOR E RECEPTOR DE SINAL VIA RÁDIO



5.4.3 Isoladores instrumentados pela técnica da extensometria e transmissão de sinal por meio de rádio

A terceira etapa dos testes se deu sobre os isoladores instrumentados prescindindo, dessa forma, da célula de carga. Utilizou-se um isolador instrumentado em laboratório pela aplicação de extensômetros em seu corpo. Inicialmente foi preparado um isolador de pino e, posteriormente, outro de ancoragem. Por meio da bancada de laboratório foi possível simular o rompimento do condutor. Foi verificado que o isolador possui sensibilidade suficiente para detectar o rompimento, e que o sinal emitido pelo isolador foi transmitido com sucesso numa sala ao lado, onde se encontravam o receptor e o microcomputador. O microcomputador se comunica com a porta serial do receptor através de sinais condicionados aos níveis de tensão compatíveis ao protocolo de comunicação RS-232 permitindo, dessa forma, um acesso da concessionária a um sinal para conseqüente tomada de providência de

sua área de Operação. A figura 58 e a figura 59 mostram o arranjo do teste. Com a conclusão da terceira fase de testes, se confirmou a viabilidade do sistema, que percebe o rompimento do condutor através da variação da tração mecânica, que comunica esse rompimento através do meio eletromagnético, e que permite ação por parte da concessionária em tempo hábil para que se evitem indesejáveis acidentes. O tempo de resposta do sistema, desde a simulação do rompimento do cabo até a resposta de saída do microcomputador é da ordem de 1 segundo, valor considerado aceitável para essa aplicação. Na figura 61 são mostradas as telas de aviso à Operação relativas ao estado do condutor.

FIGURA 58 - FOTOGRAFIA MOSTRANDO UM ISOLADOR DE PINO INSTRUMENTADO, MONTADO EM BANCADA COM TRANSMISSÃO DE SINAL VIA RÁDIO



FIGURA 59 - DETALHE DO ISOLADOR DE PINO INSTRUMENTADO



FIGURA 60 - FOTO DO PROTÓTIPO PARA O SISTEMA DE RECEPÇÃO POR RÁDIO INSTALADO NA BANCADA DE LABORATÓRIO.

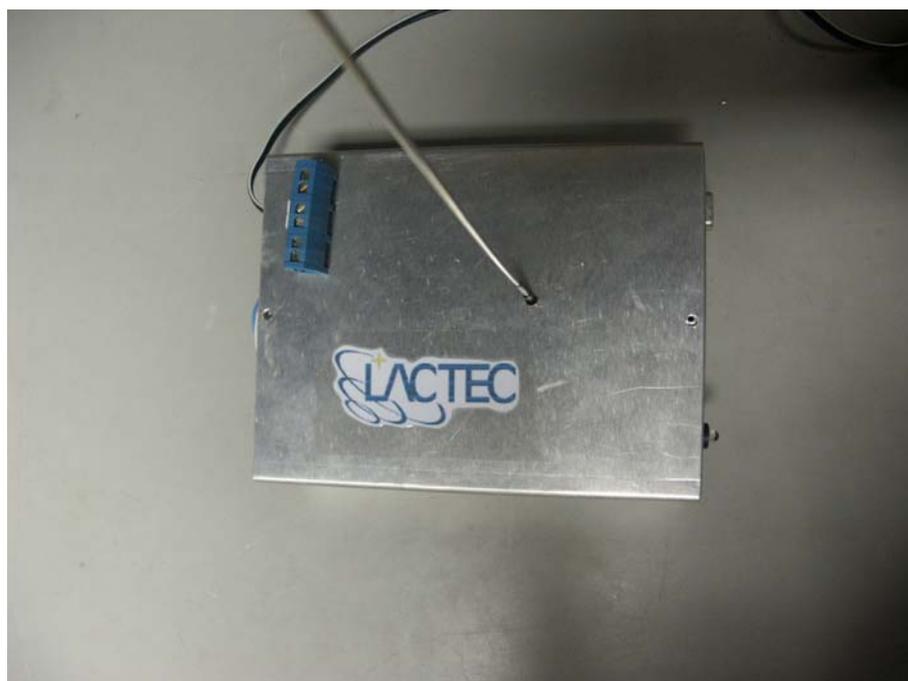


FIGURA 61 - FOTOS MOSTRANDO AS TELAS DE AVISO À OPERAÇÃO RELATIVAS AO ESTADO DO CONDUTOR



5.4.4 Testes da rede experimental de distribuição

Até a etapa anterior se trabalhou com um conjunto composto por um único isolador instrumentado. A realidade do setor elétrico requer que sejam considerados circuitos trifásicos. No que diz respeito à proteção de uma rede real de distribuição, deve ser prevista a instalação de um conjunto, trifásico, de sensores ao longo da rede, distanciados de tal forma a assegurar a comunicação do rompimento de condutores e identificar o local e a fase rompida. Nessa etapa, foram desenvolvidos novos sistemas de transmissão e de recepção de sinais. No que diz respeito à transmissão, foi projetado e construído um conjunto para atender três isoladores instrumentados, um para cada fase da rede. Uma única unidade de transmissão, também fixada ao poste, recebe os sinais provenientes de cada sensor, e os transmite. Cada sinal é unívoco, com endereço próprio, fazendo com que o sistema reconheça qual dos sensores sofreu atuação. No que diz respeito à recepção, foi projetado e construído um conjunto para receber um volume de sinais transmitidos por, pelo menos 90, isoladores instrumentados e reconhecê-los, univocamente. Ou seja, basta uma unidade de recepção para atender diversas unidades de transmissão.

Nessa quarta etapa foram realizados testes na rede experimental na qual foi testado um conjunto de três isoladores de pino, um em cada fase, instrumentados, e submetidos a um rompimento simulado em cada uma das fases. O sistema de transmissão foi instalado junto aos três isoladores, no mesmo poste. A

recepção foi posicionada à distância, e instalada na casa de comando da rede experimental. O conjunto foi ajustado de modo ter sensibilidade para reconhecer o rompimento do condutor. Foi constatado, ainda, que o sinal de cada isolador foi unívoco, de modo que o sistema reconhece qual dos isoladores foi acionado pela ação de rompimento.

O conjunto ficou exposto ao tempo por quinze dias sob a ação de intempéries climáticas, e não foi registrado qualquer problema no que diz respeito à funcionalidade. Concluiu-se que o protótipo apresentou boas condições de confiabilidade e resistência a agentes externos. A figura 62 apresenta foto da instalação dos dispositivos na rede experimental.

A aplicação da técnica da extensometria no desenvolvimento de sensores e de um sistema para detectar o rompimento de condutores elétricos é inédito, não tendo sido encontrada menção de sua existência, tanto na literatura disponível, como nos endereços de busca de patentes. Para proteger e assegurar a propriedade, foi realizado um depósito de pedido de patente junto ao INPI em 17/08/2005 sob o número PI0503502-3, sob o título “Sistema de detecção e comunicação de rompimento de condutor elétrico em redes de distribuição de energia elétrica”.

FIGURA 62 - FOTO DOS ISOLADORES DE PINO INSTRUMENTADOS PELA TÉCNICA DA EXTENSOMETRIA INSTALADOS EM POSTE CONVENCIONAL. A IMAGEM CONTÉM, TAMBÉM, O CONJUNTO DE TRANSMISSÃO DE SINAL ATRAVÉS DE RÁDIO (CAIXA FIXADA AO POSTE)



A figura 63 mostra o momento da aquisição dos dados durante os testes na rede experimental de distribuição.

FIGURA 63 - FOTO NO MOMENTO DA AQUISIÇÃO DO SINAL TRANSMITIDO PARA A CASA DE CONTROLE DA REDE EXPERIMENTAL



A FIGURA 64 mostra a recepção do sinal no momento do teste e evidencia a característica do referido sinal. A Figura 65 apresenta o *lay-out* da tela do monitor em duas condições, com identificação unívoca do sensor atuado. À esquerda da figura, está retratada uma condição de operação normal, relativa ao poste 10, fase A. À direita, uma condição de cabo rompido.

FIGURA 64 - FOTO DO SINAL TRANSMITIDO E RECEBIDO EM CÓDIGO ASCII

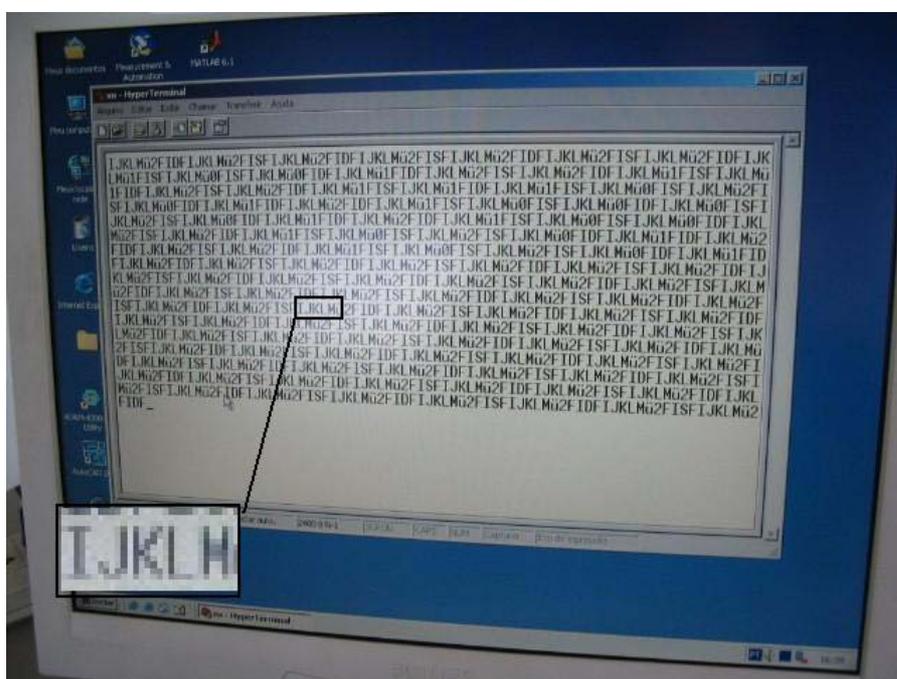
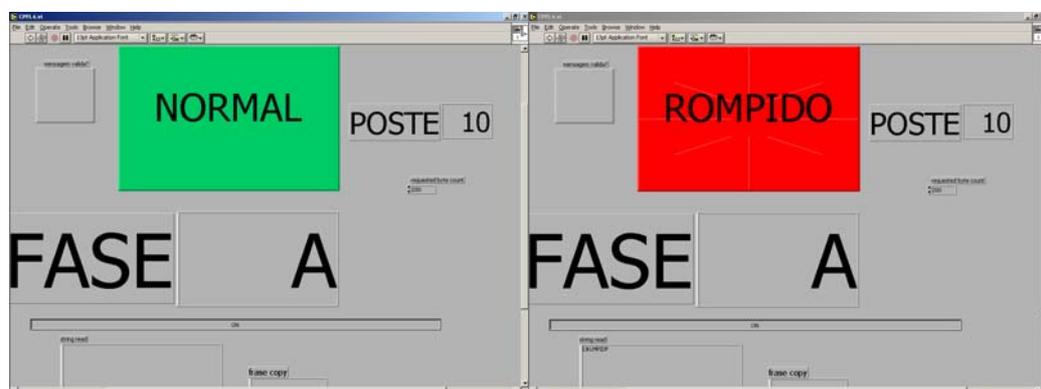


FIGURA 65 - FOTO DO SINAL UNÍVOCO RECONHECIDO ATRAVÉS DO LABVIEW E COM A CONFIGURAÇÃO DISPONIBILIZADA AO OPERADOR DA CONCESSIONÁRIA



6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

6.1 CONCLUSÕES

O problema relacionado ao rompimento de condutores em redes de distribuição de energia continua sendo alvo de estudos e de preocupação do setor elétrico nacional e mundial, pelo risco que impõe aos seres vivos, e pela perda pecuniária imposta às empresas de energia elétrica e à sociedade.

Esse trabalho procura trazer resultados que objetivam mitigar as conseqüências do rompimento, sem ter, contudo, a pretensão de trazer soluções de amplo espectro, tendo em vista a abrangência do problema.

A abordagem adotada na realização do estudo procurou, inicialmente, determinar as causas do rompimento, estudar os fenômenos físicos envolvidos e apresentar sugestões para que o rompimento possa ser evitado. Para situações em que o rompimento não pôde ser evitado, foram estudadas duas possibilidades da detecção, uma com o componente primordial de caráter eletro-eletrônico e outra com ênfase em propriedades mecânicas.

O estudo das principais causas do rompimento revelou que são três os principais fatores que o originam. Esses fatores foram estudados e, para mitigar o risco de sua ação, medidas foram sugeridas.

No que diz respeito à detecção do rompimento, a solução de caráter eletro-eletrônico, que conta com a instalação de sensores de corrente em cada uma das fases, foi testada no laboratório experimental e em bancada, com sucesso. A filosofia empregada se mostrou consistente, assim como o processo de detecção da falta de alta impedância, a recepção e transmissão do sinal e o seu tratamento, com aplicação de um programa compatível e amigável ao usuário. Os resultados foram motivadores para que se persista confiando nessa solução, que ainda requer estudos complementares para redução do tempo de resposta do sistema. A determinação do rompimento através do monitoramento da carga mecânica, fundamentada na técnica da extensometria, trouxe resultados promissores. A instrumentação de isoladores de ancoragem e de pino se mostrou viável, com a

construção de protótipos de laboratório. Os isoladores instrumentados apresentaram a sensibilidade suficiente para detecção da mudança da tensão mecânica do cabo ao ser rompido. A aplicação dos frágeis extensômetros, quando bem protegidos mecanicamente, não inviabilizam a utilização dos isoladores em campo. O tratamento eletrônico de sinal na transmissão e na recepção, o uso desse sinal de saída com adoção de um programa amigável ao usuário, assim como o tempo de resposta do conjunto, se mostraram confiáveis.

Foi realizada uma análise preliminar de custos para instalação dos dois sistemas desenvolvidos, tomando como referência a aplicação em uma rede de característica semelhante àquela apresentada na figura 21, composta por um alimentador e respectivos ramais. Para fins dessa avaliação estimativa, considerou-se a aplicação dos sensores para cobrir um comprimento de trinta quilômetros de rede. Para o caso em que sejam utilizados os sensores de corrente, estima-se a necessidade de dezoito sensores cujo custo está estimado em R\$6.000,00 por unidade. Foi também orçado o conjunto para receber e tratar as informações, estimado em R\$10.000,00, sendo que o total dessa opção monta em R\$118.000,00. Para a utilização dos isoladores instrumentados, seria necessária a utilização de trinta conjuntos, cada um composto por três sensores e uma unidade de transmissão, orçado em R\$2.000,00 cada. Ainda deve ser considerada uma unidade para recepção das informações, orçada em R\$12.000,00. Nessa opção, o total estimado é de R\$72.000,00.

A realização desse trabalho se fundamentou em diferentes áreas da Engenharia. Da área de Instrumentação e Controle foram buscados os conceitos que permitiram o controle do laboratório experimental de cabos, com instalação de sistema de medição e controle de temperatura no condutor e o correspondente ajuste da fonte de corrente. Da Eletrotécnica vieram os conceitos para projetar as fontes de corrente e de tensão; os sistemas de comando e proteção do laboratório, e a filosofia de detecção de FAIs pela circulação de correntes que sofrem defasamento quando submetidas a FAIs. Da área de Comunicação de Dados aplicaram-se os

conhecimentos na transmissão e recepção de sinais através do meio eletromagnético. Da Eletrônica, o projeto e confecção das placas de circuito impresso utilizadas no tratamento dos sinais transmitidos e recebidos. Da Tecnologia da Informação, os conhecimentos em programação, do MPLAB para programação do microcontrolador; do ANSYS na simulação de tensões nos cabos submetidos a elementos de agressão mecânica; do LabVIEW na visualização, em tela, das condições dos condutores, e na conversão do sinal de rompimento em um comando, que permite a ação da concessionária. Da Mecânica, o estudo das características mecânicas dos cabos, com obtenção de resultados em bancada; e a utilização da sofisticada técnica da extensometria numa aplicação inédita e promissora. Da área de Engenharia de Projetos, no projeto e construção do laboratório experimental.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos até então, possibilitam a abertura de oportunidades para a continuidade do trabalho que são, a seguir, sugeridas. Vislumbra-se a possibilidade de converter o protótipo em um produto que possa, ao término dessa fase, ser comercializado. Algumas barreiras, no entanto, deverão ser vencidas, dentre as quais citam-se.

- a) Avaliação de desempenho dos sensores instrumentados sob tensão de 13,8 kV, acompanhada da respectiva adoção de medidas que permitam uma operação segura e confiável.
- b) Determinar uma fonte apropriada de energia, autônoma ou de maior capacidade que a atual, que atenda a demanda operacional do sistema. Avaliar possibilidades como, por exemplo, uso da energia solar, de bateria, ou de capacitores. Implantar a fonte no sistema.
- c) Determinar modalidade de comunicação de maior alcance. Estudar aplicação de telefonia celular, por satélite, rádio de longo alcance, transmissão por meio físico a estilo do *carrier*, no qual o sinal é transmitido pelos próprios condutores de energia, etc.

d) Estudar e desenvolver um protocolo de comunicação para operação em rede, com a instalação de pelo menos 15 sensores (isoladores instrumentados) numa rede real, com seus respectivos ramais. Assegurar identificação unívoca de cada sensor, tratamento de dados e comunicação à Operação da concessionária para providências cabíveis (desligamento, alarme, etc.).

e) Otimizar o processo de medição de tração. Até o momento é possível verificar se há tração ou não, ou seja, se o cabo está íntegro ou rompido, num sistema *on-off*. Um processo otimizado de medição permitirá o acompanhamento em tempo real da tração no condutor, que varia em função da corrente, de cargas mecânicas, de condições climáticas, etc. As informações serão transmitidas à Operação da concessionária. Os eventos serão hierarquizados, poderão ser comunicados por e-mail, utilizados para acionamento de processos de segurança e controle da concessionária, e armazenados em banco eletrônico de dados.

f) Converter os protótipos em unidades pré-série para posterior fabricação. Realizar projetos detalhados dos sensores e do sistema de comunicação. Produzir desenhos construtivos para fabricação das unidades pré-série. Caracterizar e especificar os materiais e componentes. Adequar e detalhar os processos de instrumentação dos isoladores, para aplicação em condições de produção em escala industrial. Estudar a possibilidade da fabricação, pelo mercado, de extensômetros de uso dedicado, com menor custo. Construir uma unidade pré-série para posterior transferência para uma empresa do setor produtivo, e transformação da unidade pré-série em produto.

g) Dar um passo à frente aos isoladores instrumentados, desenvolvendo novo processo de instrumentação. Estudar a possibilidade da criação de acessórios inéditos que, acoplados aos isoladores convencionais, identifiquem o rompimento dos cabos, sem que haja perda do NBI das redes. Os acessórios seriam um conjunto de anéis ou extensores,

instrumentados, que seriam acoplados aos isoladores. Estudar a possibilidade de verificar a tração pelo sistema piezelétrico com utilização, por exemplo, de cristais de quartzo, como alternativa à extensometria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N.; GAMBOA, L. R. A. Projeto cabos ao solo – Relatório da Segunda Etapa. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, mar. 2003. Relatório técnico 6194/2003.
2. ALBERTI, E. Avaliação da arborização urbana com as redes de distribuição de energia elétrica da CPFL, estudo de podas, noções de custo, noções de legislação e interrupções de energia causadas pela abrasão com árvores. **Relatório parcial do projeto Cabos ao Solo. Etapa 15.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, abril 2004. Relatório técnico MEC 15/2004.
3. OLIVEIRA, O. F.; CHAGAS F.; NOVA I. ; SANTOS L; GARRIDO, R. Estado da arte em proteção de alimentadores de 15kV para defeitos à terra com alta impedância de contato. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., 2002, Salvador. **SENDI 2002. Anais...** Salvador: Coelba, 2002.
4. TENGDIN, J.; WESTFALL, R.; STEPHAN, K. **High Impedance Fault Detection Technology**, Report of PSRC Working Group D15. Mar. 1996. Disponível em: www.pes-psrc.org/d/D15MSW60.html Acesso em 18/09/2003.
5. AUCOIN, B. M.; JONES, R. H. High impedance fault detection implementation issues. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, Vol. 11, nº 1, Jan. 1996.
6. MAMISHEV, A. V.; RUSSELL, B. D.; BENNER C. L. Analysis of High Impedance Faults Using Fractal Techniques. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, Vol. 11, nº 1, Feb. 1996.
7. KEZUNOVIC, M. A survey of neural net applications to protective relaying and fault analysis, **Engineering Intelligent Systems**, vol. 5, nº 4, Dec. 1997.
8. JIALI, H.; SHANSHAN, L.; GANG, W.; YONGLI, L.; YUQIAN, D.; KEZUNOVIC,

- M. Implementation of a distributed digital bus protection system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, Vol. 12, nº 4, Oct. 1997.
9. Report of the CIRED Working Group WG03, Fault Management in Electrical Distribution Systems, Esp., Dec. 1998.
 10. HICKERY, D. L.; BARTLETT, E. J.; MOORE, P. J. **Investigation into physical and electrical processes of power system fault arcs**, Proceedings of 34th Universities Power Engineering Conference – UPEC 99, Leicester University, Sept 1999, Vol. 2, pp 575-578.
 11. ROBERTS, J.; HOU, D.; CALERO, F.; ALTUVE, H.J. **New Directional Ground-Fault Elements improve Sensitivity in Ungrounded and Compensated Networks**, Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman, USA. 2001.
 12. HÄNNINEN, S. Single phase earth fault in high impedance grounded networks. characteristics, indication and location. Helsinki 2001. PhD Thesis, Helsinki University of Technology.
 13. Proyecto OD98UN18, **Análisis y Registro de Faltas de Alta Impedancia**, Depto. Electrónica y Telecomunicaciones UPV/EHU, 1998. Disponível em: <http://www.spri.es/tecnologia/tic/proyectos/OD98UN18.html>.
 14. STOUPIS, J.; MAHARSI, M.; NUQUI, R.; KUNSMANN, S.; DAS, R. **Reliable detection of high impedance faults caused by downed conductors**. Disponível em www.abb.com/global/abbzh. EUA, 2005.
 15. PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N.; GAMBOA, L. R. A. **Projeto cabos ao solo – Relatório Parcial**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, out. 2002. Relatório Técnico 3890/2002.
 16. PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N.; GAMBOA, L. R. A. **Projeto cabos ao solo – Relatório da Primeira Etapa**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, dez. 2002. Relatório Técnico 5064/2002.

17. OLIVEIRA, A. A. S.; D'ALMEIDA, J. C. S.; MEDEIROS, C. P. Avaliação dos efeitos das descargas atmosféricas nos principais condutores utilizados em redes de distribuição elétrica rural. Rio de Janeiro: CEPEL, 2001. Relatório técnico.
18. RAVAGLIO, M. A.; HENKE, S. L. Avaliação do desempenho de cabos convencionais e OPGW, com e sem revestimento extra à base de zinco, frente a descargas atmosféricas. Curitiba: LACTEC, 2001. Relatório técnico AELE 1164/2001.
19. LOEWENTHAL, C. F. **Avaliação dos efeitos de descarga atmosférica em cabos OPGW** – normalização do método de ensaio. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16., 2001, Campinas, **Anais...** Campinas: CESP, 2001.
20. TOLBERT, L.M.; CLEVELAND, J.T.; DEGENHARDT, L.J. Reliability of lightning resistant overhead distribution lines. **IEEE Industrial & Commercial Power System Conference**, San Antonio. May 1995. p. 147-152.
21. CHISHOLM, W.A.; CRESS S.L.; POLAK, J. **Lightning-caused distribution outages**, IEEE 2001.
22. PARRAUD, R.; BROCARD, E.; LODI, Z.; NAMORA, M. **Sistemas de isolamento para melhorar a qualidade do serviço em ambiente tropical**, In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., 1999, Foz do Iguaçu, **Anais...**, COPEL, 1999.
23. CARVALHO, A.M.; CAZETTA FILHO, M.S.A.A.; CARVALHO, A.C.; CHERCHIGLIA, L.C.L.; DINIZ, J.H. **Tecnologias para análise e melhoria do desempenho de instalações de transmissão frente a descargas atmosféricas**, In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., 1999, Foz do Iguaçu, **Anais...**, COPEL, 1999.
24. ROCHA, A. C. O.; OLIVEIRA, J.F. Analysis of the occurrence of a three-phase short-circuit due to lightning on CEMIG extra-high voltage system, IPST '01 - Rio de Janeiro, Brazil, June 24-28, 2001.

25. GIN, R.B.B.; PINTO, I. R. C. A.; PINTO JR. O.; MENDES JR. O. **Descargas atmosféricas no sudeste do Brasil**, In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 1997, Belém, **Anais...** 1997.
26. CHOWDHURI, P. **Parameters of lightning strokes and their affects on power systems**, IEEE/PES T&D Task Force on Parameters of Lightning Strokes, 2001.
27. KAPPENMAN, J.G.; GORDON, M.E.; GUTTORMSON, T.W. High-precision location of lightning-caused distribution faults. IEEE 2001.
28. KAPPENMAN, J.G. Distribution Lightning Fault Correlation & advanced applications of lightning data. IEEE T&D Conference, New Orleans, April 1999.
29. MAHANFAR, A.; MOINI, R.; SADEGHI, S.H.H.; BONYADI-RAN, S. A novel automated detection of electromagnetic fields due to lightning stokes. IEEE, 2001.
30. DIENDORFER, G.; SCHULTZ, W.; RAKOV, V.A. Lightning characteristics based on data from the Austrian lightning locating system. IEEE, 1998.
31. LEES, M. I.; Lightning activity in the UK. IEE, 1997.
32. KENNY, E.D.; HENKE, S.L. **Mapeamento do litoral paranaense quanto à corrosão atmosférica**. COPEL/LAC Comunicação Técnica 0011/1990.
33. CARNEVALLI C.; SICA Y.C. **Avaliação da corrosividade atmosférica da cidade de Curitiba**, 2003. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Química Ambiental, Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.
34. PENTEADO NETO, R. A. Difusão de íons em polietileno. Curitiba, 1996. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná.
35. MORAIS, E. L., GAMBOA, L. R. A.; PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N. **Projeto cabos ao solo – Relatório da Terceira Etapa**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, jun. 2003. Relatório técnico 6194/2003.

36. ANSYS, Inc. **ANSYS Multiphysics™**. Disponível em <www.ansys.com>. Acesso em: 12 ago. 2005.
37. ANSYS INC. CORPORATED. ANSYS Release 5.5.1, c1998.
38. MANNALA, M. J.; PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N.; GAMBOA, L. R.; SOUZA JR O. H.; **Projeto Cabos ao Solo – Relatório da Quarta Etapa**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, ago. 2003. Relatório técnico 8525/2003.
39. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7271**. Cabos de Alumínio para Linhas Aéreas. Rio de Janeiro, 1988
40. PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N. **Projeto cabos ao solo – Relatório da Quinta Etapa**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, fev. 2004. Relatório técnico 123/2004.
41. PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N.; GAMBOA, L. R. A. **Projeto cabos ao solo – Relatório da Sétima Etapa**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, maio 2003. Relatório técnico 6194/2003.
42. CPFL. Padrão Técnico **PT 122**. Estruturas padronizadas para redes aéreas de distribuição urbana; vols 1 a 5. São Paulo, 2001.
43. GAMBOA, L. R. A.; PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N. **Projeto cabos ao solo – Relatório Parcial do Primeiro Ciclo**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, jul. 2003. Relatório técnico 7987/2003.
44. PENTEADO NETO, R. A.; MANCINI E. F.; STENZEL, J.N. **Projeto Cabos ao Solo – Relatório Parcial da Nona Etapa**. Curitiba. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, nov. 2003. Relatório técnico 04/2003.
45. HAYT Jr., W. H., KEMMERLY, J. E. *Análise de Circuitos em Engenharia*. São Paulo: McGraw-Hill. 1975.

46. STEVENSON Jr., W. D. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1978.
47. CHUERI, I. J., GAMBOA, L. R. A.; PENTEADO NETO, R. A.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N. **Projeto cabos ao solo – Relatório da Décima Segunda Etapa** - Estudo e desenvolvimento de dispositivo de monitoramento de sinais eletromagnéticos. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, maio 2004. Relatório técnico 241/2004.
48. NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Graphical development software**. Disponível em <<http://www.ni.com>>. Acesso em: 12 ago. 2005.
49. BISHOP, R. H., **Learning with LabVIEW 6i**. New Jersey, Prentice-Hall, 2001.
50. HOFFMANN, K. **An introduction to measurements using strain gages**, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.
51. RIBEIRO E.P.; KUNTZE, J. **Extensômetro HBM LY11-6/120**, 2002. Disponível em: <<http://tesla.eletrica.ufpr.br/ie02/jackson>>. Acesso em: 12 ago. 2005.
52. BECKWITH, T. G.; MARANGONI R. D.; LIENHARD, J. H. **Mechanical Measurements**, 5 ed., Addison-Wesley Publishing Company, ISBN 0-201-56947-7, 1993.
53. FIGLIOLA R. S.; BEASLEY, E. D. E. **Theory and Design for Mechanical Measurements**, 3 ed. John Wiley, ISBN 0-471-35083-4, 2000.
54. VISHAY MEASUREMENTS GROUP. **Strain Gages and Accessories**. Disponível em <www.vishay.com>. Acesso em: 12 ago. 2005.
55. KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS Co., Ltd. Japan. **KYOWA Strain Gage Model Number Coding System**. Disponível em <<http://www.kyowa-ei.co.jp/>>. Acesso em: 12 ago. 2005.
56. FILIPPIN, C. G. **Procedimento para execução de ensaio de tensão residual pelo método do furo cego, segundo ASTM E837-01^{e1}**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, dez. 2003. Relatório técnico 9804/2003.

57. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Notas de aula. Disponível em <<http://www.lem.ep.usp.br/pef5794/AEE-INTRODUCAO>>. São Paulo. Acesso em: 15 nov. 2005.
58. SEDRA, A. S., SMITH, K. C. **Microeletrônica**, 4ª Edição. São Paulo: Makron Books, 2004.
59. PERTENCE Jr., A. Amplificadores operacionais e Filtros Ativos. Porto Alegre: Bookman, 2003.
60. MICROCHIP. Disponível em <<http://www.microchip.com>>: Acesso em: 01 out. 2005.
61. RADIOMETRIX. VHF Narrow Band FM Transmitter and Receiver. Watford, 2002. Catálogo.
62. SOUZA, D. J. Desbravando o PIC. São Paulo: Editora Érica, 2002.
63. PIROPO, B. Escritos – Portas seriais V:UART. Disponível em <www.bpiropo.com.br/tz980629.htm> Acesso em: 01 out. 2005.
64. DALLAS INSTRUMENTS. Maxim datasheet. RS 232 drivers/receivers. Disponível em <www.maxim-ic.com> Acesso em: 01 out. 2005.
65. COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL, Renato A Penteado Neto et al., Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. **Sistema de Detecção e Comunicação de Rompimento de Condutor Elétrico em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. PI0503502-3. 17 ago. 2005.