

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA
ÊNFASE ELETROTÉCNICA**

**KARINE KOU SUZUKI
PATRICK CARLOS KONDLATSCH
TCHESLEY SCHMIDT GOMES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM
CABOS BLINDADOS DE MÉDIA TENSÃO APÓS A REALIZAÇÃO DE
ENSAIO DE TENSÃO APLICADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2011**

**KARINE KOU SUZUKI
PATRICK CARLOS KONDLATSCH
TCHESLEY SCHMIDT GOMES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM CABOS
BLINDADOS DE MÉDIA TENSÃO APÓS A REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE
TENSÃO APLICADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Antônio Carlos Pinho, Dr.

**CURITIBA
2011**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente nossas famílias pelo apoio, incentivo e compreensão durante toda essa jornada acadêmica.

Aos amigos e colegas de estudo e trabalho, por toda a ajuda, cumplicidade, amizade e camaradagem pelos anos de curso, em especial nos momentos finais de elaboração de TCC.

Ao Professor Dr. Antônio Carlos Pinho, pela disponibilidade, solicitude, orientação, paciência, amizade e sobretudo pelo incentivo e apoio nos momentos de dificuldade durante a escrita do presente trabalho.

A todos os componentes da banca avaliadora deste Trabalho, pelas correções, sugestões e oportunidades de desenvolvimento proporcionadas.

Às empresas C&M Engenharia e Sincroniza Engenharia, pelo suporte e fornecimento de materiais e equipamentos durante os ensaios práticos de campo, e pela orientação prática para realização dos mesmos.

Ao Sr. Rogério Reinaldo Gogola, pela oportunidade de estágio na UTFPR e por todos os ensinamentos práticos e profissionais que, com certeza, serão seguidos por toda minha carreira (Patrick).

À C&M Engenharia pela primeira oportunidade de estágio, ingressando no mercado de trabalho, fazendo com que outras portas se abrissem em meu caminho (Karine).

À Sincroniza Engenharia pela oportunidade do desenvolvimento técnico-profissional, em especial ao Sr. Alexandre Mandeta pela amizade, paciência e todo o conhecimento cedido (Tchesley).

RESUMO

Com o atual crescimento industrial, social e tecnológico existente, as instalações elétricas também vêm evoluindo para suprir as demandas com qualidade e eficiência. Particularmente as instalações industriais vêm representando grande parcela do crescimento da demanda de energia elétrica no Brasil. Nesse âmbito, a utilização de cabos alimentadores de média tensão é altamente relevante para o funcionamento das instalações como um todo. O presente trabalho discute tópicos teóricos e práticos acerca dos procedimentos de ensaio e instalação dos cabos blindados de média tensão. Sabe-se que, ao realizar o ensaio de Tensão Aplicada nesse tipo de cabo, utilizando equipamento Hipot, eventualmente surge uma tensão residual de retorno nos terminais da amostra ensaiada. Essa tensão, além de não prevista, pode representar na segurança dos próprios operadores do ensaio. O trabalho apresenta um estudo aprofundado na teoria que envolve o surgimento de tensões residuais, bem como os fenômenos que causam tal aparição. Também são apresentados ensaios práticos, realizados tanto pelos autores do presente trabalho quanto por terceiros, a fim de parametrizar e exemplificar a medição da tensão de retorno nos cabos de média tensão. Por fim, são apresentadas sugestões de melhoria do sistema, tanto no que se refere à segurança do operador quanto na inibição da tensão de retorno após o ensaio com Hipot. O trabalho também apresenta como conclusão principal a confirmação do fenômeno de aparição da tensão residual, além de relatar a já existência de métodos para medição da tensão residual, e sua influência direta no ambiente profissional, quando da instalação e testes dos cabos de média tensão.

Palavras-chave: Eletromagnetismo. Efeito capacitivo. Polarização de dielétrico. Equipamento Hipot. Tensão residual.

ABSTRACT

With the current industrial, social and technological growth and development, the electrical installations have been evolving as well, in order to supply the needs in quality and efficiency. Particularly, industrial installations represent big part of the electrical energy demand in Brazil. In this area, the utilization of medium voltage power cables has been highly relevant for the installations' operation overall. The current paper discusses theoretical and practical topics about testing and installation procedures in shielded medium voltage power cables. It's known that, when performing the Applied Voltage test in this type of cable, using Hipot equipment, a residual voltage eventually arises between the two terminals of the tested sample. This voltage, besides being non-predicted, may represent danger, as much in the Hipot connection, resulting in undesired currents and eventual internal damage to the equipment, as in the operators' safety itself. The paper presents an in-depth study about the theory related to the appearance of residual voltages, as well as the phenomena that cause such appearance. It also shows practical tests, done by the authors of the current paper and others, in order to parameterize and exemplify the measurement of returning voltage in medium voltage power cables. Lastly, it shows suggestions of system improvement, related to the operator's safety, as much as inhibition of returning voltage after Hipot testing. The paper also brings forward as main conclusion the confirmation of returning voltage appearance phenomenon, and relates the existence of methods for residual voltage measurements, as well as its direct influence in the professional environment, while installing and testing medium voltage cables.

Keywords: Electromagnetism. Capacitive effect. Dielectric polarization. Hipot equipment. Residual voltage.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Elementos componentes da entrada serviço..... | 24 |
| Figura 2 – Esquemático de distribuição de energia elétrica | 24 |
| Figura 3 – Instalações elétricas de eletrodutos e eletrocalhas aparentes | 25 |
| Figura 4 – Estrutura do Cabo..... | 28 |
| Figura 5 – Cabo unipolar de média tensão | 28 |
| Figura 6 – Instalação ao ar livre | 32 |
| Figura 7 – Instalação em canaleta fechada no solo..... | 32 |
| Figura 8 – Instalação em eletroduto ao ar livre | 32 |
| Figura 9 – Instalação em banco de dutos..... | 32 |
| Figura 10 – Esquema elétrico de um medidor de resistência de isolamento..... | 34 |
| Figura 11 – Esquema de Ligação Hipot. | 34 |
| Figura 12 – Gráfico de tensão aplicada (V) por corrente (i) em um elemento puramente resistivo..... | 45 |
| Figura 13 – Gráfico de tensão aplicada (V) por corrente (i) em um elemento capacitivo | 45 |
| Figura 14 – Representação esquemática das correntes em um material dielétrico..... | 48 |
| Figura 15 – Polarização iônica em um material. Apresenta-se o material sem aplicação de campo elétrico (esquerda) e com o campo elétrico (direita)..... | 50 |
| Figura 16 – Polarização orientacional por dipolos | 51 |
| Figura 17 – Polarização por cargas especiais a partir de um Campo Elétrico aplicado | 52 |
| Figura 18 – Correntes de carga e descarga em um material dielétrico | 54 |
| Figura 19 – Circuito equivalente simplificado de um sistema isolante real..... | 56 |
| Figura 20 - Processo de Carga | 56 |
| Figura 21 - Processo de curto-circuito..... | 57 |
| Figura 22 - Processo de tensão de retorno..... | 57 |
| Figura 23 – Representação gráfica da tensão nos terminais de uma amostra, durante o teste de Tensão de Retorno | 58 |
| Figura 24 – Curvas características da tensão de retorno em cabos, conforme danos por envelhecimento | 59 |
| Figura 25 – Circuito dielétrico equivalente | 61 |
| Figura 26 – Circuito dielétrico equivalente, considerando os vários tipos de polarização..... | 62 |
| Figura 27 – Circuito equivalente do sistema de medição da tensão de retorno..... | 63 |

| | |
|--|-----|
| Figura 28 - Equipamento RVM Medidor automático de tensão de retorno | 64 |
| Figura 29 – Frequência da corrente elétrica em função do Limiar de Sensibilidade humano | 73 |
| Figura 30 – Caminho da corrente elétrica nos tipos de choque mais comuns | 75 |
| Figura 31 - Representação esquemática do circuito de testes para medida de tensão de retorno..... | 78 |
| Figura 32 - Esboço da configuração interna da chave. Com os contatos na posição 1 ocorre a carga, na posição 2 ocorre o curto-circuito, e na posição 3 ocorre o processo de medida. . | 79 |
| Figura 33 - Representação esquemática do circuito eletrônico para controle automatizado da chave..... | 80 |
| Figura 34 - Detalhamento da preparação das pontas dos cabos isolados. | 81 |
| Figura 35 - Representação esquemática do sistema utilizado para realização das medidas de tensão de retorno..... | 82 |
| Figura 36- Gráficos das curvas de tensão de retorno obtidas em função da temperatura. Amostras novas 1, 2 e 3; a), b) e c) respectivamente, amostras envelhecidas 1, 2 e 3; d), e) e f) respectivamente..... | 83 |
| Figura 37 – Tensão de retorno medida, para diferentes tempos de imersão das amostras..... | 85 |
| Figura 38 –Amostra de cabo preparada para medições, após o ensaio. | 86 |
| Figura 39 –Amostra de cabo preparada para medições, após o ensaio. | 87 |
| Figura 40 – Tensão de retorno medida, para diferentes tempos de imersão das amostras..... | 88 |
| Figura 41 - Preparação das terminações dos cabos, dimensões em milímetros. | 89 |
| Figura 42 - Esquema para determinação da corrente de fuga x tensão e corrente de fuga x tempo | 90 |
| Figura 43 - Esquema para determinação da capacitância e fator de dissipação..... | 91 |
| Figura 44 - Esquema para determinação da tensão de retorno com RVM Tettex..... | 91 |
| Figura 45 - Gráfico de Corrente de fuga x Tensão | 92 |
| Figura 46 - Corrente de fuga x Tempo | 93 |
| Figura 47 – Tensão máxima de retorno para tensões de carga de 1000 V CC e 2000 V CC. | 94 |
| Figura 48 – Esquemático do cabo de Média Tensão. | 98 |
| Figura 49 – Campo elétrico e vetor direcional na extremidade do cabo. | 99 |
| Figura 50 – Gráfico da capacitância do cabo, em função da secção nominal.. | 103 |
| Figura 51 – Circuito equivalente do cabo, para o ensaio de Tensão Aplicada..... | 104 |
| Figura 52 – Curva de decaimento da tensão no capacitor C..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Figura 53 – Equipamento Hipot instalado em bancada de serviço, antes da realização dos ensaios..... | 106 |
| Figura 54 – Vista do painel de controle do equipamento Hipot, com as respectivas conexões realizadas. | 107 |
| Figura 55 – Certificado de calibração do equipamento Hipot, incluso no mesmo e garantindo a validade dos dados obtidos. | 107 |
| Figura 56 - Extremidade do cabo isolada | 108 |
| Figura 57 - Extremidade preparada para receber os terminais do equipamento de teste. | 108 |
| Figura 58 – Terminais ligados ao cabo..... | 109 |
| Figura 59 – Formas de onda obtidas com o osciloscópio (ruído)..... | 110 |
| Figura 60 – Equipamento Hipot utilizado para a realização do ensaio 02. | 111 |
| Figura 61 - Extremidade a ser isolada. | 111 |
| Figura 62 - Extremidade conectada ao equipamento..... | 112 |
| Figura 63 - Terminais ligados ao cabo. | 112 |
| Figura 64 – Resultado obtido..... | 115 |
| Figura 65 - Resultado com pouca influência externa. | 116 |
| Figura 66 - Resultado com muita influência externa..... | 116 |
| Figura 67 – Tensão Aplicada e corrente de fuga no Ensaio I..... | 118 |
| Figura 68 – Curva de carregamento do capacitor formado no cabo, conforme tensão aplicada..... | 119 |
| Figura 69 – Comportamento da tensão residual (V) e da corrente de fuga (μA) do cabo em função do tempo (s) após zerar a tensão aplicada pelo Hipot para Ensaio 02..... | 120 |
| Figura 70 – Comportamento da tensão residual (kV) e da corrente de fuga (μA). | 120 |
| Figura 71 – Resistência elétrica da isolação ao longo do tempo. | 122 |
| Figura 72 – Tensão residual e Resistência em relação à corrente de fuga. | 122 |
| Figura 73 – Curva de descarregamento do cabo ao longo do tempo (s) para o Ensaio 02... | 124 |
| Figura 74 – Forma de onda aproximada da tensão residual no circuito sinalizador..... | 126 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Ligações do equipamento conforme tipo de cabo utilizado | 38 |
| Tabela 2 – Ocasões nas quais ensaios devem ser feitos, e suas respectivas tensões | 39 |
| Tabela 3 – Tensões de teste, conforme a tensão nominal do cabo ensaiado | 40 |
| Tabela 4 – Limites de sensação do corpo humano ao choque elétrico..... | 71 |
| Tabela 5 – Descrição das amostras de cabos novo e envelhecido, utilizadas nos testes de tensão de retorno..... | 80 |
| Tabela 6 - Tempo para o valor máximo de tensão de retorno | 93 |
| Tabela 7 - Grandezas físicas e suas unidades. | 97 |
| Tabela 8 – Capacitância de cabo isolado de Média Tensão, em $\mu\text{F}/\text{km}$ | 102 |
| Tabela 9 – Corrente de fuga do ensaio 01. | 109 |
| Tabela 10 – Corrente de fuga do Ensaio 02..... | 113 |
| Tabela 11 - Valores Obtidos no Ensaio 02, conforme tempo de ensaio..... | 121 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|--|
| AEIC | <i>Association of Edison Illuminating Companies</i> – Associação de Empresas de Iluminação Edison |
| AT | Alta tensão |
| CA | Corrente alternada |
| CC | Corrente contínua |
| Copel | Companhia Paranaense de Energia |
| DC | <i>Direct current</i> - Corrente contínua |
| EPDM | Terpolímero Etilenopropilenodieno |
| EPM | Copolímero Etilenopropileno |
| EPR | Etilenopropileno |
| HVDC | <i>High Voltage Direct Current</i> - Alta tensão em corrente contínua |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> - Comissão Internacional de Eletrotécnica |
| IPCEA | <i>Insulated Power Cable Engineers Association</i> – Associação de Engenharia de Cabos Isolados |
| NBR | Norma Brasileira |
| NR | Norma Regulamentadora |
| NTC | Norma Técnica Copel |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| ST2 | Policloreto de Vinila (designação de cobertura de cabos) |
| VDE | <i>Verband der Elektrotechnik, Elektronik Und Informationstechnik</i> – Associação de Eletrotécnica, Eletrônica e Tecnologia da Informação |
| XLPE | Polietileno entrecruzado |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|-----------------------------|
| A | Área de secção transversal |
| C | Capacitância |
| \vec{D} | Vetor indução eléctrica |
| \vec{E} | Vetor campo eléctrico |
| H | Comprimento de cabo |
| I | Corrente eléctrica |
| l | Comprimento |
| Q | Carga eléctrica |
| R | Resistência eléctrica |
| r | Raio |
| \vec{dS} | Vetor diferencial de espaço |
| t | Tempo de contacto |
| V | Tensão eléctrica |
| Z | Impedância |
| ρ | Resistividade eléctrica |
| ϵ | Permissividade eléctrica |
| τ | Constante de Tempo |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 | Tema | 16 |
| 1.1.1 | Delimitação do Tema..... | 16 |
| 1.2 | Problema e Premissas | 17 |
| 1.3 | Objetivos..... | 18 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 18 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 18 |
| 1.4 | Justificativa..... | 19 |
| 1.5 | Procedimentos Metodológicos..... | 20 |
| 2 | INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE MÉDIA TENSÃO..... | 22 |
| 2.1 | Aspectos gerais | 22 |
| 2.1.1 | Nível de Tensão de Instalação | 22 |
| 2.1.2 | Constituição de uma Instalação Elétrica de Média Tensão | 23 |
| 2.1.2.1 | Interligação Elétrica – Ramais Alimentadores | 25 |
| 3 | CABOS..... | 27 |
| 3.1 | Cabo de média tensão com isolamento em EPR | 27 |
| 3.1.1 | Construção | 27 |
| 3.1.2 | Composição dos cabos de média tensão | 27 |
| 3.1.2.1 | Condutor | 29 |
| 3.1.2.2 | Blindagem do Condutor..... | 29 |
| 3.1.2.3 | Isolação | 29 |
| 3.1.2.4 | Blindagem da isolação | 30 |
| 3.1.2.5 | Cobertura | 31 |
| 3.2 | Possíveis disposições | 31 |
| 4 | ENSAIO DE TENSÃO APLICADA | 33 |
| 4.1 | Instruções Iniciais | 33 |
| 4.2 | Principais Aplicações do Equipamento | 36 |
| 4.3 | Procedimentos Anteriores ao Ensaio | 36 |
| 4.3.1 | Aterramento e Segurança..... | 36 |
| 4.3.2 | Conexões de Alimentação de Energia no Sistema | 37 |
| 4.3.3 | Conexão dos Cabos Ensaçados | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4 Ajustes e Procedimentos de Ensaio | 38 |
| 4.4.1 Ajuste do Nível de Tensão..... | 38 |
| 4.4.1.1 Escolha do Nível de Tensão Adequado | 39 |
| 4.5 Medidas e Resultados do Ensaio | 40 |
| 5 POLARIZAÇÃO DE MATERIAIS DIELÉTRICOS | 41 |
| 5.1 Materiais Dielétricos..... | 41 |
| 5.1.1 Polietileno Entrecruzado (XLPE)..... | 43 |
| 5.1.2 Elastômero de Etilenopropileno (EPR) | 43 |
| 5.2 Dielétricos sobre Influência de Campos Elétricos Estáticos | 44 |
| 5.3 Propriedades Elétricas e Dielétricas | 46 |
| 5.3.1 Resistência Elétrica de Isolamento | 47 |
| 5.3.2 Resistividade Elétrica | 47 |
| 5.3.3 Resistência Elétrica..... | 49 |
| 5.4 Processos de Polarização | 49 |
| 5.4.1 Polarização Eletrônica | 50 |
| 5.4.2 Polarização Atômica (Iônica ou Molecular)..... | 50 |
| 5.4.3 Polarização Orientacional..... | 51 |
| 5.4.4 Polarização por Cargas Especiais | 51 |
| 5.4.5 Polarização Interfacial | 52 |
| 5.5 Resposta Dielétrica de um Material..... | 53 |
| 5.5.1 Descarga de Corrente..... | 53 |
| 5.5.2 Tensão de Retorno | 54 |
| 5.5.2.1 Técnica de Tensão de Retorno..... | 55 |
| 5.5.2.2 Teste de Ponto Único..... | 58 |
| 5.5.2.3 Fatores que Influenciam a Medida da Tensão de Retorno | 60 |
| 5.5.3 Modelagem de um Circuito Dielétrico e Características de um Sistema de Medição de Tensão de Retorno | 61 |
| 5.5.3.1 Circuito Dielétrico Equivalente | 61 |
| 5.5.3.2 Características de um Sistema de Medição de Tensão de Retorno | 62 |
| 6 SEGURANÇA | 65 |
| 6.1 EFEITOS DA ELETRICIDADE NO CORPO HUMANO | 65 |
| 6.1.1 O que é Eletricidade?..... | 65 |
| 6.1.1.1 Segurança e a Energia Elétrica | 66 |

| | |
|--|-----------|
| 6.1.2 O Choque Elétrico | 67 |
| 6.1.2.1 Tensão de Toque x Tensão de Passo | 68 |
| 6.1.3 Efeitos do Choque Elétrico no Corpo Humano | 69 |
| 6.1.4 Outros Fatores que Influenciam a Gravidade do Choque Elétrico | 69 |
| 6.1.4.1 Intensidade da Corrente Elétrica..... | 70 |
| 6.1.4.2 Natureza da Corrente Elétrica Envolvida | 72 |
| 6.1.4.3 Frequência da Corrente Elétrica | 72 |
| 6.1.4.4 Tensão Elétrica Existente | 73 |
| 6.1.4.5 Tempo de Exposição ao Choque | 74 |
| 6.1.4.6 Percurso da Corrente Elétrica | 74 |
| 6.1.4.7 Umidade do Organismo..... | 75 |
| 7 ESTUDO DE ENSAIOS..... | 77 |
| 7.1 Ensaio Prático Realizado por Bruno Nahuili Bressan | 77 |
| 7.1.1 Sistema de Comutação das Etapas da Tensão de Retorno..... | 78 |
| 7.1.2 Computador e Programas | 79 |
| 7.1.3 Circuito de Controle da Chave de Comutação | 79 |
| 7.1.4 Descrição e Preparo das Amostras | 80 |
| 7.1.5 Parâmetros e Procedimentos Adotados para as Medidas de Tensão de Retorno | 81 |
| 7.1.6 Resultados e Conclusões do Experimento..... | 82 |
| 7.2 Ensaio Prático Realizado por Muhammad I. B. Sujani | 84 |
| 7.2.1 Descrição Experimento..... | 84 |
| 7.2.2 Procedimentos para Medição..... | 86 |
| 7.2.3 Medição da Tensão de Retorno | 87 |
| 7.2.4 Conclusões do Experimento | 88 |
| 7.3 Ensaio Prático Realizado por Fernando Piazza | 88 |
| 7.3.1 Parâmetros e Procedimentos Adotados para as Medidas | 89 |
| 7.3.2 Experimentos | 90 |
| 7.3.2.1 Corrente de fuga x tensão CC e Corrente de fuga x tempo | 90 |
| 7.3.2.2 Capacitância e fator de dissipação..... | 90 |
| 7.3.2.3 Tensão de Retorno | 91 |
| 7.3.3 Resultados e Conclusões do Experimento..... | 92 |
| 7.4 Conclusões Sobre Estudos de Ensaios..... | 94 |
| 8 METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA OS ENSAIOS | 96 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 8.1 | Definição da Topologia | 96 |
| 8.2 | Cálculo das Características Elétricas do Sistema | 96 |
| 8.2.1 | Definição de grandezas | 97 |
| 8.2.2 | Cálculo do Campo Elétrico..... | 98 |
| 8.2.3 | Cálculo da Tensão Elétrica no Cabo..... | 101 |
| 8.2.4 | Cálculo da Capacitância do Cabo | 101 |
| 8.2.5 | Estabelecimento do Circuito Equivalente..... | 103 |
| 9 | ENSAIOS REALIZADOS | 106 |
| 9.1 | Ensaio 01 | 106 |
| 9.2 | Ensaio 02 | 110 |
| 9.3 | Acompanhamento de Ensaio - em Empresa Fabricante de Cabos | 114 |
| 9.4 | Conclusões dos Ensaios | 116 |
| 10 | RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS | 118 |
| 10.1 | Ensaio 01 | 118 |
| 10.2 | Ensaio 02 | 119 |
| 10.2.1 | Dados Obtidos Experimentalmente | 119 |
| 10.2.2 | Cálculos efetuados sobre os dados obtidos..... | 121 |
| 11 | SUGESTÕES DE MELHORIA NO SISTEMA | 125 |
| 11.1.1 | Sistema Sinalizador | 125 |
| 11.2 | DEFINIÇÃO DO SINAL DE ENTRADA..... | 126 |
| 11.2.1.1 | Tipos de Sinalização | 127 |
| 11.2.1.1.1 | Sistema de Aviso Sonoro..... | 127 |
| 11.2.1.1.2 | Sistema de Aviso Luminoso | 127 |
| 12 | CONCLUSÃO..... | 129 |
| 13 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 131 |
| 14 | REFERÊNCIAS..... | 132 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Estudo dos efeitos capacitivos em cabos blindados de média tensão após a realização do ensaio de tensão aplicada, a fim de determinar o tempo de descarga da tensão residual e a relação deste com fatores externos.

1.1.1 Delimitação do Tema

No atual modelo de desenvolvimento econômico, há a necessidade da expansão da infraestrutura existente, acarretando na implantação de novas indústrias, comércios e residências ou mesmo a ampliação das já existentes. Com esse aumento, tem-se um aquecimento do mercado elétrico, que a cada indústria, a cada comércio e a cada residência necessita de ampliação.

Nesse contexto, é imprescindível a expansão das redes de linhas elétricas, seja para atender às cargas remotamente instaladas ou para a ampliação de uma rede existente.

Focando a alimentação elétrica das novas cargas instaladas, são utilizados ramais elétricos, chamados de alimentadores, que podem ser divididos, entre outros aspectos, em classes de tensão. É nesse âmbito que está inserida a utilização de cabos de média tensão.

Nas instalações industriais de pequeno e médio porte, a utilização de condutores primários (tensão superior a 1 kV) se dá basicamente no ramal subterrâneo que interliga a rede de distribuição aérea da concessionária com a subestação consumidora da instalação... Em indústrias de maior porte, porém, é grande a aplicação de condutores primários, em cabo unipolar, alimentando as várias subestações de potência existentes em diferentes pontos da planta (MAMEDE, 2002, p. 118).

Em cada obra executada, é comum a necessidade da certificação para os cabos de média tensão. Desse modo, obrigatoriamente, é realizada a análise de desempenho dos alimentadores através de ensaios, entre outros, o de tensão aplicada. Tais ensaios são de grande relevância para garantir a confiabilidade da instalação, uma vez que asseguram a qualidade esperada dos cabos utilizados. (ELETROTESTE, 2010) “Esses ensaios são

destinados a demonstrar a integridade do cabo e seus acessórios, durante a instalação e após a conclusão desta”, segundo a NBR 7286 (ASSOCIAÇÃO..., 2001, p. 08).

Para a realização de tal ensaio a NBR 6881 (ASSOCIAÇÃO..., 1981, p. 04) diz que “A tensão a ser aplicada deve ser elevada a partir de um valor inicial o menor possível, mas não superior a 20% da tensão nominal dos cabos submetidos ao ensaio”.

Com a aplicação de tensão contínua, há um carregamento elétrico no cabo de média tensão e ocorre um fenômeno capacitivo em cabos blindados de média tensão.

No decorrer do teste a tensão injetada no cabo é elevada gradativamente. Pela NBR 6881 (ASSOCIAÇÃO..., 1981, p. 04) “O valor de tensão e o tempo de aplicação estão especificados nas normas validas para cada tipo de material.”, e que, para caso de cabos de EPR de 1 kV a 35 kV, de acordo com a NBR 7286 (ASSOCIAÇÃO..., 2001, p. 08) “Após a conclusão da instalação do cabo e seus acessórios, e antes destes serem colocados em operação, pode ser aplicada uma tensão elétrica contínua de valor igual a 80% do valor... durante 15 minutos consecutivos.”.

Segundo a NBR 6881 (ASSOCIAÇÃO..., 1981, p. 04) “Decorrido o tempo de ensaio especificado, a tensão deve ser diminuída com taxa de variação aproximadamente uniforme até o menor valor possível, mas não superior a 20% da tensão nominal do cabo; e em seguida, desliga o equipamento.”.

Nesse momento é possível notar que existe uma lacuna nas normas brasileiras, não apresentando informações a respeito do tempo e do método de descarregamento. Nesse contexto pretende-se determinar o tempo de descarga da tensão residual e a relação deste com fatores externos visando aumentar a seguranças dos operadores e podendo, posteriormente, buscar maneiras mais eficientes de se realizar a desenergização desses cabos.

1.2 Problema e Premissas

Após finalizar o teste de tensão aplicada, deve-se realizar um procedimento de desenergização do cabo condutor, porém, mesmo que o aterramento seja realizado de forma correta, é possível que o cabo ainda possua uma tensão residual alta o suficiente para causar um acidente.

Esse processo de desenergização, apesar de ser realizado com frequência, não é totalmente discriminado. Para que seja possível realizar o estudo do efeito capacitivo nos cabos, é preciso determinar quais e quantas são as capacitâncias envolvidas, como elas interagem entre si e com o ambiente externo e se essas capacitâncias possuem alguma influência sobre o valor da tensão residual (PAUL, 2006).

Além das capacitâncias, o tempo de descarga também é um fator importante no estudo, pois, caso ele tenha alguma relação com o comprimento do cabo, será possível determinar com mais precisão o tempo necessário para que ocorra a desenergização do cabo, gerando um ambiente de trabalho mais seguro.

A partir desses estudos, poderá, talvez, ser possível desenvolver soluções mais eficientes e rápidas para a descarga dos condutores, diminuindo o tempo de exposição dos trabalhadores em uma área de risco.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Determinar o tempo de descarga da tensão residual após a realização do ensaio de tensão elétrica contínua em cabos blindados de média tensão.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão teórica sobre cabos em instalações de média tensão;
- Determinar as características de cabos;
- Efetuar um estudo geral do choque elétrico em pessoas;
- Definir uma topologia para o estudo em um caso específico;
- Estudar o efeito da polarização em dielétricos;

- Descrever o funcionamento do equipamento de teste de tensão aplicada em cabos de média tensão;
- Descrever o teste realizado;
- Identificar, descrever e analisar os resultados fornecidos pelo equipamento;
- Descrever o circuito elétrico equivalente, identificando seus componentes relevantes, (impedâncias e interações eletromagnéticas) para uma determinada topologia;
- Realizar simulações para diferentes comprimentos;
- Verificar a possibilidade de generalização para outras topologias de cabos;
- Sugerir técnicas mais eficientes para redução do tempo de descarga do cabo, a fim de aperfeiçoar o procedimento de testes e disponibilizar maior segurança para os operadores.

1.4 Justificativa

De acordo com a NBR 7286 (ASSOCIAÇÃO..., 2001), devem ser realizados ensaios de tensão elétrica contínua e ensaios em corrente contínua. No presente trabalho, será abordado somente o primeiro ensaio. Os ensaios de tensão elétrica contínua, descritos na NBR 6881 (ASSOCIAÇÃO..., 1981), devem ser efetuados em qualquer ocasião durante a instalação e após a conclusão da instalação dos cabos, antes destes serem colocados em operação, podendo também ser efetuados após os cabos terem sido colocados em operação, desde que estejam dentro do período de garantia. Segundo a NBR 7286 (ASSOCIAÇÃO..., 2001, p. 08) “Esses ensaios são destinados a demonstrar a integridade do cabo e seus acessórios, durante a instalação e após a conclusão desta”.

Após a realização do ensaio, é possível verificar que o cabo ensaiado possui uma tensão residual e que, na NBR 6881 (ASSOCIAÇÃO..., 1981), não é especificado nenhum método de desenergização dos condutores. Essa tensão residual é capaz de causar acidentes ao ser humano caso seu valor seja elevado. Além disso, não há especificações quanto ao tempo necessário para que a desenergização ocorra. Segundo a NBR 6881 (ASSOCIAÇÃO..., 1981, p. 4) “Decorrido o tempo de ensaio especificado, a tensão deve ser diminuída com taxa de

variação aproximadamente uniforme até um valor menor possível, mas não superior a 20% da tensão nominal do cabo; e em seguida, desligar o equipamento”.

Diante deste fato, o desenvolvimento de um estudo dos efeitos capacitivos nos cabos de média tensão torna-se uma solução interessante nos dias de hoje, em que há uma grande preocupação com a segurança do trabalhador.

1.5 Procedimentos Metodológicos

Uma vez definidos os objetivos e propostas do trabalho, faz-se necessário efetuar procedimentos de teste, ensaios e pesquisas no que diz respeito a ensaios de cabos de média tensão. Além disso, pretende-se averiguar se há estudos já realizados no que tange o tema abordado e, por fim, apresentar conclusões coerentes com o trabalho em questão.

Inicialmente, será realizada uma pesquisa, tanto na bibliografia disponível como em empresas onde há aplicação prática dos procedimentos em questão, com o intuito de analisar como são desenvolvidos testes de tensão aplicada em cabos de média tensão atualmente.

Uma vez verificados os procedimentos de ensaio mais utilizados, é possível avaliar os resultados da pesquisa para então estabelecer uma tipologia única de estudo. Esta deve apresentar características comuns às utilizadas na prática, como método de instalação, classe de tensão do cabo, material da isolação, entre outros.

Em seguida, pretende-se efetuar o cálculo das características elétricas do sistema utilizado, envolvendo, portanto, capacitâncias (próprias e mútuas), resistências, impedâncias, e outras grandezas que se façam necessárias à parametrização do circuito.

Com os dados obtidos e a topologia definida e parametrizada, pretende-se realizar ensaios conforme o padrão de procedimentos existentes e, então, constatar a presença de tensão residual no cabo ensaiado. Também se espera observar como se dá a variação do tempo de descarga no cabo, bem como outros aspectos relevantes ao teste de tensão aplicada em geral.

Depois de feitos ensaios pertinentes e parametrizadas as características do sistema, será feito um estudo teórico da tensão residual observada nos cabos, levando em consideração fatores como possíveis causas do efeito em questão, relação entre a descarga do cabo com fatores externos, e influência desses fatores no aterramento e descarga do sistema.

Por fim, serão feitas considerações em relação a possíveis métodos de abreviação do tempo de descarga, a fim de atenuar os malefícios que o efeito capacitivo pode causar nos testes em questão. Serão apresentadas alternativas de instalação, procedimentos e montagem do teste favorecendo a redução do tempo de descarga.

2 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE MÉDIA TENSÃO

O seguinte capítulo apresenta aspectos gerais da teoria de instalações elétricas. Além de fornecer dados sobre instalações em geral, situa a principal utilização dos cabos de média tensão no escopo geral da Engenharia Elétrica.

2.1 Aspectos gerais

2.1.1 Nível de Tensão de Instalação

A classificação de tensão depende do contexto e que norma rege esse contexto. Segundo a NR 10 (Ministério do Trabalho e Emprego, 2005, p. 08), a definição é: “Alta Tensão (AT): tensão superior a 1000 volts em corrente alternada ou 1500 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra”. Para a Copel - Companhia Paranaense de Energia, a classificação de tensão é dividida em primária que é a tensão superior a 1000 V e inferior a 230 kV e secundária que é a tensão de fornecimento em baixa tensão (Menor que 1000 V). Para efeitos de considerações no desenvolvimento de trabalho, temos como base que média tensão é a classe de tensão que está contida no intervalo entre 1000 V a 36200 V conforme NBR 14039 (ASSOCIAÇÃO..., 2003).

As altas tensões são particularmente interessantes em equipamentos que trabalham com potências elevadas e no transporte de energia. No primeiro caso, pelo fato de diminuir a corrente e o aquecimento dos materiais daqueles, e no último caso pelo fato de minimizar as perdas – que são tão menores quanto maiores forem as respectivas tensões. Em contrapartida, tensões elevadas geram grandes complicações no que diz respeito à isolação dos equipamentos, e elevam muito a gravidade dos danos quando um acidente acontece (Presente, 2004, p. 3).

2.1.2 Constituição de uma Instalação Elétrica de Média Tensão

Entende-se por consumidor:

Pessoa física ou jurídica, ou comunhão de fato ou de direito, legalmente representada, que solicitar ao concessionário o fornecimento de energia elétrica e assumir a responsabilidade pelo pagamento das contas e pelas demais obrigações legais, regulamentares e contratuais. (NTC 903100, 2002, p 01).

Em maioria, quando se refere a instalações de média tensão para consumidores industriais ou comerciais, trata-se de interligações dos ramais de entrada que são segundo a Copel o “Conjunto de condutores e respectivos acessórios de conexão instalados após o ramal de ligação até a medição e/ou proteção” (NTC 903100, 2002, p 01), até a entrada de serviço que a partir desse ponto pode seguir para um transformador, conforme Figura 1, ou para um circuito terminal que, segundo Mamede (MAMEDE, 2002, p. 08), pode ser um motor que “numa definição mais elementar, (...) consiste em dois ou três condutores (motores monofásico ou bifásicos e trifásicos) conduzindo corrente em uma determinada tensão, desde um dispositivo de proteção até o ponto de utilização”. De acordo com a NBR 14039 (ASSOCIAÇÃO..., 2003) independente da utilização dos ramais de média tensão “O projeto, a execução, a verificação e a manutenção das instalações elétricas só devem ser confiados a pessoas qualificadas a conceber e executar os trabalhos em conformidade com esta Norma”.

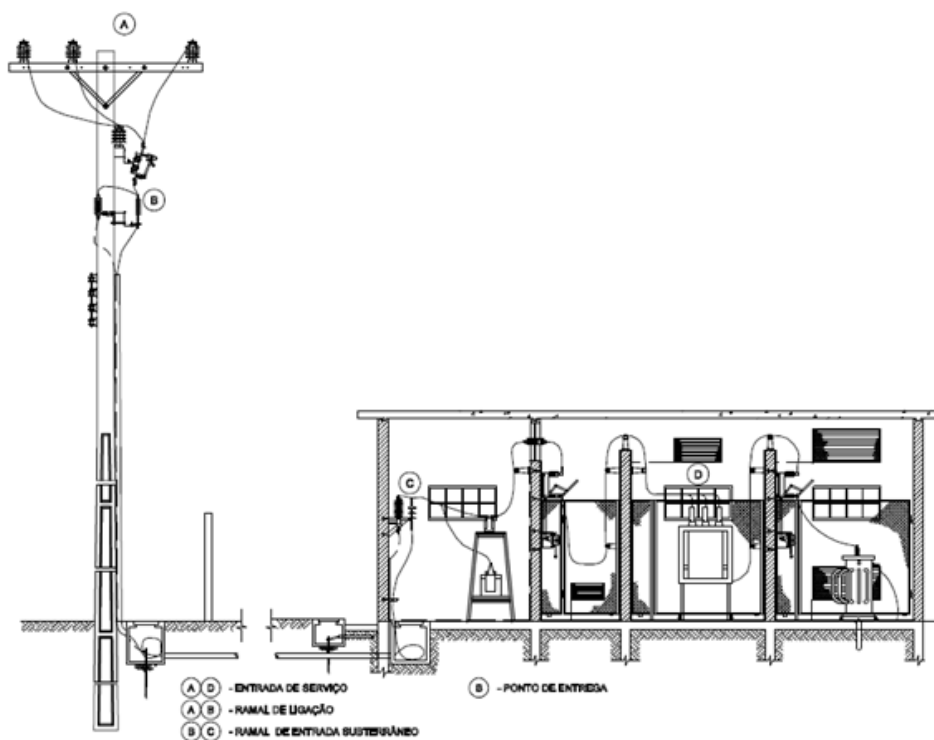


Figura 1 – Elementos componentes da entrada serviço

Fonte: COPEL, 2002.

Após o circuito passar pela transformação de tensão, ele segue para quadros gerais de distribuição, que com o auxílio de cabos de baixa tensão fazem a interligação das diversas cargas terminais do sistema, conforme Figura 2:

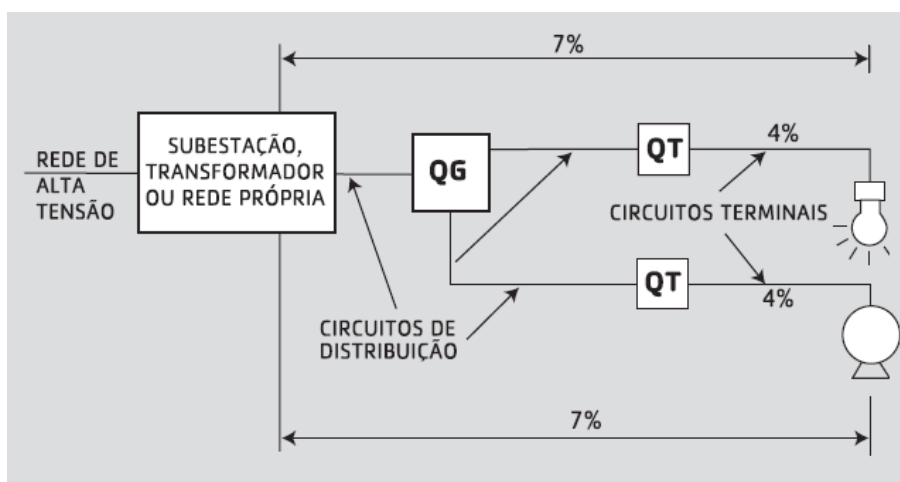


Figura 2 – Esquemático de distribuição de energia elétrica

Fonte: Prysmian, 2011.

2.1.2.1 Interligação Elétrica – Ramais Alimentadores

Na execução da obra tem-se a instalação de equipamentos como transformadores, geradores, painéis elétricos e afins, que recebem, em condições normais, energia proveniente das concessionárias ou geração própria. Mas para que essa energia chegue até o circuito terminal é necessária a utilização de interligação física, como exemplifica a Figura 3. Tais interligações podem ser realizadas por barramentos blindados, cabos aéreos isolados, cabos autossustentados, cabos não autossustentados, ou cabos de média tensão, que segundo a NBR 6251 (ASSOCIAÇÃO..., 2000, p. 02) podem ser cabos de potência, unipolares, multipolares ou multiplexados, para instalações fixas, com isolamento extrudado e com cobertura para média tensão, dispostos de várias maneiras como prescritos nas normas NBR 5410 e NBR 14039.



Figura 3 – Instalações elétricas de eletrodutos e eletrocalhas aparentes

Fonte: Prysmian, 2011.

Segundo a NBR 14039 (ASSOCIAÇÃO..., 2003, p. 07) para determinação do alimentador deve-se determinar as características da alimentação abaixo:

Natureza da corrente (CA ou CC);

Valor da tensão;

Valor da frequência;

Valor da corrente de curto-circuito presumida na origem da instalação.

Ainda de acordo com a NBR 14039 (ASSOCIAÇÃO..., 2003, p. 07) essas características devem ser obtidas do concessionário de energia elétrica, no caso de fonte externa, e devem ser determinadas, no caso de fonte própria. São aplicáveis tanto para a alimentação normal como para alimentações de segurança e de reserva.

3 CABOS

Este capítulo abordará os principais tópicos a respeito de cabos elétricos, como sua constituição física, materiais de fabricação, aplicação prática e possíveis disposições utilizadas nas instalações elétricas em geral.

Os componentes do cabo constituem parte importante da pesquisa bibliográfica realizada, uma vez que para todos os estudos e ensaios efetuados, será preciso conhecer bem cada parte constituinte, suas características e especificações.

3.1 Cabo de média tensão com isolamento em EPR

3.1.1 Construção

A NBR 6251 (ASSOCIAÇÃO..., 2000, p. 2) constata que há uma padronização para a construção dos cabos de potência para instalações fixas, sejam unipolares, multipolares ou multiplexados, para tensões nominais de 1 kV a 35 kV. Esses cabos possuem alguns tipos de isolamento, como a borracha de etilenopropileno, designada de EPR, e de cobertura, como o policloreto de vinila, designado ST2. As tensões de isolamento previstas na norma são 0,6/1 kV, 1,8/3 kV, 3,6/6 kV, 6/10 kV, 12/20 kV, 15/25 kV e 20/35 kV.

3.1.2 Composição dos cabos de média tensão

A Figura 4 mostra as camadas presentes em um cabo de Média tensão. Ele é construído por condutor (1), blindagem do condutor (2), isolamento (3), blindagem da isolamento (4.1 e 4.2), fitilho de poliéster para identificação (5), enchimento extrudado ou preformado (6) e cobertura (7) (PRYSMIAN..., p.1 2011). A Figura 5 mostra um cabo unipolar de média tensão.

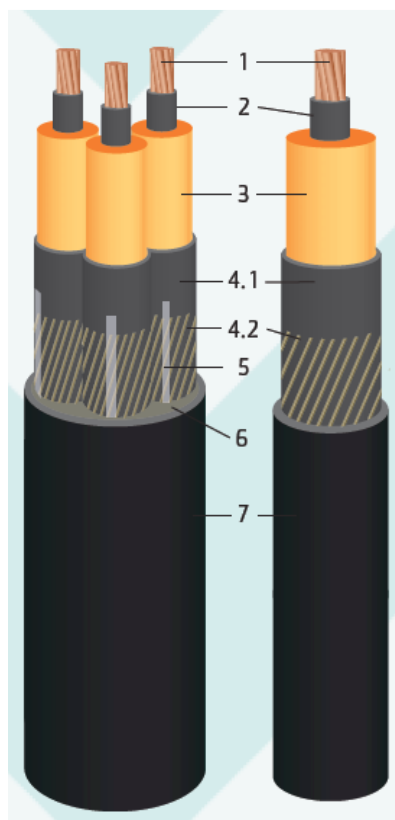


Figura 4 – Estrutura do Cabo

Fonte: Prysmian, 2011



Figura 5 – Cabo unipolar de média tensão

Fonte: Os autores, 2011

3.1.2.1 Condutor

Pela NBR 6251 (ASSOCIAÇÃO..., 2000, p. 4) “O condutor deve ser constituído por um ou vários fios de cobre eletrolítico, com ou sem revestimento metálico, ou de alumínio nu.”.

3.1.2.2 Blindagem do Condutor

Com base na NBR 6251 (ASSOCIAÇÃO..., 2000, p. 7), a blindagem é obrigatória em casos com tensão de isolamento acima de 3,6/6 kV, sendo opcionais para tensões menores ou iguais a esse valor, e para tensões superiores a 6/10 kV essa blindagem deve ser extrudada simultaneamente com a isolação. Ela deve ser constituída de material não metálico, podendo ser uma camada extrudada de composto semiconductor, com espessura média igual ou superior a 0,4 mm, ou uma combinação de fita têxtil semicondutora com camada extrudada, sendo que a fita possua espessura mínima de 0,065 mm com sobreposição mínima de 10 %.

3.1.2.3 Isolação

O material da isolação pode ser composto por dielétrico extrudado, termoplástico ou termofixo, devendo ser verificado os limites para tensão de isolamento e temperatura respectivos (ASSOCIAÇÃO..., NBR 6251, 2000, p. 5).

Para o caso a ser estudado, será considerada a isolação em EPR, que de acordo com a NBR 6251 (ASSOCIAÇÃO..., 2000, p. 4) são “compostos isolantes à base de copolímero etilenopropileno (EPM) ou de terpolímero etilenopropilenodieno (EPDM), utilizados em cabos com qualquer tensão de isolamento”.

Dependendo da isolação, o cabo possui um limite térmico, sendo que para o caso com a isolação em EPR a temperatura máxima do condutor em regime permanente é de 90 °C, em regime de sobre carga é de 130 °C e em regime de curto circuito é de 250 °C, podendo

sem menor para os dois últimos casos dependendo dos materiais usados nos cabos, tais como emendas e terminais, ou devido às condições da instalação. A operação em regime de sobrecarga não deve exceder nem 100 horas, por 12 meses consecutivos, nem 500 horas durante a vida do cabo, pois sob essa condição de sobrecarga sua vida útil é reduzida em relação à prevista em regime permanente. Já para regime de curto circuito, o tempo máximo no qual o condutor pode manter a temperatura indicada é de 5 s. Quanto à espessura média da isolação, esta não deve ser inferior ao valor nominal especificado. Já a espessura mínima pode ser inferior ao valor nominal, contanto que a diferença não exceda 0,1 mm somado a 10 % do valor nominal especificado. (ASSOCIAÇÃO..., NBR 6251, 2000, p. 6-7).

Nessa camada do cabo, falhas de fabricação podem ser responsáveis por descargas parciais de tensão no condutor enquanto energizado. Tais falhas podem ser dos mais variados tipos, como a presença de bolhas de ar em meio ao isolante, ranhuras na isolação, entre outros. (Dielec..., 2010, p. 1).

3.1.2.4 **Blindagem da isolação**

Pela NBR 6251 (ASSOCIAÇÃO..., 2000, p. 7), a blindagem de isolação é obrigatória para cabos com tensão de isolamento superior a 3,6/6 kV e devem ser compostas por uma parte de um semicondutor não metálico associado a uma parte metálica e também devem ser extrudada junto à isolação.

A parte não metálica deve ser aplicada diretamente sobre a isolação de cada condutor. Ela pode ser formada por uma fita semicondutora, por uma camada extrudada de composto semicondutor, pela combinação das duas ou por um destes materiais em combinação com revestimento de verniz semicondutor. Sua espessura média deve ser igual ou superior a 0,4 mm, ou caso seja a combinação de fita semicondutora com camada extrudada, sendo que a fita possua espessura mínima de 0,065 mm com sobreposição mínima de 10 %.

A parte metálica pode ser constituída de uma ou mais fitas, tranças de fios, camada concêntrica de fios ou camada concêntrica de fios combinada com fita(s) ou fio(s). No caso do cabo a ser estudado, cuja parte metálica é constituída por trança de fios, esta deve ser aplicada com cobertura mínima de 85 %.

3.1.2.5 Cobertura

De acordo com a cobertura, o condutor possui um limite de temperatura em regime permanente. Esse limite varia de acordo com o tipo de material. Para o cabo a ser estudado a cobertura é composta pelo composto termoplástico do tipo ST2, que é formado à base de policloreto de vinila ou copolímero de cloreto de vinila e acetato de vinila, sendo que a temperatura no condutor seja menor ou igual a 105 °C.

3.2 Possíveis disposições

- De acordo com a NBR 14039 (ASSOCIAÇÃO..., 2003), os cabos podem ser dispostos da seguinte forma:
- Três cabos unipolares justapostos ou espaçados ao ar livre, como mostra a Figura 6;
- Um cabo tripolar ao ar livre, como mostra a Figura 6;
- Três cabos unipolares justapostos ou espaçados em canaleta fechada no solo, como mostra a Figura 7;
- Um cabo tripolar em canaleta fechada no solo, como mostra a Figura 7;
- Três cabos unipolares justapostos em eletroduto ao ar livre, como mostra a Figura 8;
- Um cabo tripolar em eletroduto ao ar livre, como mostra a Figura 8;
- Três cabos unipolares justapostos ou espaçados em banco de dutos ou em eletroduto enterrado no solo. Para o caso de cabos espaçados, é considerado um cabo por duto ou eletroduto não condutor, como mostra a Figura 9;
- Um cabo tripolar em banco de dutos ou em eletroduto enterrado no solo, como mostra a Figura 9;
- Três cabos unipolares justapostos ou espaçados diretamente enterrados;
- Um cabo tripolar diretamente enterrados.
- Para cabos justapostos, é possível ter cabos em trifólio ou dispostos horizontalmente.

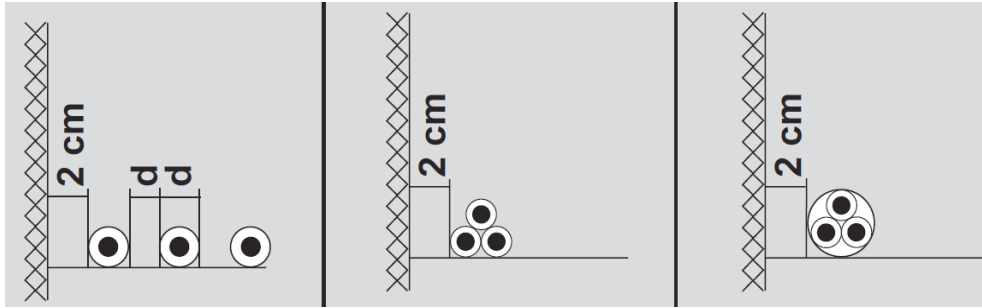


Figura 6 – Instalação ao ar livre

Fonte: Prysmian, 2011.

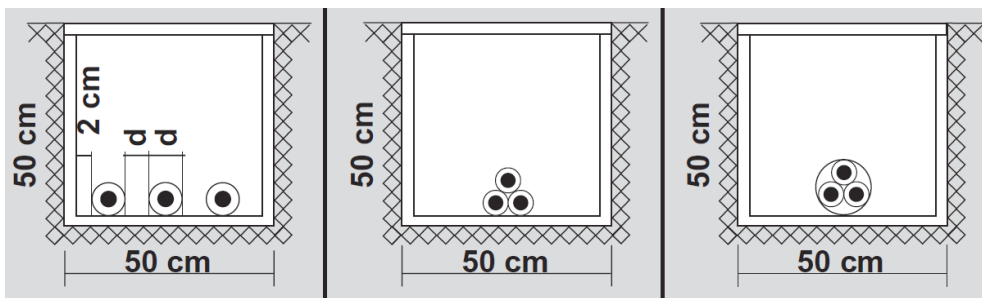


Figura 7 – Instalação em canaleta fechada no solo

Fonte: Prysmian, 2011.

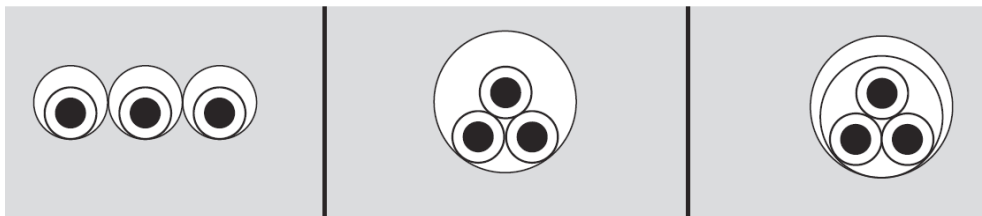


Figura 8 – Instalação em eletroduto ao ar livre

Fonte: Prysmian, 2011.

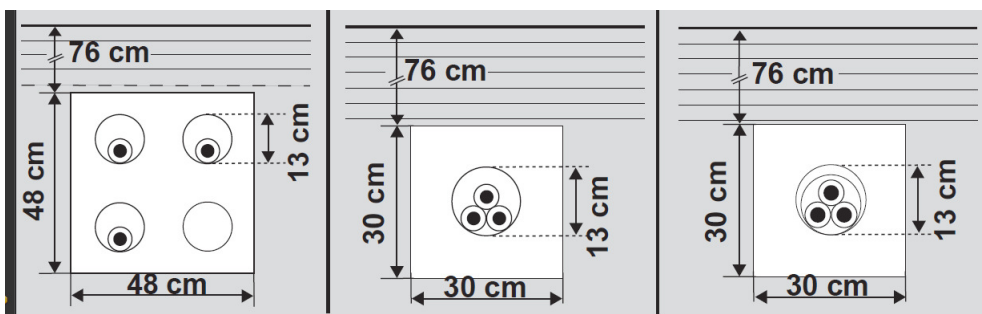


Figura 9 – Instalação em banco de dutos

Fonte: Prysmian, 2011.

4 ENSAIO DE TENSÃO APLICADA

O presente capítulo trará algumas considerações específicas, relativas à especificação e caracterização dos ensaios feitos com o equipamento Hipot. Além do ensaio em si, será comentado sobre o equipamento utilizado (Hipot) procedimentos a serem feitos antes e durante a realização dos ensaios, bem como ajustes a serem feitos no equipamento para garantir um desempenho correto, além de garantir a validação dos testes conforme normas vigentes e as necessidades do operador.

4.1 Instruções Iniciais

Basicamente, o ensaio Hipot é efetuado com um esquema de ligação muito simples: o equipamento Hipot, alimentado por uma fonte de energia externa, é eletricamente conectado ao cabo ensaiado e a sua blindagem, conforme o caso. Então, o equipamento fornece um pulso de tensão ao cabo e, conforme o comportamento do mesmo, são feitas análises a respeito da possibilidade de inserção do cabo ensaiado em instalações, ou mesmo da validação do mesmo como produto.

Um esquema de ligação semelhante ao descrito acima é encontrado nas notas de aplicação fornecidas pelo fornecedor Vórtex, apresentado na Figura 10, para testes de resistência de isolamento.

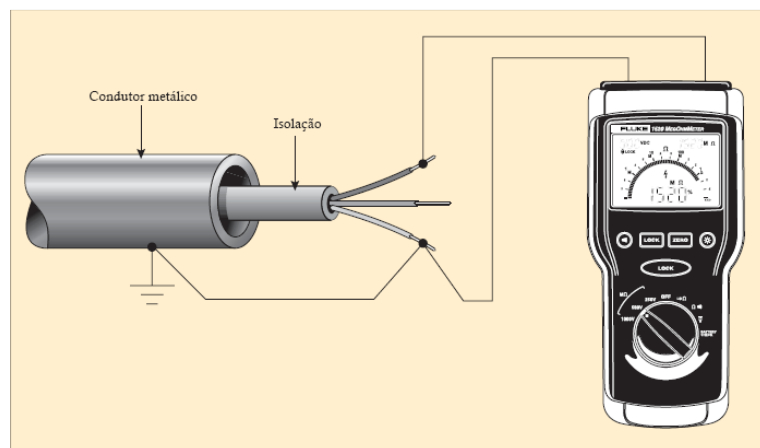


Figura 10 – Esquema elétrico de um medidor de resistência de isolamento.

Fonte: VÓRTEX, 2011, p. 4.

Na Figura 11, é apresentado um esquema de ligação prático para realização de testes de isolamento com o equipamento Hipot.

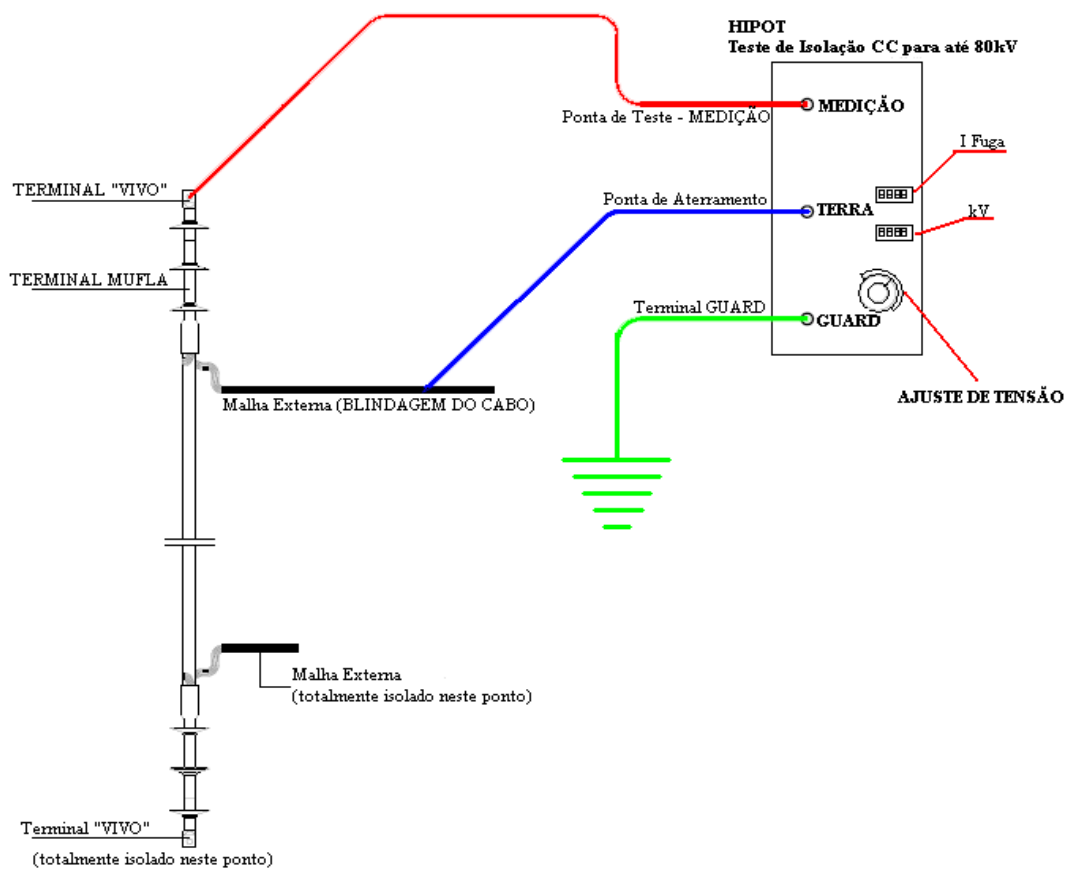


Figura 11 – Esquema de Ligação Hipot.

Fonte: Adaptado de C&M Engenharia Eletrica, 2011.

As descrições a seguir são baseadas no Manual de Utilização fornecido por Eletroteste (2010), para uma série de equipamentos Hipot. Como todos os equipamentos operam de maneira semelhante a este, tais instruções podem-se considerar aplicáveis a vários casos, com possíveis alterações específicas.

A primeira consideração feita em relação ao equipamento diz respeito à alimentação de tensão do Hipot, bem como ao dispositivo de segurança existente no mesmo devido às altas tensões envolvidas.

Vários avisos são dados em relação a possíveis acidentes e danos sobre o equipamento. Por operar com valores altos de tensão e energia armazenada (note-se a própria função do equipamento), o Hipot exige operação cuidadosa, com atenção redobrada em todos os aspectos de segurança possíveis.

Este manual enfatiza a técnica de manuseio com a máxima proteção possível. Através destas instruções chamamos atenção do operador para cuidados especiais no manuseio de certos controles e postos apropriados no percebimento de operação. Durante a utilização do equipamento, o operador deverá ficar atento aos cuidados necessários à sua proteção. (ELETROTESTE, 2010, p. 6).

Destaca-se que o operador sempre deve preservar a maior distância possível dos componentes energizados do sistema durante a realização do ensaio (como por exemplo cabos, conectores, e o próprio equipamento Hipot). Além disso, é recomendável que os cabos ensaiados estejam dispostos de modo a correr livremente pelo ar, sem contato algum com outro ponto de possível tensão ou aterramento.

Para maior flexibilidade e facilidade no manuseio, o cabo de alta tensão possui isolamento somente de 50 kV. Portanto na ligação com a amostra este cabo deve caminhar pelo ar sem contato com pontos de terra ou de potencial. Deve ser afastado o mais possível do operador. (ELETROTESTE, 2010, p. 3).

O principal dispositivo de segurança observado pela equipe no equipamento analisado foi o sistema que faz o painel do equipamento ter sempre potencial elétrico nulo (ou seja, esteja aterrado). Tal medida é essencial para evitar um eventual contato humano com as partes energizadas do Hipot, causando assim um choque elétrico.

Outro ponto que demanda grande atenção na operação do equipamento Hipot é o nível de tensão aplicado. Devido a vários tipos de referência normalmente utilizados (por exemplo, tensão fase-fase [bifásica], fase-neutro, entre outros), é comum o desacordo de medidas entre o valor pretendido e o valor prático aplicado no ensaio. Assim, é importante a conferência rotineira dos parâmetros elétricos empregados, a fim de evitar acontecimentos não desejados ou até mesmo erros de medidas por parte do equipamento, ou de leitura por parte do operador.

Sabe-se por especificação técnica que um cabo com falha na isolação, ao ser exposto ao ensaio Hipot, apresenta corrente elétrica, de vulga, crescente. Tal crescimento é limitado (interrompido) somente quando a corrente chega ao valor de corte do equipamento (valor esse que, em alguns casos, é previamente ajustado pelo operador). Daí a importância de sempre ajustar todas as grandezas envolvidas no referido procedimento antes da realização do ensaio.

4.2 Principais Aplicações do Equipamento

Segundo Eletroteste (2010), os principais usuários do equipamento Hipot são fabricantes de cabos e fios, concessionárias de energia elétrica, empresas de telecomunicações e profissionais atuantes na engenharia de campo.

4.3 Procedimentos Anteriores ao Ensaio

4.3.1 Aterramento e Segurança

Para um ensaio bem sucedido e sem imprevistos ou acidentes, é fundamental que, antes de tudo, todas as normas e procedimentos de segurança sejam obedecidos por completo. Portanto, deve-se escolher um operador qualificado e consciente para efetuar o manuseio do equipamento de ensaio (Hipot), bem como dos cabos, fios de conexão e demais materiais envolvidos no processo de teste.

Além disso, um bom aterramento do sistema é essencial para que não haja nenhum acidente envolvendo tensões indesejadas, que eventualmente venham a surgir no ambiente de ensaios. Portanto, o primeiro passo após a verificação da segurança do equipamento e do operador é efetuar e conferir o aterramento do equipamento, bem como de sua carcaça. Deve-se assegurar a conexão correta com um aterramento confiável, por segurança e confiabilidade dos testes que se seguem.

4.3.2 Conexões de Alimentação de Energia no Sistema

Em seguida, deve-se efetuar a conexão da alimentação do Hipot, novamente conferindo o aterramento do sistema. Então, faz-se a conexão da fonte de energia e do cabo de alta tensão nos bornes apropriados. Estas últimas conexões também devem ser corretamente ligadas ao aterramento do circuito através de cabos apropriados.

Nesse momento, o terminal *guard* se mostra relevante, pois tem como função principal a proteção tanto da carcaça do equipamento Hipot, de seus circuitos internos e das conexões feitas. O terminal deve ser aterrado solidamente, para garantir potencial nulo nos pontos necessários.

Fazer as conexões na ordem e disposição correta é essencial para garantir a proteção total durante o ensaio, bem como para garantir leituras confiáveis da corrente de fuga, resistência de isolamento do material testado, entre outras. Para isso, o operador deve sempre seguir as instruções do fabricante do equipamento Hipot e do cabo ensaiado, assegurando-se de que nenhum limite físico está sendo extrapolado.

4.3.3 Conexão dos Cabos Ensaiaados

As conexões do cabo a ser ensaiado são esclarecidas no manual de acordo com o tipo de cabo utilizado (com referência à presença de blindagem e o tipo de construção, monofásico ou trifásico). A Tabela 1 mostra os tipos possíveis de cabo a serem analisados, bem como quais partes devem ser energizadas no Hipot e quais devem ser aterradas.

Tabela 1 – Ligações do equipamento conforme tipo de cabo utilizado

| Ligações do Equipamento Conforme Tipo de Cabo Utilizado | | |
|--|-------------------------|--|
| Tipo de Cabo | Parte Energizada | Parte Aterrada |
| Singelo com Blindagem | Condutor Central | Blindagem Metálica |
| Trifásico com Blindagem Individual por Fase | Cada Condutor Central | Todas as Blindagens Mais os outros Dois Cabos |
| Trifásico com Blindagem Única | Cada Condutor Central | Blindagem mais outros Dois Cabos |
| Singelo sem Blindagem | Condutor Central | Introduzido em água com as pontas extraídas. A água deve ser aterrada. |
| Trifásico sem Blindagem | Cada Condutor Central | Introduzido em água com as pontas extraídas. A água deve ser aterrada. |

Fonte: Adaptado de Eletroteste (2010).

Por último, deve-se ajustar o potenciômetro do equipamento para um valor adequado de corrente de desligamento. O fabricante recomenda, inicialmente, o valor máximo de 5 mA.

4.4 Ajustes e Procedimentos de Ensaio

4.4.1 Ajuste do Nível de Tensão

Ao ligar o equipamento, deve-se verificar se os ajustes de tensão estão adequados (ajuste girado para a posição “partida”). Uma vez corrigidas possíveis divergências de ajuste e referenciais, a lâmpada de AT deve acender, indicando que o equipamento está pronto e habilitado para fornecer tensão para realizar o ensaio.

Em seguida, deve-se ajustar o nível de tensão para o valor desejado (conforme normas vigentes e especificação do solicitador do ensaio). Deve-se lembrar sempre que, por se tratar de ensaios com tensões altas, todo ajuste realizado no equipamento deve se dar de forma lenta, a fim de prevenir variações elétricas excessivamente bruscas e, conseqüentemente, evitar o desligamento do aparelho ou a atuação de alguma proteção de forma inadequada.

A essa altura, o operador já deve poder efetuar a leitura da corrente de fuga existente no cabo ou material testado. A partir daí, é trabalho do engenheiro ou operador do ensaio tomar medidas para verificar se a corrente de fuga está dentro do limite adequado. Caso isso não ocorra, devem-se tomar as atitudes necessárias em relação ao material de ensaio.

4.4.1.1 Escolha do Nível de Tensão Adequado

O próprio fabricante do equipamento Hipot (Eletroteste, 2010) fornece uma lista de valores de níveis de tensão médios segundo várias normas internacionais, quais sejam: VDE (*Verband der Elektrotechnik, Elektronik Und Informationstechnik* – Associação de Eletrotécnica, Eletrônica e Tecnologia da Informação), IEC (*International Electrotechnical Commission* – Comissão Internacional de Eletrotécnica), IPCEA (*Insulated Power Cable Engineers Association* – Associação de Engenharia de Cabos Isolados) e AEIC (*Association of Edison Illuminating Companies* – Associação de Empresas de Iluminação Edison).

A seguir, são apresentadas duas tabelas para determinação do nível de tensão a ser aplicado no cabo sujeito ao ensaio. A Tabela 2 diz respeito aos principais testes que devem ser feitos, em qual situação cada um deles deve se ocorrer e qual a tensão utilizada. A Tabela 3, por sua vez, apresenta os valores padrão da tensão de teste de cabos elétricos com tensão contínua (Vcc), segundo as normas já mencionadas acima.

Tabela 2 – Ocasões nas quais ensaios devem ser feitos, e suas respectivas tensões

| Ocasão dos Ensaio | Tensão A Ser Utilizada |
|---|-------------------------|
| No recebimento | 100% da Tensão de Teste |
| Antes do lançamento | 75% da Tensão de Teste |
| Após montagem dos acessórios | 80% da Tensão de Teste |
| Manutenção de cabos com suspeita de defeito | Não aplicável |
| Manutenção preventiva | Não aplicável |

Fonte: Adaptado de Eletroteste, 2010.

Tabela 3 – Tensões de teste, conforme a tensão nominal do cabo ensaiado

| Tensão de teste de Cabos Elétricos com Tensão Contínua (kV) | | | | | |
|--|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Tensão Nominal do Cabo | No Recebimento | Durante a Montagem | | Manutenção | |
| | | Antes do Lançamento | Montagem de Acessórios | Suspeita de Defeito | Preventiva |
| 1 | 8,4 | 6,3 | 6,72 | 5,04 | 1 |
| 3 | 15,6 | 11,7 | 12,48 | 9,36 | 2,8 |
| 6 | 26,4 | 19,8 | 21,12 | 15,84 | 5,6 |
| 10 | 36 | 27 | 28,8 | 21,6 | 9,3 |
| 15 | 52,8 | 39,6 | 42,24 | 31,68 | 13,5 |

Fonte: Adaptado de Eletroteste, 2010.

4.5 Medidas e Resultados do Ensaio

Uma vez definidos os parâmetros iniciais do ensaio, e tendo ajustado o equipamento corretamente, pode-se proceder ao ensaio propriamente dito. Novamente, devem-se conferir todas as conexões elétricas do cabo testado e dos bornes do equipamento. Caso algo esteja fora de acordo com o manual do fabricante e as respectivas normas, deve-se efetuar o ajuste antes de continuar o ensaio.

As medidas retiradas no ensaio devem ser analisadas de forma segura, para que não ocorram erros devido a falhas de leitura ou análise de resultados. É necessário que o ensaio seja feito corretamente, pois não é aconselhável realizar o ensaio de tensão aplicada no cabo várias vezes, pois mesmo não sendo considerado um ensaio destrutivo pode comprometer a vida útil do cabo devido ao nível de tensão aplicada ser superior ao de sua utilização normal.

Tendo obedecido todos os procedimentos mostrados neste capítulo, o ensaio deve resultar em medidas confiáveis e úteis para determinação de vida útil de cabos, validação de instalações, entre outras aplicações.

5 POLARIZAÇÃO DE MATERIAIS DIELÉTRICOS

Um grande problema enfrentado atualmente nas Instalações Elétricas de Média Tensão, no que se refere a ensaios e testes preliminares, reside na tensão residual existente após ensaios com o equipamento Hipot em cabos blindados.

Após a realização dos respectivos testes e ensaios nos cabos, e o devido aterramento de equipamento e cabo, certa tensão ainda persiste entre o condutor e a blindagem, por exemplo. Esse fato pode significar perigo em diversas situações (caso alguém eventualmente toque no cabo ou no equipamento), além de causar um tempo de espera após o ensaio, até que o cabo ensaiado possa ser manuseado com segurança para sua instalação.

De acordo com experimentos e baseado na teoria existente, há razões para acreditar que tais tensões residuais aconteçam em razão da polarização dos materiais dielétricos existentes no cabo ensaiado, tais como a isolação polimérica do cabo, a blindagem metálica e o próprio condutor.

Muitas “pessoas que trabalham com alta tensão” têm passado por essa experiência dolorosa: curto-circuita um capacitor de alta tensão (que foi previamente carregado com uma tensão direta) para medir uma tensão de aproximadamente igual a 0 V, acredita-se que o capacitor esteve-se completamente descarregado, mas ao tocar nos conectores do capacitor percebe que ainda existe tensão! Está tensão é devido à polarização da isolação (TETTEX, 2011, p. 1).

Daí a importância de estudar os fenômenos relacionados à polarização, a fim de parametrizar tal fenômeno e mostrar as teorias já existentes, para possível aplicação prática nos ensaios utilizando Hipot.

5.1 Materiais Dielétricos

Sabe-se que a isolação de cabos tem sido uma preocupação constante ao longo do tempo. Um dos primeiros registros existentes sobre cabos isolados do meio externo data do final do século XIX. Nesta época, a isolação de cabos era feita com impregnação em piche (tecnologia desenvolvida e aplicada por Thomas Edison) e, posteriormente, com fitas de papel.

A impregnação do papel em óleo, datada da década de 1930, melhorou as técnicas de isolamento existentes. Além disso, nesta época iniciaram-se pesquisas para produção de cabos elétricos extrudados, construídos à base de borracha natural vulcanizada. Por fim, na década de 1960, surgiram os primeiros cabos elétricos utilizando um material polimérico industrial como isolante, usando em sua maioria o polietileno. (JÚNIOR, 2008, p.25).

Na área de estudo de instalações elétricas, é comum a consideração de materiais dielétricos e isolantes como tendo a mesma definição. Porém, há diferenças bem estabelecidas entre os dois conceitos.

Segundo PRESENTE (2004, p. 37), considera-se *dielétrico* um material no qual são considerados aspectos eletrostáticos, ou seja, propriedades específicas mensuráveis, tais como rigidez dielétrica, absorção dielétrica, constante dielétrica e fator de potência. Já WASILKOWSKI (2002, p. 39) considera um material dielétrico como sendo um meio no qual podem ocorrer os processos de condução e indução elétrica simultaneamente. Como exemplo de materiais dielétricos, podem-se citar o óleo mineral, vidro, entre outros.

Um material *isolante*, por outro lado, é apenas um material cuja condução de eletricidade não é boa. Bons exemplos são o ar, porcelana, alguns polímeros, borracha, entre outros.

É comum utilizar materiais que são simultaneamente dielétricos e isolantes na construção e isolamento de materiais elétricos, a fim de facilitar a especificação e caracterização técnica dos mesmos. Vale ressaltar a grande importância da isolamento de cabos condutores de energia em instalações elétricas.

A função básica da isolamento é confinar o campo elétrico gerado pela tensão aplicada ao condutor no seu interior. Com isso, é reduzido ou eliminado o risco de choques elétricos e curtos-circuitos. (IPCE, 2011).

Apesar de cumprirem bem sua função primária (de isolamento entre partes vivas do cabo e o ambiente externo), os materiais utilizados para isolar cabos, em alguns casos, apresentam propriedades elétricas que não favorecem a isolamento, devido a serem considerados dielétricos. Um dos principais fenômenos que ocorrem nesses casos é a polarização do material dielétrico. Conforme um campo elétrico ou tensão elétrica é aplicado através da isolamento, os materiais podem se polarizar e criar um efeito capacitivo entre suas duas extremidades. Desse modo, pode haver o surgimento de uma tensão de retorno, inversa à tensão previamente aplicada, que aparenta ter função de “neutralizar” a polarização existente.

5.1.1 Polietileno Entrecruzado (XLPE)

Sabe-se que o polietileno é um composto polimérico sintético, muito utilizado na Engenharia Elétrica como material de isolamento em vários tipos de equipamentos. Sua grande recorrência em equipamentos elétricos requer estudo detalhado de seu processo de fabricação, polimerização e implementação final nos materiais onde é destinado.

O polietileno é um polímero sintético membro de uma série de compostos químicos chamados poliolefinas (...). Em cabos com isolamento em XLPE, os processos de reticulação utilizados são a cura a vapor e a cura a seco (...). Dependendo das condições impostas no processo de polimerização é que se obterá o polietileno de baixa densidade (LDPE), de alta densidade (HDPE) ou o polietileno entrecruzado (XLPE). (JÚNIOR, 2008, p. 28).

Quanto às características intrínsecas do XLPE, vários estudos foram feitos, chegando a conclusões satisfatórias a nível de aplicação industrial do mesmo. Segundo JÚNIOR (2008, p. 28), o XLPE possui excelentes propriedades químicas e físicas, tais como inércia química, boas propriedades mecânicas e excelentes propriedades elétricas, tais quais alta resistividade volumétrica, baixa permissividade, baixas perdas dielétricas e alta rigidez dielétrica.

Todas essas características, aliadas a um ótimo comportamento em relação a variações bruscas de temperatura, fazem do XLPE uma escolha evidente para se aplicar em cabos elétricos e demais equipamentos relacionados.

5.1.2 Elastômero de Etilenopropileno (EPR)

O elastômero de etilenopropileno (ou simplesmente EPR) é um composto polimérico obtido a partir da copolimerização do etileno e do propileno (EPM). O EPR também é frequentemente utilizado para isolamento de cabos e outros equipamentos elétricos, por suas características e facilidade de produção.

Segundo JÚNIOR (2008, p. 29), o composto geralmente utilizado em aplicações práticas é uma mistura de sete a nove ingredientes, na qual o composto a ser copolimerizado (EPM) representa apenas de 45% a 50% da massa total. Apesar disso, o EPR ainda constitui a principal base do composto como um todo, sendo responsável por suas propriedades físicas e elétricas.

Percebe-se uma ampla utilização de cabos com isolamento a base de EPR nos vários tipos de instalação elétrica existentes, em especial em cabos com contato prolongado com água, pois o EPR é muito resistente à arborescência em água.

5.2 Dielétricos sobre Influência de Campos Elétricos Estáticos

Quando se aplica um campo elétrico sobre um dielétrico, há o surgimento de interferências na distribuição natural de cargas do referido material. A distribuição de cargas, inicialmente neutra antes da aplicação do campo elétrico, passa a se modificar conforme a orientação do campo aplicado, de modo a surgirem cargas positivas e negativas separadas por uma determinada distância. Consequentemente, aparecem momentos de dipolo elétrico ao longo do material dielétrico.

Por essa razão, materiais dielétricos se comportam de forma diferenciada em relação a materiais simplesmente condutores ou isolantes.

Ao analisar materiais não dielétricos, sabe-se que, ao impor uma diferença de potencial elétrico em determinados dois pontos, uma corrente elétrica deverá circular entre tais locais. Desse modo, ao se aplicar uma tensão em determinados materiais, correntes elétricas maiores ou menores irão surgir, dependendo das características do material em questão (se ele é isolante, condutor, entre outros).

Conforme o tipo de tensão elétrica aplicada, porém (dependendo de sua intensidade, natureza contínua ou alternada, etc.), e a natureza do respectivo material, a corrente elétrica surgida terá características diferentes.

Considere-se um elemento puramente resistivo. Ao se aplicar uma tensão elétrica contínua em tal elemento, haverá o surgimento de uma corrente elétrica contínua, proporcional à tensão aplicada e à resistência elétrica do elemento.

Graficamente, pode-se obter a tensão aplicada e a corrente surgida deste modo:

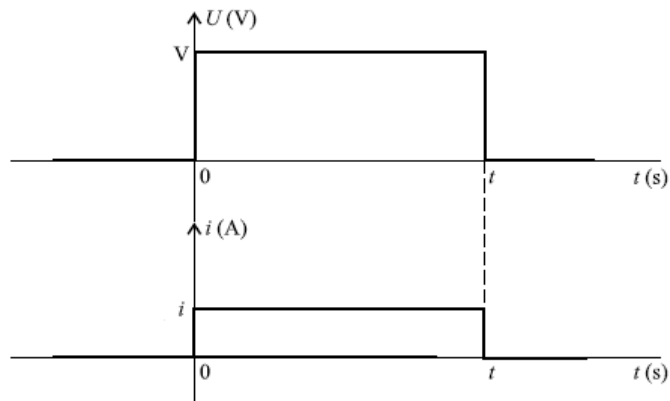


Figura 12 – Gráfico de tensão aplicada (V) por corrente (i) em um elemento puramente resistivo

Fonte: ROBERT, et. al. (2008, p.1).

Nota-se que, no instante em que a tensão é retirada do elemento resistivo (instante t), a corrente imediatamente também cai à zero. Ou seja, não há nenhum período transitório entre a presença e ausência de corrente elétrica no elemento testado.

Quando esse mesmo teste é realizado com um elemento capacitivo, a corrente se comporta de maneira diferente em relação à tensão aplicada. Percebe-se que não há uma mudança tão brusca em relação à corrente elétrica circulante no elemento de testes: ao invés de se comportar como um degrau, mudando de valor instantaneamente nos tempos 0 e t , percebe-se uma variação lenta no valor da corrente ao longo do tempo, tanto no degrau ascendente quanto no descendente.

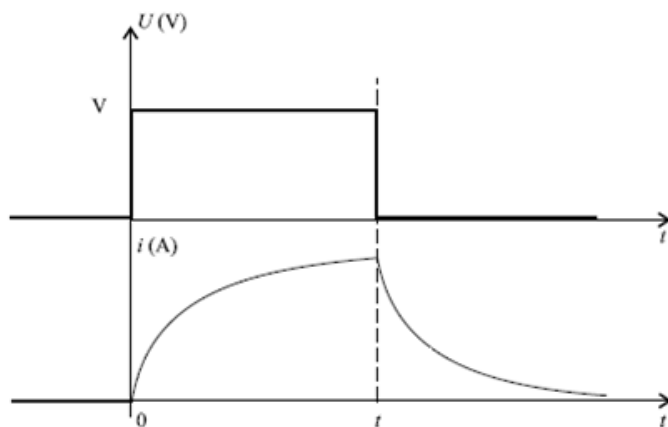


Figura 13 – Gráfico de tensão aplicada (V) por corrente (i) em um elemento capacitivo

Fonte: ROBERT, et. al. (2008, p.1).

Sabe-se que a diferença de comportamento da corrente elétrica no elemento capacitivo se deve a aspectos construtivos de tal elemento, em relação à resistência elétrica utilizada no teste anterior.

O comportamento diferenciado do capacitor em relação ao resistor se deve ao fato do material dielétrico possuir os mecanismos de polarização, ou seja, ao se estabelecer um campo elétrico entre seus eletrodos, certos mecanismos respondem em tempos diferenciados a ação deste campo, sendo alguns mais lentos e outros mais rápidos, denominados respectivamente de polarização lenta e polarização instantânea. Estes mecanismos de polarização surgem em função das diferenças estruturais entre estes materiais. (ROBERT, et. al., 2008, p.1).

A principal razão das diferenças de forma de onda da corrente elétrica que surge em resposta à tensão aplicada é pelo elemento em teste ser capacitivo, ao invés de resistivo. Nesse tipo de elemento elétrico, há a presença de um material dielétrico entre seus dois terminais (pontos onde a tensão é aplicada). Em virtude da reorganização das cargas, como já apresentado anteriormente, há uma polarização no meio em questão.

5.3 Propriedades Elétricas e Dielétricas

Vários materiais têm sido utilizados na indústria da Engenharia Elétrica atualmente. O advento de novas tecnologias e pesquisas dos últimos tempos possibilitou um grande avanço na especificação e caracterização técnica de materiais.

Desde os primórdios da teoria de Campos Eletromagnéticos, prever e calcular as propriedades dielétricas de materiais tem sido um problema desafiante, com importância tanto prática quanto teórica. Em alguns compostos, a polarização de cargas em virtude de diferenças entre as propriedades elétricas de seus constituintes se mostra muito importante. (GUBANSKI, 2002, p.1).

As propriedades elétricas e dielétricas de determinados materiais são muito úteis e interessantes para o estudo de cabos blindados e isolados. A seguir, portanto, seguem algumas propriedades importantes e breves descrições para esclarecimento futuro.

5.3.1 Resistência Elétrica de Isolamento

É sabido que ao se aplicar uma tensão elétrica constante entre dois pontos de um material dielétrico, o mesmo irá apresentar uma corrente elétrica muito pequena em seu interior, chamada corrente de carga. (SILVA, 2000, p. 26).

Tal corrente de carga é o resultado da soma da corrente de absorção (que, uma vez gerada, vai decrescendo ao longo de determinado período de tempo) e a corrente de condução que, após um longo tempo da aplicação da tensão constante, ainda permanece com valor constante.

A razão entre a tensão aplicada no material (V) e a corrente de condução existente após a aplicação de tensão (i_{iso}) é razoavelmente constante, sendo chamada de *Resistência Elétrica de Isolamento* (R_{iso}), conforme mostrado na equação (1).

$$R_{iso} = \frac{V}{i_{iso}} \quad (1)$$

5.3.2 Resistividade Elétrica

Diz-se que a *resistividade elétrica* de um material é a possibilidade de passagem de corrente elétrica por este material. A *resistividade volumétrica* (R_v) diz respeito à passagem de corrente por todo o volume do material. Já a *resistividade superficial* (R_s), por outro lado, corresponde à passagem de corrente apenas na superfície desse material, sem contar o volume todo.

Matematicamente, pode-se definir a resistência volumétrica e superficial com base na tensão aplicada no material e nas correntes elétricas que surgem devido a essa tensão. Assim, tem-se:

$$I_v = \frac{V}{R_v} \quad (2)$$

$$I_s = \frac{V}{R_s} \quad (3)$$

Considerando que a corrente de condução (i_{iso}) é numericamente igual à soma entre as correntes volumétrica (I_v) e superficial (I_s), tem-se:

$$i_{iso} = I_v + I_s \quad (4)$$

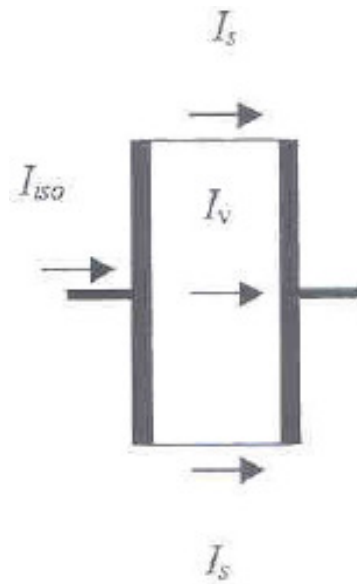


Figura 14 – Representação esquemática das correntes em um material dielétrico.
Fonte: SILVA, 2000, p. 28.

Associando os valores de corrente elétrica envolvidos, pode-se relacionar a resistência de isolamento com as resistências volumétrica e superficial do material em questão conforme mostrado na equação (5).

$$\frac{1}{R_{iso}} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s} \quad (5)$$

5.3.3 Resistência Elétrica

Define-se a *resistência elétrica* de um material como uma grandeza relativa à geometria da amostra, da área pela qual uma corrente elétrica pode passar e de propriedades intrínsecas do material.

Matematicamente, tem-se:

$$R = \sigma \cdot \frac{l}{A} \quad (6)$$

Onde “R” é a resistência elétrica, “ σ ” é a resistividade elétrica (propriedade intrínseca ao material), l é o comprimento da amostra, e A é a área pela qual a corrente pode passar.

5.4 Processos de Polarização

Segundo SILVA (2000, p. 32), a polarização de materiais pode se dar de diversas maneiras. Dependendo das características físico-químicas do composto estudado, o fenômeno de polarização irá ocorrer em nível subatômico, atômico, a nível macroscópico ou pode ser ausente.

Para estudo de polarização é necessária a classificação dos materiais que podem ser polares e não polares. Para PIAZZA (2001, p. 10) “materiais dielétricos não polares são os que possuem nas suas moléculas um centro de simetria, os baricentros das cargas positivas e negativas são confundidos na ausência de um campo externo”. Já os materiais dielétricos ainda segundo PIAZZA (2001, p. 10) possuem suas moléculas desprovidas de centro de simetria, apresentando um momento elétrico permanente. Pode se considerar materiais não polares o polietileno, teflon® e poliestireno já os materiais polares podemos dar com exemplo o PVC e a água.

A seguir são apresentados os vários tipos de polarização possíveis de ocorrer, bem como suas características específicas.

5.4.1 Polarização Eletrônica

A polarização chamada de eletrônica acontece em um nível subatômico, ou seja, envolvendo partículas subatômicas como elétrons, prótons e nêutrons. Nesse caso, toda a porção de material sujeita à polarização é modificada. Ao longo dos átomos que compõe o material estudado, os elétrons se deslocam espacialmente em relação ao núcleo de seu respectivo átomo.

Este tipo de polarização ocorre independentemente da temperatura do material que está sujeito a tal fenômeno. Na maioria dos casos, a polarização eletrônica ocorre durante um intervalo de tempo com duração entre 10^{-15} s e 10^{-14} s.

5.4.2 Polarização Atômica (Iônica ou Molecular)

Nesse tipo de polarização, não há movimentação a nível subatômico, porém os íons ou moléculas do material se movem em relação uns aos outros. Esse tipo de polarização é um pouco mais lenta, e ocorre com duração entre 10^{-13} s e 10^{-12} s.

A polarização atômica, exemplificada na Figura 15, geralmente acontece por resposta a um campo elétrico aplicado ao material, e ocorre mais frequentemente em materiais cerâmicos.

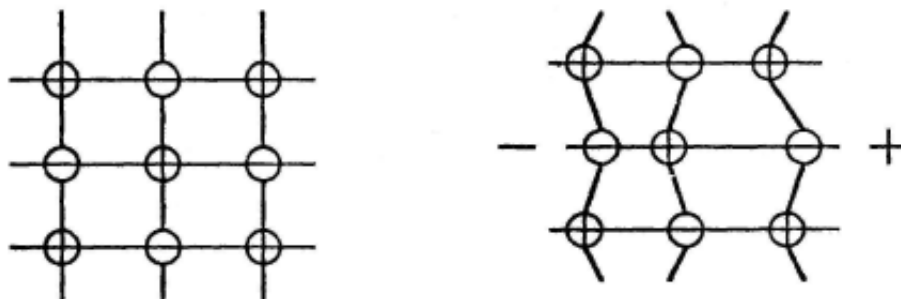


Figura 15 – Polarização iônica em um material. Apresenta-se o material sem aplicação de campo elétrico (esquerda) e com o campo elétrico (direita)

FONTE: Adaptado de PRESENTE (2004, p. 42).

Por também não depender da temperatura (assim como a polarização eletrônica), esses dois tipos de polarização são denominados de *polarização por deslocamento*. (SILVA, 2000, p. 32).

5.4.3 Polarização Orientacional

Também chamada de Polarização por orientação de dipolos (Figura 16), ocorre quando, após tendo aplicado um campo elétrico em determinada amostra de material, tal amostra preserva dipolos permanentes, na direção em que o campo foi aplicado.

Geralmente é mais estudada nos materiais poliméricos, por não ocorrer tão frequentemente em cerâmicas e derivados. Depende fortemente da temperatura, e ocorre mais lentamente (duração na ordem de 10^{-6} s).

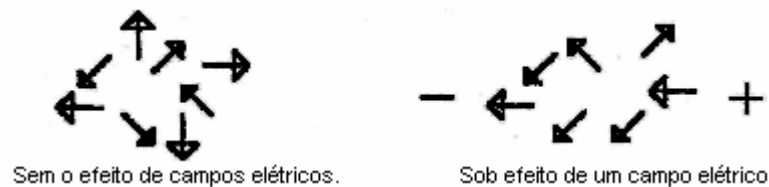


Figura 16 – Polarização orientacional por dipolos

Fonte: Adaptado de PRESENTE (2004, p. 43).

5.4.4 Polarização por Cargas Especiais

Segundo SILVA (2000, p. 32), esse tipo de polarização ocorre quando transportadores de carga elétrica (como elétrons e íons), se deslocando em direção às extremidades do material analisado, não são eletricamente neutralizados.

Com isso, cargas elétricas se acumulam nas extremidades (ou terminais) do material a ser polarizado, distorcendo o campo elétrico nele aplicado e causando a polarização do composto. Tal efeito pode ser observado na Figura 17.

Uma consequência secundária desse tipo de polarização é a eventual perda da constante dielétrica no material.



Figura 17 – Polarização por cargas especiais a partir de um Campo Elétrico aplicado

Fonte: Adaptado de PRESENTE (2004, p. 43).

5.4.5 Polarização Interfacial

Segundo BRESSAN (2006, p. 11), a polarização interfacial ocorre em materiais dielétricos não homogêneos, devido à formação de cargas espaciais nas interfaces entre regiões com diferentes condutividades e permissividades elétricas. Vale lembrar que, geralmente, essas duas regiões são formadas por materiais diferentes. Outra possibilidade de causa da polarização interfacial é a presença de *traps* (armadilhas), ou seja, distribuições irregulares de material ao longo da amostra. Tais distribuições acumulam cargas elétricas, e originam a polarização.

Todos os mecanismos de polarização, exceto polarização interfacial, são aproximadamente independentes do gradiente de tensão aplicado até que o campo elétrico atinja valores que provoquem ionização nas lacunas ou na superfície ou que ocorra a ruptura (PIAZZA, 2001, p. 16).

A polarização interfacial ocorre se dois materiais com diferente condutividade e permissividade (óleo e papel) estão dentro de um dielétrico. Assim os íons em óleo viajam para o eletrodo oposto e forma uma nuvem de carga que pode ser medida externamente como um efeito de polarização.

A polarização interfacial ocorre se dois materiais com diferente condutividade e permissividade (...) estão dentro de um dielétrico. Assim, os íons em um material viajam para o eletrodo oposto e forma uma nuvem de carga que pode ser medida externamente como um efeito de polarização. (PAULINO, 2010, p. 2).

Esse tipo de polarização é muito dependente da temperatura do material polarizado, e contribui principalmente para a polarização lenta do material. Daí a atenção especial para o surgimento de tensões de polarização nos cabos isolados através desse tipo de polarização.

Também chamada de Efeito Maxwell-Wagner, a polarização interfacial é bastante acentuada em regiões submetidas a tensões de baixa frequência (SILVA, 2000, p. 32). É bom ressaltar que as tensões contínuas podem ser consideradas tensões alternadas com frequência tendendo a zero (ou seja, um sinal alternado tende a se igualar a um sinal contínuo quando sua frequência se aproxima de zero). Portanto, é válido considerar a polarização interfacial nos ensaios de Tensão Contínua Aplicada (ensaios com o equipamento Hipot).

Segundo PIAZZA (2001, p. 16) “na polarização interfacial, o numero de cargas livre pode aumentar com a tensão elétrica devido a processos de injeção de carga e modificar a magnitude da polarização” e a condutividade é afetada de forma similar.

5.5 Resposta Dielétrica de um Material

5.5.1 Descarga de Corrente

Tome-se um capacitor ideal. Ao se aplicar uma tensão entre seus terminais, haverá a polarização do meio dielétrico do mesmo, e uma corrente passará a circular no circuito. Quando se retira essa tensão, observa-se que a corrente não pára imediatamente de circular. Como dito na seção 5.2, há um período transitório no qual a corrente do capacitor passa a ser descarregada.

Esse período é muito variável, e depende de alguns fatores como as propriedades físico-químicas do material dielétrico, sua temperatura, as características da tensão ou do campo elétrico aplicado, entre outros.

O comportamento da descarga de corrente é um meio bastante eficaz de mensurar a resposta dielétrica de determinado material, e vem sendo utilizado para determinar a eficiência da isolação de cabos isolados por material polimérico.

Observa-se que a corrente de descarga do dielétrico ocorre sempre no sentido inverso da corrente de carga. Desse modo, pode-se obter um gráfico para ambas a corrente como mostra a Figura 18:

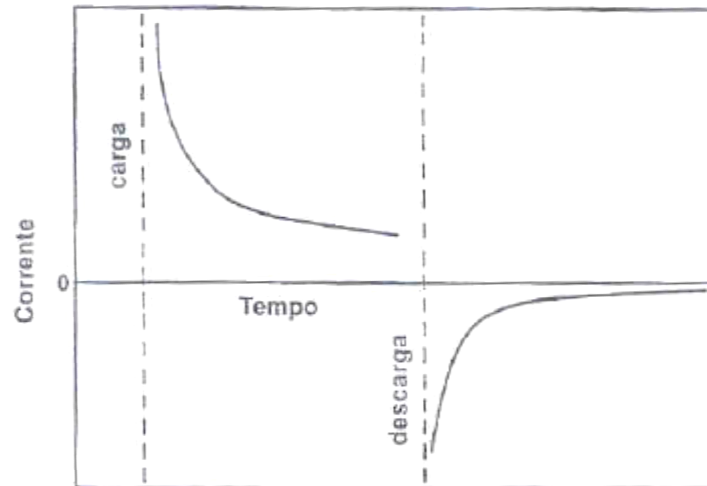


Figura 18 – Correntes de carga e descarga em um material dielétrico

Fonte: SILVA, 2000, p. 34.

5.5.2 Tensão de Retorno

Além da análise das correntes de descarga, a medida da tensão de retorno também tem sido muito útil para avaliar o comportamento de materiais dielétricos em relação a sua polarização.

Pode se produzir a tensão de retorno, efeito da polarização, aplicando um campo elétrico ao dielétrico. Ao ser retirada a excitação, o equilíbrio se restabelece após um intervalo de tempo finito, denominado tempo de relaxação (PIAZZA, 2001, p. 16).

Originalmente, o método da tensão de retorno era utilizado apenas para avaliar presença de umidade no papel utilizado em transformadores de energia (SILVA, 2000, p. 34). Com o passar dos anos, porém, a análise por tensão de retorno se estendeu a várias áreas de instalações e equipamentos elétricos.

Nos materiais dielétricos reais, a componente lenta da resposta implica em um grande tempo de relaxação (PIAZZA, 2001, p. 16).

5.5.2.1 Técnica de Tensão de Retorno

Experimentalmente, o processo de polarização de materiais dielétricos ocorre em um dado intervalo de tempo após a aplicação do campo de polarização. Da mesma forma, após a retirada do campo de polarização seguido de um breve curto-circuito, também se observa um intervalo de tempo para ocorrer uma completa despolarização do material.

Tal intervalo de tempo é consequência da decomposição da polarização completa do dielétrico: geralmente, os vários tipos possíveis de polarização mostrados na seção 5.4 são somados na prática. Portanto, há a adição de polarizações instantâneas e polarizações lentas na amostra. Sendo assim, a despolarização também é composta de fase instantânea (não considerável) e sua fase lenta. Esta última é a responsável pela formação da chamada Tensão de Retorno.

Esse comportamento dielétrico recebe dois tipos principais de interpretação: ou consideram-se apenas os efeitos da relaxação dipolar, ou os efeitos da formação de carga espacial (PIAZZA, 2001, p. 17).

Se considerado a teoria do efeito da relaxação dipolar, ainda teremos duas maneiras de abordar o circuito equivalente que segundo PIAZZA (2001, p. 18) pode ser pela teoria do circuito, enunciada por Schweidler-Gross ou pela teoria do campo, enunciada por Tiley.

Em ambas as abordagens, tomaram-se como hipóteses os princípios da superposição e o princípio de causalidade. (PIAZZA, 2001, p. 18). Então segundo PIAZZA (2001, p. 19) um sistema isolante real pode ser representado pela Figura 19, aonde C_g é a capacitância geométrica, R_g é a resistência de isolamento, R_p é a resistência de polarização de cada processo e C_p é a resistência.

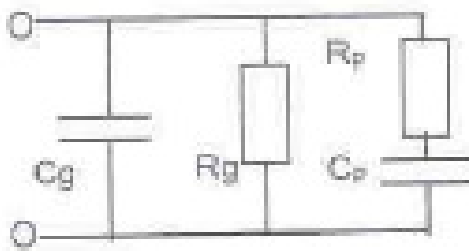


Figura 19 – Circuito equivalente simplificado de um sistema isolante real.

Fonte PIAZZA, 2001, p. 19

Basicamente, o teste de tensão de retorno é dividido em três etapas: a injeção de tensão de carga, a descarga de correntes e a medição da tensão de retorno.

Inicialmente, é injetada uma tensão elétrica constante chamada *Tensão de Carga* (U_c) sobre a amostra em questão. Essa tensão permanece aplicada durante um período de tempo conhecido, chamado *tempo de carga* (t_c), no qual se percebe a polarização do dielétrico analisado. Nesse momento, há a presença de cargas livres e cargas polarizadas na amostra (BREISSAN, 2006, p. 14). Aonde podemos definir seu circuito equivalente conforme Figura 20.

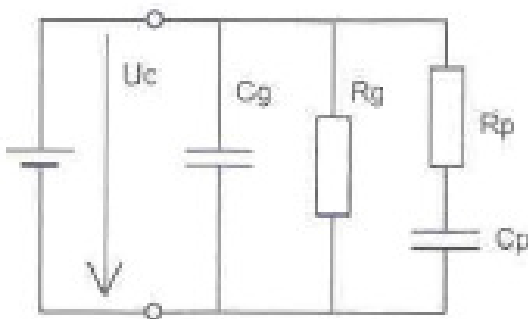


Figura 20 - Processo de Carga

Fonte PIAZZA, 2001, p. 20

Em um segundo momento Após a aplicação da tensão de carga, a amostra tem seus terminais curto-circuitados por um período chamado *tempo de descarga* (t_d). Durante o tempo de descarga, a tensão de carga não está mais injetada na amostra, e a tensão entre os terminais da amostra é nula. O curto-circuito é efetuado para que haja a descarga das cargas livres do material analisado. Assim, é iniciada a despolarização do dielétrico, com o surgimento de correntes de deslocamento. Seu circuito equivalente pode ser observado na Figura 21.

O processo de descarga pode ser interrompido antes ou após a descarga total, dependendo da constante de tempo do sistema isolante. O tempo t_d é feito menos que o tempo t_c pois se assim não o fosse, não haveria tensão de retorno (PIAZZA, 2001, p. 20).

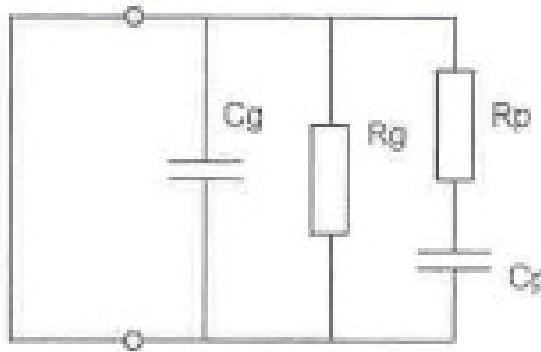


Figura 21 - Processo de curto-circuito

Fonte PIAZZA, 2001, p. 20

Por último, efetua-se a medição da tensão de retorno nos locais onde foi aplicada a tensão de carga, seu circuito equivalente pode ser representado pela Figura 22, onde U_r é a tensão de retorno.

É bom lembrar que, no período de medição, a despolarização continua sendo processada, de modo que as cargas inicialmente ligadas (polarizadas) ficam concentradas nos terminais da amostra possibilitando a medição da tensão de retorno. Segundo Piazza (2001, p. 21) A tensão aumentará até um valor máximo, U_{rmax} seguindo uma taxa de crescimento dU_r/dt , diminuindo depois devido a descarga através da resistência de isolamento R_g .

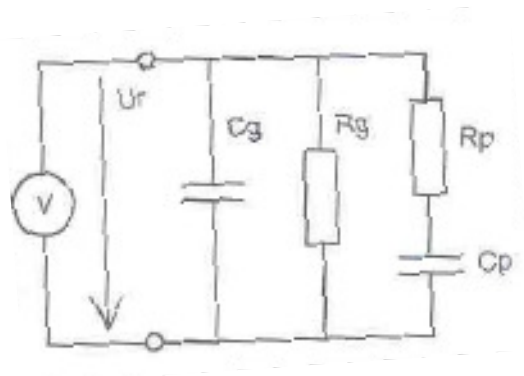


Figura 22 - Processo de tensão de retorno.

Fonte PIAZZA, 2001, p. 20

Na Figura 23, é apresentado um gráfico da tensão entre os terminais da amostra ao longo do tempo, durante as três fases do teste de tensão de retorno.

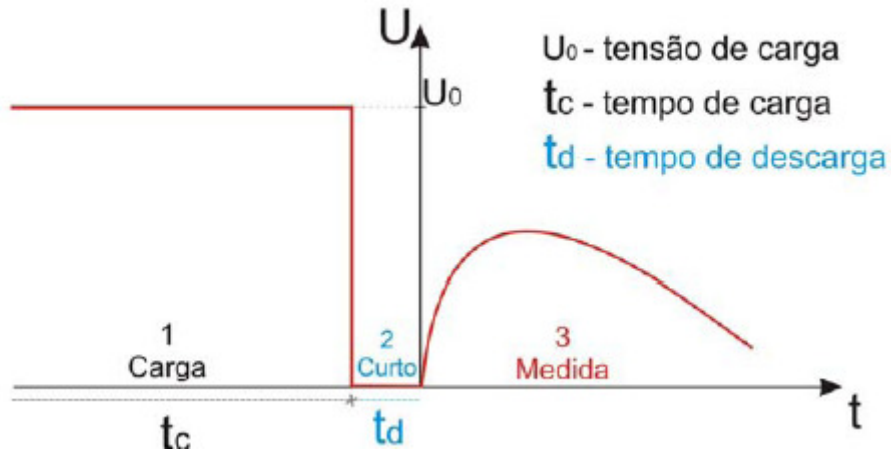


Figura 23 – Representação gráfica da tensão nos terminais de uma amostra, durante o teste de Tensão de Retorno

Fonte: BRESSAN (2006, p.14).

Nota-se, a partir da Figura 23, que a tensão de retorno assume uma forma variável, inicialmente crescente e, depois de certo tempo, após ser atingindo um valor máximo de tensão de retorno, decrescendo até chegar a um valor nulo.

O aumento da tensão de retorno com o tempo é o resultado de um decréscimo gradual da polarização, isto é, da relaxação dos dipolos excitados. Sem outras influências adicionais, ocorre um aumento contínuo da tensão de retorno. Com o aumento da tensão, processos de descarga externos devido à condução em componentes (...) internos ou externos se tornam importantes, e levam à posterior redução da tensão de retorno. Então, após alcançar um valor máximo, a tensão de retorno começa a diminuir. (BRESSAN, 2006, p. 15).

5.5.2.2 Teste de Ponto Único

A técnica de Teste de Ponto Único se resume a medir a tensão de retorno de uma amostra utilizando apenas um valor de tensão de carga ou, eventualmente, algum valor múltiplo desta.

Os resultados obtidos com essa técnica fornecem noções sobre o estado de envelhecimento do material analisado, principalmente quando relacionado a danos causados por contato com água.

Um dos principais fatores analisados no Teste de Ponto Único é o valor máximo atingido pela tensão de retorno durante a medição (última fase do teste). É sabido que cabos envelhecidos ou danificados por outra razão tendem a gerar uma tensão de retorno máxima maior que cabos em bom estado. Além disso, a tensão de retorno máxima também pode servir como base para vários outros tipos de diagnóstico. (BRESSAN, 2006, p. 16).

Quando ao tempo levado para a máxima tensão de retorno ser atingida, sabe-se que cabos danificados atingem esse valor mais rapidamente, em função da deterioração de sua isolamento. Caso esse tempo seja muito curto, pode haver indícios de presença de arborescência em água na isolamento da amostra experimentada, bem como maiores danos no material analisado.

BRESSAN (2006, p.17) apresenta um gráfico com as curvas características da tensão de retorno após o tempo de descarga, durante o Teste de Ponto Único, relacionando um cabo em condições normais (sem danos por envelhecimento), um cabo levemente envelhecido e um terceiro cabo, com danos graves em sua isolamento por conta do envelhecimento, conforme Figura 24.

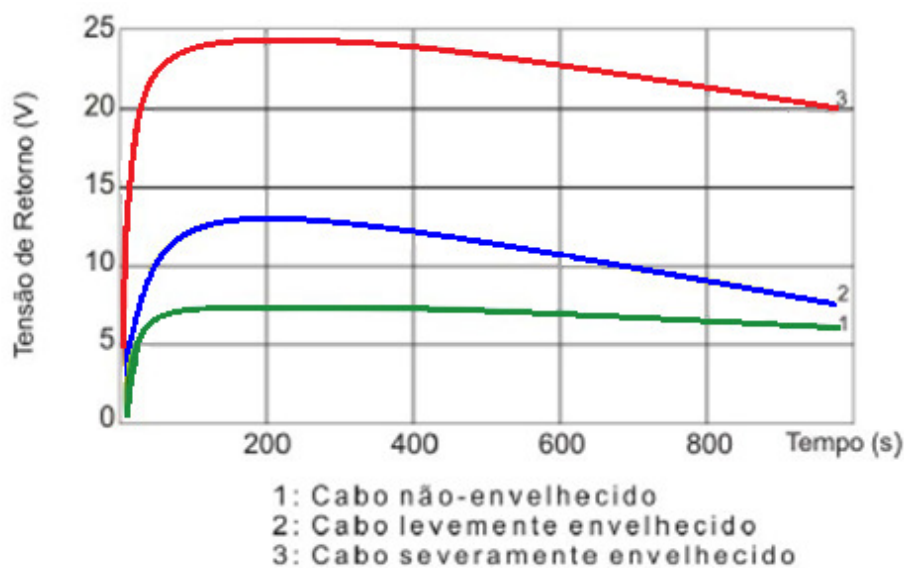


Figura 24 – Curvas características da tensão de retorno em cabos, conforme danos por envelhecimento

Fonte: BRESSAN (2006, p. 17).

Deve-se ressaltar que para esses testes de tensão de retorno somente são válidos quando já se conhece o comportamento de um cabo em condições normais de operação (não danificado), do mesmo fabricante, durante o mesmo teste aplicado. Assim, podem-se fazer

comparações de medidas e características elétricas, a fim de determinar o nível de dano causado no cabo ensaiado.

5.5.2.3 Fatores que Influenciam a Medida da Tensão de Retorno

É sabido que os materiais utilizados na fabricação de cabos são amplamente diversificados, conforme o fabricante, tipo de cabo, base química utilizada e até mesmo lote de produção. Deste modo, não há como estabelecer uma padronização geral para todos os cabos passíveis de teste de Tensão de Retorno no que se refere a características elétricas e comportamento durante o teste.

Alguns fatores influenciam largamente na medida da Tensão de Retorno, e seu conhecimento é necessário ao estudar os testes efetuados, para comparação entre vários tipos de amostra.

Um dos principais influenciadores das medidas no teste é a história prévia do material, ou seja, o conjunto de suas propriedades mecânicas, químicas, elétricas e térmicas. Em medidas em campo, os cabos já instalados sofrem pouco ou nenhum esforço físico-químico ou mecânico. Em medidas laboratoriais, ou prévias à instalação do cabo, porém, os fatores apresentados constituem importante fonte de divergências caso não sejam conhecidos casos de referência. (BRESSAN, 2006, p. 18).

Outro fator que interfere na medida da tensão residual durante o teste é a presença de cargas elétricas residuais no material dielétrico do cabo. Caso a amostra possua cargas em sua isolamento antes de se realizar o teste de tensão de retorno, é provável que a medição não se dê de forma adequada e, portanto, o diagnóstico seja impreciso.

Na aplicação original do teste de tensão de retorno (em transformadores com isolamento papel-óleo), era comum observar grande influência da temperatura nos resultados do ensaio.

5.5.3 Modelagem de um Circuito Dielétrico e Características de um Sistema de Medição de Tensão de Retorno

5.5.3.1 Circuito Dielétrico Equivalente

Segundo PRESENTE (2004, p. 44), um circuito dielétrico pode ser expresso idealmente como a junção de elementos de capacitância (C) e resistência (R). Tendo como base as propriedades físicas e elétricas de cada material dielétrico, tem-se o circuito equivalente a seguir (Figura 25):

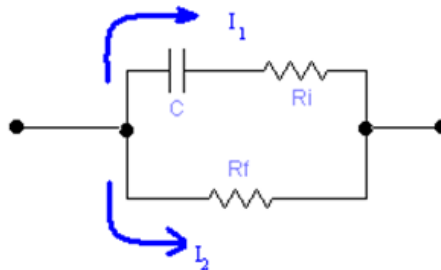


Figura 25 – Circuito dielétrico equivalente

Fonte: Adaptado de PRESENTE (2004, p. 44).

Pode-se considerar “ C ” como sendo a capacitância do material dielétrico. “ R_i ” representa a permissividade elétrica da amostra, responsável pela perda energética no momento da polarização. Tal perda ocorre pela conversão de energia cinética em térmica pelas partículas se polarizando (PRESENTE, 2004, p. 45). Já a resistência “ R_f ” corresponde à condutância elétrica do meio, representada pelas cargas elétricas “livres” no material dielétrico.

Em um material dielétrico ideal, “ R_i ” seria nulo, e “ R_f ” teria valor infinito. Todavia, em razão da rigidez dielétrica e da resistência superficial de descarga dos materiais na prática, tais valores nunca são realmente alcançados.

Segundo PRESENTE (2004, p. 46), os valores de capacitância e resistência do circuito dielétrico equivalente são influenciados por vários fatores, entre eles a fadiga física do material em questão, a temperatura a que ele está submetido, e a frequência da tensão aplicada na amostra.

Sabe-se que o processo de polarização se dá, geralmente, de forma linear em relação ao campo elétrico aplicado no material dielétrico. Conforme o tipo de material utilizado, porém, essa linearização pode passar a ser um comportamento diferenciado devido aos vários tipos de polarização sofridos e às perdas energéticas durante o processo de polarização.

Desse modo, considerando as cargas elétricas surgidas por meio dos vários tipos de polarização, pode-se estruturar um modelo do circuito dielétrico equivalente mais realista e aceitável, onde “ Q_0 ” representa a carga elétrica do capacitor no vácuo, e as demais cargas (Q_e , Q_i , Q_d e Q_s) representam alguns tipos de polarização apresentados (eletrônica, iônica, dipolar e estrutural). Conforme apresentado Figura 26, as resistências elétricas em série com as cargas representam as perdas energéticas ocorridas durante o processo de polarização (PRESENTE, 2004, p. 46).

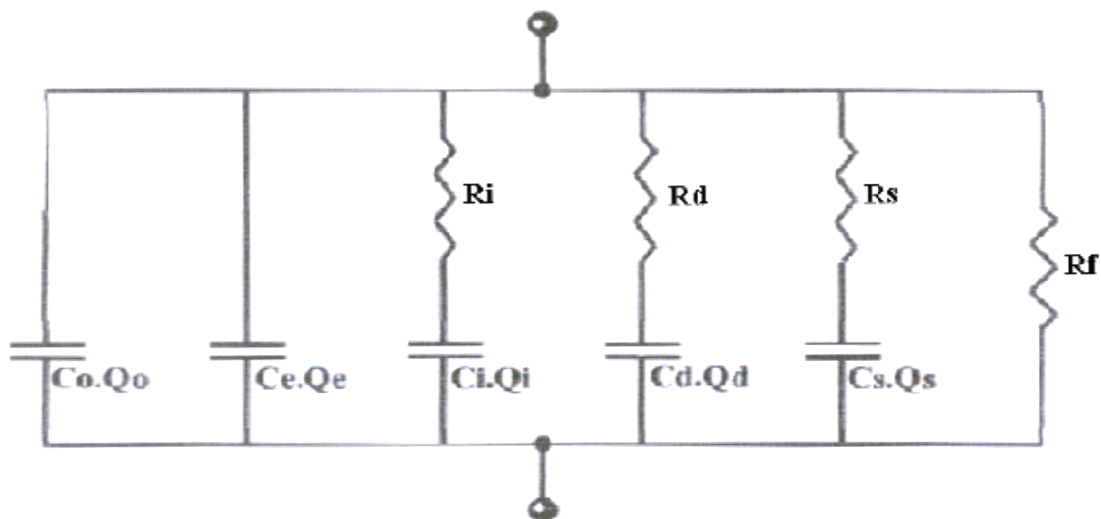


Figura 26 – Circuito dielétrico equivalente, considerando os vários tipos de polarização

Fonte: PRESENTE, 2004, p. 46

5.5.3.2 Características de um Sistema de Medição de Tensão de Retorno

Basicamente, um sistema de medição de tensão de retorno deve ter especificações adaptadas aos três procedimentos descritos anteriormente do trabalho, no que se refere à realização dos testes de Tensão de Retorno.

Contudo, algumas características elétricas também devem ser obedecidas no circuito de medição da tensão, para que não ocorra o surgimento de correntes ou tensões indesejadas ao longo dos ensaios. A seguir, são apresentadas as principais características, bem como a razão por obedecer a essas especificações.

Inicialmente, a impedância de entrada do sistema de medição (aqui chamada Z_m) deve ser bastante alta. Além disso, sabe-se que durante a realização do teste de tensão de retorno, e da medida da mesma, a impedância total do cabo ensaiado Z_0 (ou da amostra submetida a ensaio) fica conectada em paralelo com Z_m .

Desse modo, pode-se calcular a impedância total do sistema de medição (aqui chamada de $Z_{eq.}$) juntamente com o material ensaiado, através da equação:

$$Z_{eq.} = \frac{Z_m \cdot Z_0}{Z_m + Z_0} \quad (7)$$

Analisando a equação acima, conclui-se que a impedância total do sistema terá sempre valor menor à resistência de entrada da medição, pois há a redução em função da resistência da amostra, ligada em paralelo. Portanto, deve-se tomar especial atenção ao conectar terminais, carcaças e conectores durante a realização do ensaio, para que a corrente circulante não seja maior que o previsto (BRESSAN, 2006, p. 19).

Desenhando um circuito equivalente do sistema de medição da tensão de retorno juntamente com o cabo amostrado, tem-se:

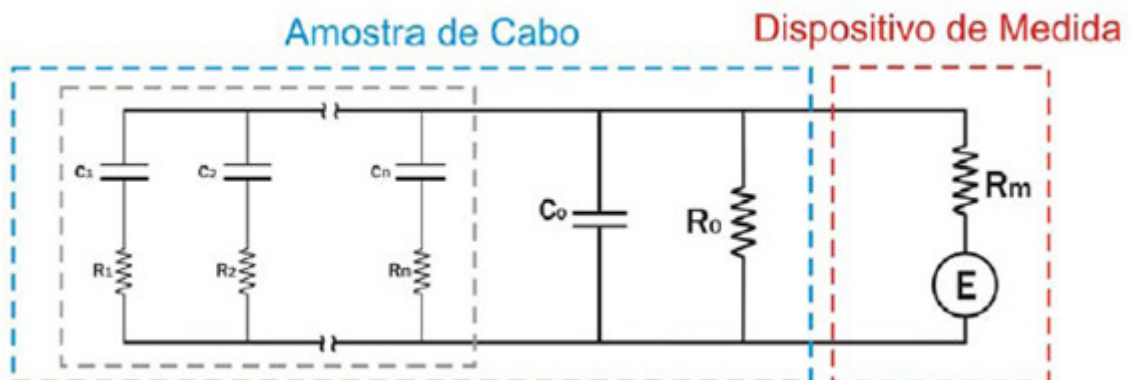


Figura 27 – Circuito equivalente do sistema de medição da tensão de retorno

Fonte: BRESSAN, 2006, p.20.

Vale ressaltar que a impedância do dispositivo de medida (na Figura 27, representada por R_m) deve ser sempre maior que a impedância do cabo ensaiado (na figura, R_o). Desse modo, garante-se uma medição estável e legível da tensão de retorno do sistema ao longo do tempo. Para fins práticos, recomenda-se utilizar uma resistência de entrada do dispositivo de medida na ordem de $10^{12} \Omega$, de forma a obter resultados interpretáveis. Comercialmente, não há muitos fabricantes de medidores específicos para testes de tensão de retorno em equipamentos elétricos. Segundo BRESSAN (2006, p. 20), os principais fabricantes são TETTEX e SebaKMT. Tais equipamentos, porém, são mais utilizados para análise de papel impregnado com óleo, para aplicação em isolamento de transformadores.

Mas há utilização desse equipamento conforme PIAZZA (2001, p. 69) “foram realizadas medições de tensão de retorno utilizando medidor de tensão de retorno marca TETTEX, modelo 5461”. Também foi utilizado o mesmo equipamento segundo SUJANI (2010, p. 20) “as medições do perfil de retorno de tensão foram realizadas utilizando o medidor Tettex, 5461”. A medição da tensão de retorno (RVM) determina os espectros de polarização e as medições são feitas automaticamente através do aparelho. A resposta de tensão de retorno é dada de forma numérica ou gráfica. O sucessor do modelo RVM 5461 é o modelo RVM 5462 (Figura 28).



Figura 28 - Equipamento RVM Medidor automático de tensão de retorno

Fonte: TETTEX, 2011, p. 1.

6 SEGURANÇA

A segurança se tornou um assunto de grande importância nas indústrias. Com o passar do tempo, o aumento de pesquisas a respeito do assunto e a melhora de tecnologia vêm ajudando a evitar a ocorrência de acidentes de trabalho em geral. Vê-se aí a grande importância do estudo do fator segurança para a implantação de novos paradigmas na Engenharia.

6.1 EFEITOS DA ELETRICIDADE NO CORPO HUMANO

6.1.1 O que é Eletricidade?

O conceito de “Eletricidade” já foi estudado e apresentado de diversas formas nos mais variados meios acadêmicos. Contudo, tal variedade de informação dá margem a alguns desentendimentos e contradições ao se pesquisar os fundamentos teóricos do assunto.

Eletricidade pode ser definida como a forma de energia natural ligada aos elétrons, que se manifesta por atrações, repulsões e fenômenos luminosos, químicos e mecânicos (...). (...) É a eletricidade a forma de energia mais utilizada na execução de trabalho mecânico necessário à produção de bens de consumo e, no que se diz respeito aos ambientes de trabalho, sua presença se faz sentir em todas as etapas (...). (GONÇALVES, 2008, p. 244).

Há muito tempo a Eletricidade vem sendo utilizada de forma inteligente pelo homem a fim de satisfazer suas necessidades, desde as mais básicas, como aquecimento e iluminação, até a utilização de sistemas microprocessados em um processo industrial, por exemplo. Apesar disso, somente em meados do século dezesseis o homem começou a descobrir os fenômenos que envolvem elétrons e suas interações, para então inventar mecanismos e métodos que permitissem utilizar a energia em uma forma vantajosa e viável para si.

Durante séculos, a eletricidade foi vista como pouco mais que uma propriedade curiosa de certas substâncias que soltavam faíscas quando em atrito. Então, na década de 1790, Alessandro Volta deu início à investigação científica que proporcionou uma explosão de invenções. Aquela força até então inconsequente revelou-se responsável por tudo (...) Para controlá-la, criamos um mundo de maravilhas – que inclui montanhas-russas e radares, redes de computadores e a psicofarmacêutica. (BODANIS, 2005)

A utilização de Eletricidade é muito frequente e relevante na atualidade e, portanto, deve ser feita de maneira atenciosa e respeitosa, uma vez que apresenta perigos reais ao ser humano através de vários meios.

No aspecto da Engenharia Elétrica, o convívio profissional e acadêmico com tal ciência traz proximidade do estudante a assuntos relacionados à Eletricidade e suas interações com o ser humano. Assim, faz-se necessário conhecer detalhadamente suas características, benefícios, utilizações, consequências e até mesmo o perigo proveniente de um emprego incorreto de tão importante fator no mundo atual.

Nos vários níveis de existência e utilização da Energia Elétrica, desde sua geração até o consumo pelo homem, sabe-se que há ameaças à segurança de pessoas, seja um técnico da área trabalhando em uma subestação, por exemplo, ou mesmo uma dona de casa utilizando energia nos seus afazeres domésticos.

A eletricidade é vital na vida moderna (...), quer propiciando conforto aos nossos lares, quer atuando como insumo nos diversos segmentos da economia. Por outro lado o uso da eletricidade exige do consumidor a aplicação de algumas precauções em virtude do risco que a eletricidade representa (...). (ALCANTARA, 2011).

6.1.1.1 Segurança e a Energia Elétrica

De acordo com OLIVEIRA (2007), devido aos grandes riscos do manuseio de equipamentos relacionados à energia elétrica, juntamente com a grande utilização da eletricidade nos dias de hoje, todo tipo de instalação, manutenção, produção ou montagem relacionado com a eletricidade deve ser acompanhado de supervisão por profissionais competentes, utilização adequada de equipamentos de segurança e execução respeitosa e consciente de trabalhos em tais ambientes.

Atualmente, no Brasil, a grande referência para normas de segurança em atividades que envolvem eletricidade é a Norma Regulamentadora NR-10. Trata-se de uma norma gerenciada pelo Ministério do Trabalho. Segundo SCHAFRANSKI (2011), a NR-10 garante a segurança em instalações elétricas e previne acidentes, através de proteções básicas e supletivas nas instalações.

Todas as Normas Regulamentadoras em vigor no Brasil (atualmente são trinta e três) têm como objetivo esclarecer e discutir sobre o risco de ocorrência de acidentes em ambientes de trabalho, bem como prevenir e combater tais acidentes.

A NR-10, especificamente, trata da Segurança do Trabalho em serviços que envolvem eletricidade.

Esta Norma Regulamentadora – NR estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas ou serviços de eletricidade. (BRASIL..., 2009, p.1).

Desse modo, todos os profissionais que trabalhem em contato com eletricidade de alguma forma devem estar cientes da norma NR-10, bem como aplicá-la na prática para prevenir acidentes.

Enfim, a boa prática da Segurança no Trabalho sempre assegura um bom desenvolvimento das atividades, bem como a satisfação de trabalhadores e supervisores quanto à saúde e segurança do indivíduo e da equipe profissional como um todo.

6.1.2 O Choque Elétrico

Entre as várias formas possíveis de danos físicos no corpo humano pelo fenômeno da Eletricidade, o mais conhecido e seguramente o mais recorrente é o *choque elétrico*. Várias bibliografias sobre segurança do trabalho e eletricidade básica apresentam definições do choque. Entre todas, observa-se concordância sobre o choque ser o efeito que ocorre a partir do contato do corpo humano com a eletricidade (mais especificamente, com uma corrente elétrica, ou seja, fluxo ordenado de elétrons).

Dentre os riscos inerentes ao desenvolvimento de atividades com energia elétrica, o choque elétrico, embora não seja o único, certamente é o de maior relevância por ser definido como um estímulo rápido e acidental do sistema nervoso humano (condutor de eletricidade) pela passagem de uma corrente elétrica. (GONÇALVES, 2008, p. 244).

Define-se choque elétrico como “o conjunto de perturbações de natureza e efeitos diversos, que se manifestam no organismo humano ou animal, quando este é percorrido por corrente elétrica” (ALCANTARA, 2011). Portanto, qualquer pessoa que tenha contato com algum tipo de fonte de corrente elétrica está sujeito a levar um choque.

Segundo SPERANDIO (19--), tal contato pode ocorrer de diversas formas, desde uma tomada residencial a uma linha de transmissão, por exemplo. Logicamente, em atividades profissionais do ramo da Engenharia Elétrica, o risco de choques e contato com correntes elétricas aumenta consideravelmente. A necessidade de testes, ensaios e validação de instalações acarreta em várias situações nas quais o profissional deve submeter-se a tensões e correntes elevadas. Nesses casos, é imprescindível obedecer de forma correta e responsável às instruções de segurança aprovadas por norma.

6.1.2.1 Tensão de Toque x Tensão de Passo

Segundo OLIVEIRA (2007), o choque ocorre pelo contato do corpo humano com uma diferença de potencial, ocasionando portanto, uma passagem de corrente elétrica pelo organismo. Em sistemas com aterramento, há dois tipos de diferença de potencial aos quais uma pessoa pode estar sujeita. São eles a *tensão de toque* e a *tensão de passo*.

A tensão de toque pode ser definida como “a diferença de potencial entre o ponto de uma estrutura metálica, situado ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 metro da base da estrutura” (KINDERMANN, 2002, p.127). Sistemas de aterramento são dimensionados para que essa tensão de toque não ultrapasse valores admissíveis para contato direto com o ser humano.

Geralmente, a tensão de toque é responsável por choques elétricos quando o indivíduo encosta diretamente em um objeto ou estrutura metálica. Nesse caso, há uma diferença de potencial entre o ponto de contato homem-objeto e a terra, ocasionando a corrente elétrica responsável pelo choque.

Já a tensão de passo, por sua vez, é a diferença de potencial existente entre os dois pontos inferiores do organismo (ou seja, entre os dois pés da vítima de choque). Kindermann (2002, p. 128) apresenta a definição clássica de potencial de passo para análise de segurança como sendo a diferença de potencial que aparece entre dois pontos no chão, distanciados de 1 metro (para pessoas), devido à passagem de corrente de curto-circuito pela terra.

Geralmente, a tensão de passo acontece menos frequentemente que a tensão de toque, entretanto, pode ocasionar acidentes e choques elétricos da mesma forma: uma diferença de potencial, inicialmente não percebida pela vítima, é aplicada em seu corpo

ocasionando a passagem de corrente elétrica no organismo. O caminho percorrido pela corrente nesse caso geralmente se limita à parte inferior do corpo, não ocasionando riscos tão graves de fibrilação ou outros problemas cardíacos e respiratórios quando nos choques provocados por tensão de toque.

6.1.3 Efeitos do Choque Elétrico no Corpo Humano

A corrente elétrica, ao passar pelo corpo humano, pode ocasionar vários tipos de lesões e reações prejudiciais à saúde, desde uma pequena sensação de formigamento à parada cardiorrespiratória e risco de morte. Além dos efeitos primários decorrentes da ação da própria corrente elétrica, pode haver efeitos secundários como consequência de quedas, batidas ou outra colisão mecânica, dependendo da localização da vítima no momento do choque.

Deste modo, é de vital importância que o indivíduo que trabalha em contato direto com a energia elétrica respeite sempre as normas de segurança, utilize equipamentos adequados, e efetue suas atividades em condições adequadas de trabalho e em um local apropriado. Caso haja risco de efeitos secundários no caso de um eventual choque elétrico, é preciso levar tal possibilidade em consideração, prevenindo acidentes em quedas, batidas, entre outros. O choque elétrico “pode ocasionar contrações violentas dos músculos, a fibrilação ventricular do coração, lesões térmicas e não térmicas, podendo levar a óbito como efeito indireto as quedas e batidas, etc.” (FUNDACENTRO, 2011, p. 19).

6.1.4 Outros Fatores que Influenciam a Gravidade do Choque Elétrico

Sabe-se que o choque, em geral, pode apresentar várias consequências, diretas ou indiretas, ao organismo humano. Tais consequências variam muito em cada caso específico, porém, há alguns fatores que podem determinar a gravidade do choque, conforme a situação.

Conforme Kindermann (2002, p. 115-116.), os fatores mais relevantes à gravidade do choque e suas consequências são:

- A intensidade da corrente elétrica;
- A natureza da corrente elétrica envolvida (contínua ou alternada);
- Sua frequência;
- A tensão elétrica existente;
- O tempo de exposição da vítima ao choque;
- O caminho percorrido pela corrente no corpo da vítima;
- O estado de umidade do organismo;
- As condições orgânicas do indivíduo.

A seguir, será discorrido sobre cada um desses fatores, bem como sua influência na gravidade do choque como um todo. Vale ressaltar que, em todos os momentos onde há risco de ocorrência de choque elétrico, deve-se lembrar dos fatores acima mencionados, e tomar medidas preventivas para que a gravidade de um choque, caso o mesmo ocorra, seja a menor possível.

6.1.4.1 Intensidade da Corrente Elétrica

Segundo Gonçalves (2008, p. 245), o limiar da percepção da corrente elétrica pelo homem é de aproximadamente 5 mA para corrente contínua. Já para uma corrente elétrica alternada em frequência industrial (50 a 60 Hz), o limiar passa a ser de apenas 1 mA. Ou seja, para correntes com valor abaixo de 1 mA, os efeitos do choque elétrico não são sentidos nem causam dano para a vítima.

Vale ressaltar que ambos os tipos de corrente elétrica (contínua e alternada) são danosos ao corpo humano, produzindo as mesmas consequências físicas (inclusive a morte). A única diferença entre elas é a intensidade de corrente necessária para atingir determinados níveis de periculosidade. Sendo assim, medidas de precaução devem ser tomadas independentemente da natureza da corrente elétrica envolvida.

Para valores imediatamente acima dos apresentados, a vítima passa a sentir sensações de aquecimento (no caso de corrente contínua) ou formigamento (no caso de corrente alternada) no local onde se deu o contato de choque elétrico. Essas são as percepções mais brandas sentidas por uma vítima de choque elétrico e, nesse caso, o primeiro impulso é cortar o contato do organismo com a energia elétrica.

Um limiar perigoso de ser ultrapassado no choque elétrico é o de 15 a 25mA (para corrente alternada). A partir desse valor, é provável que ocorra a impossibilidade da vítima soltar a fonte do choque, ocasionando um tempo de exposição maior à corrente e, conseqüentemente, efeitos mais graves à saúde. Nesse nível de intensidade, o choque também pode ocasionar problemas respiratórios e asfixia.

Em casos mais graves que os abordados acima, as conseqüências do choque variam muito, e dependem de uma série de fatores. Os mais determinantes estão geralmente relacionados ao tipo de corrente elétrica envolvida, suas características e a fatores situacionais. Devem, portanto, ser analisados individualmente a cada caso.

Em intervalos de corrente de 75 a 300 mA, ou valores próximos, é comum ocorrer a fibrilação do coração, mesmo que em intervalos de tempo reduzidos (da ordem de alguns segundos). Já com intensidades mais altas (acima de 300 mA), o risco de fibrilação ventricular ou mesmo de morte imediata é reduzido, porém há grande possibilidade de ocorrência de queimaduras graves nas regiões do corpo pelas quais a corrente elétrica passou.

A seguir, a Tabela 4 apresenta os principais limiares de sensação do choque elétrico, e seus efeitos no corpo humano.

Tabela 4 – Limites de sensação do corpo humano ao choque elétrico.

| Corrente Elétrica (mA) | | Reação Fisiológica | Conseqüência |
|------------------------|----------|--|---|
| CA | CC | | |
| <25 | <80 | <ul style="list-style-type: none"> • 1 mA: Limiar da sensação – formigamento; • De 5 a 15 mA: Contrações musculares; • De 15 a 20 mA: Contração violenta, e impossibilidade de soltar a fonte do choque. Problemas respiratórios. | Caso a corrente tenha valor próximo a 25 mA, pode haver asfixia e morte aparente. |
| 25 a 80 | 80 a 300 | <ul style="list-style-type: none"> • Sensação insuportável; • Contração muscular violenta; • Perigo de asfixia. | Possibilidade de morte aparente. |
| >80 | >300 | <ul style="list-style-type: none"> • Queimaduras graves; • Necrose do tecido; • Fibrilação ventricular; • Asfixia imediata. | Provável morte aparente, queimaduras graves e óbito. |

Fonte: Adaptado de Kindermann (2002, p. 114)

6.1.4.2 Natureza da Corrente Elétrica Envolvida

Outro fator relevante na determinação da gravidade do choque elétrico é a característica da corrente elétrica envolvida. Sabe-se que a corrente elétrica alternada (CA) oferece maior risco à vítima de choque elétrico, pois sua passagem faz os músculos se contraírem de acordo com a frequência da corrente. A frequência normalmente utilizada em instalações e, portanto, a que está presente na maioria dos acidentes envolvendo choque elétrico, é de 60 Hz.

Observa-se, de acordo com a Tabela 4, que os valores limite de sensação para corrente alternada são significativamente menores que para corrente contínua, também devido às razões apresentadas acima.

6.1.4.3 Frequência da Corrente Elétrica

Segundo Alcântara (2011), o limiar de sensação do choque elétrico é diretamente proporcional à frequência da corrente elétrica envolvida (quando a mesma é de natureza alternada). Portanto, quanto maior a frequência, menor a sensibilidade do organismo ao choque. Por outro lado, correntes com frequências baixas (como é o caso das frequências industriais, entre 50 e 60 Hz) ocasionam efeitos mais graves na vítima.

Na maior parte das vezes, a frequência da corrente elétrica alternada envolvida nos choques elétricos é a industrial, ou seja, com valores baixos. Mesmo em tensões mais elevadas, a frequência não sofre alterações, pela própria característica do sistema elétrico utilizado. Portanto, é comum que a frequência da corrente seja um alto fator de riscos, apresentando valores próximos a 60 Hz.

Tendo como base esses dados, a seguir é apresentada a Figura 29, que evidencia a relação entre a frequência da corrente elétrica envolvida no choque (eixo horizontal) e o limiar de sensibilidade da corrente no corpo humano (eixo vertical). Percebe-se um aumento aproximadamente exponencial de uma grandeza em relação à outra, confirmando a teoria pesquisada.

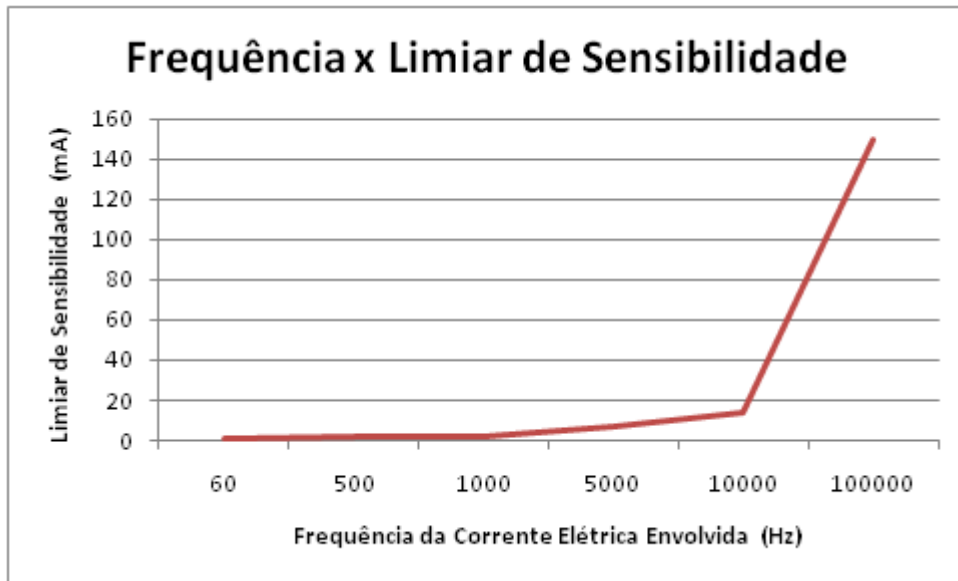


Figura 29 – Frequência da corrente elétrica em função do Limiar de Sensibilidade humano

Fonte: ALCANTARA (2011).

6.1.4.4 Tensão Elétrica Existente

Conforme o nível de tensão existente na fonte que gerou o choque elétrico, pode haver níveis maiores ou menores de carga elétrica circulando no corpo da vítima e, por conseguinte, consequências mais ou menos graves em virtude do choque.

Nos casos mais frequentes, a tensão envolvida é a utilizada em tomadas residenciais, ou seja, de 127 ou 220 V em tensão alternada, com frequência industrial. Contudo, os choques ocorridos em locais de trabalho podem ocorrer em tensões maiores, dependendo da área de atuação profissional em cada caso.

Um grande modelo é o caso de estudo de nosso Trabalho de Conclusão de Curso: a ocasião de testes de cabos de média tensão. Conforme o nível de segurança do local e o grau de instrução dos profissionais envolvidos, o choque pode ocorrer em tensões de até 13,8 kV, por exemplo. Nesses casos, a corrente a circular no organismo em casos de acidente com energia elétrica costuma ser muito maior que a corrente que surge em choques por tomadas residenciais, por exemplo.

6.1.4.5 Tempo de Exposição ao Choque

Naturalmente, quanto maior o tempo de exposição da vítima ao choque, maiores os danos causados pelo mesmo. Porém, mesmo com uma intensidade de corrente relativamente baixa (como 10 mA, por exemplo), em um tempo de exposição prolongado a vítima tem riscos de sofrer danos muito graves.

Por outro lado, num caso de choque com corrente de valor muito elevado (da ordem de 500 mA ou mais), mesmo um tempo de exposição mínimo pode causar até mesmo a morte instantânea do indivíduo.

Segundo Kindermann (2002, p. 125-127), uma equação suficientemente eficaz para calcular a máxima corrente elétrica suportada por uma pessoa de 50 kg ou mais de massa foi descoberta por Charles Dalziel, e é a seguinte:

$$I_{\text{choque}} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

Sendo I_{choque} a intensidade de corrente (em Ampéres [A]) limite para não causar fibrilação no coração humano, t o tempo (em segundos) da duração do choque, e considerando que $0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$. Kindermann (2002, p. 127) esclarece que “a expressão (...) é usada para obtenção do limite permissível e aceitável de corrente, para que não ocorra fibrilação, durante o tempo em que a pessoa fica submetida à tensão de toque ou de passo.”

6.1.4.6 Percurso da Corrente Elétrica

Outro fator muito importante para determinar a gravidade do choque é o trajeto que a corrente elétrica percorre no corpo da vítima. Os casos mais graves ocorrem quando o trajeto da corrente passa pelo coração.

Vale ressaltar que, para que uma corrente elétrica percorra determinado meio, é preciso que haja uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre dois pontos desse meio. Portanto, o choque somente ocorre quando há tensão elétrica entre dois pontos do corpo

humano. Conforme a localização desses dois pontos no corpo pode haver diferentes consequências à vítima. Caso a corrente elétrica passe pelo coração, há a possibilidade de fibrilação e consequências mais graves.

A Figura 30 mostra os caminhos que a corrente elétrica segue nos casos mais comuns de choque elétrico. Note-se o desenho (2), comum de acontecer em casos de choque por tensão de toque, bem como o desenho (5), representando o caminho usualmente tomado pela eletricidade quando há ocorrência de choque elétrico por tensão de passo.

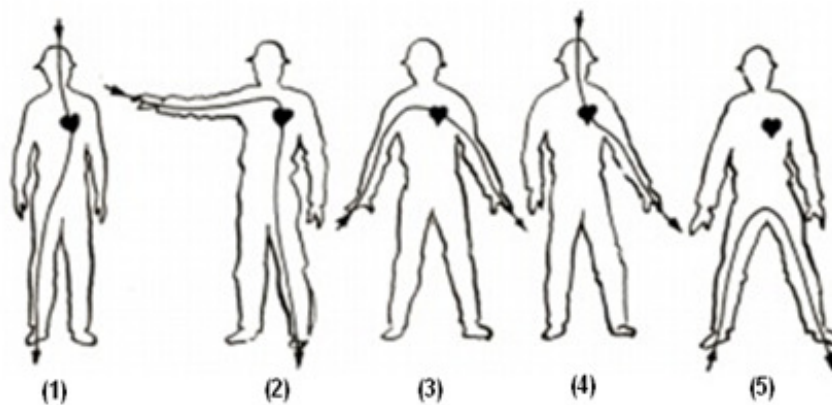


Figura 30 – Caminho da corrente elétrica nos tipos de choque mais comuns

Fonte: FUNDACENTRO, 2011, p. 20.

Um dos choques mais perigosos ao ser humano é o que ocorre quando há diferença de potencial entre as duas mãos do indivíduo (desenho [3]). Neste caso, o caminho primário a ser percorrido pela corrente elétrica passa diretamente pelo coração, sem nenhum desvio a qualquer outra parte do corpo, acentuando ainda mais o risco de complicações cardíacas.

6.1.4.7 Umidade do Organismo

O corpo humano, como qualquer outro material, possui uma resistência elétrica. Quando uma pessoa é submetida a um choque elétrico, a resistência de seu corpo irá limitar a corrente elétrica que passa por ela, proporcionalmente à tensão elétrica existente.

A intensidade da corrente que circulará pelo corpo da vítima dependerá, em muito, da resistência elétrica que esta oferecer à passagem da corrente, e também de qualquer outra resistência adicional entre a vítima e a terra. A resistência que o

corpo humano oferece à passagem da corrente é quase que exclusivamente devida à camada externa da pele, a qual é constituída de células mortas. Esta resistência está situada entre 100.000 e 600.000 ohms, quando a pele encontra-se seca e não apresenta cortes, e a variação apresentada é função da sua espessura. (FUNDACENTRO, 2011).

Quando a pele apresenta umidade em sua superfície, a resistência do corpo humano cai consideravelmente. O mesmo ocorre quando alguma parte do corpo possui outro fator que facilite a passagem de corrente (o fator mais recorrente é a própria água, em casos onde a pessoa está molhada ou até mesmo imersa). Com isso, a corrente que circula no momento do choque é ainda maior.

Analisando tais dados, conclui-se que a gravidade do choque e a possibilidade de presença de danos maiores aumentam proporcionalmente ao nível de umidade da vítima que está submetida à corrente elétrica.

7 ESTUDO DE ENSAIOS

Após o embasamento teórico apresentado em relação à técnica de medição de tensão de retorno, serão apresentados casos onde foram realizados, na prática, o ensaio para medição de tensões residuais em cabos de média tensão. A mais importante razão para teste de isolamento é garantir a segurança pública e pessoal (VORTEX, 2011).

Dada a importância da realização do ensaio é igualmente importante a ciência do método de ensaio e suas adversidades que segundo BRESSAN (2006, p. 13) “originalmente denominada “tensão de regeneração”, o surgimento desta tensão fez parte de um conjunto de fenômenos descritos como anomalias. Também, denominada de “*after-effect*”, ou efeito posterior, este fenômeno é atualmente conhecido como tensão de retorno, “*return voltage*””.

7.1 Ensaio Prático Realizado por Bruno Nahuili Bressan

BRESSAN (2006, p. 2) apresenta que seu trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema que possibilite realizar medidas de tensão de retorno em amostras de cabos de média tensão isolados em polietileno entrecruzado (XLPE) sob diferentes temperaturas e, dessa forma, possibilite estimar a influência da temperatura nestas medidas.

Na realização do ensaio inicialmente houve a descrição do experimento, onde são apresentadas as características do sistema de medida desenvolvido. Também foi necessária a descrição das características e do processo de preparação das amostras de cabo utilizados nas medidas de tensão de retorno, conforme apresentado a seguir neste trabalho.

Para a realização do ensaio foi necessário o desenvolvimento de equipamentos específicos para o trabalho e o uso de equipamentos comerciais.

Os equipamentos comerciais utilizados foram:

- Fonte DC HEWLETT PACKARD, modelo 6521A, 0-1000 V DC / 0-200 mA;
- Eletrômetro KEITHLEY, modelo 617;
- Computador Pentium 100 MHz;

Os equipamentos desenvolvidos para montagem do sistema foram:

- Câmara de teste;
- Sistema para controle da temperatura;
- Sistema de chaveamento;
- Circuito de controle para comutação da chave;

* Também foi desenvolvido um software de controle do circuito BRESSAN (2006, p. 23);

De forma que este trabalho fique conciso será descrito os sistemas e equipamentos relevantes ao estudo pretendido no mesmo.

Segundo BRESSAN (2006, p. 13) o processo para realização de uma medida de tensão de retorno compreende três etapas. Tais etapas já foram apresentadas anteriormente na seção 5.5.2.1 e aqui representadas esquematicamente pelas posições da chave S conforme Figura 31.

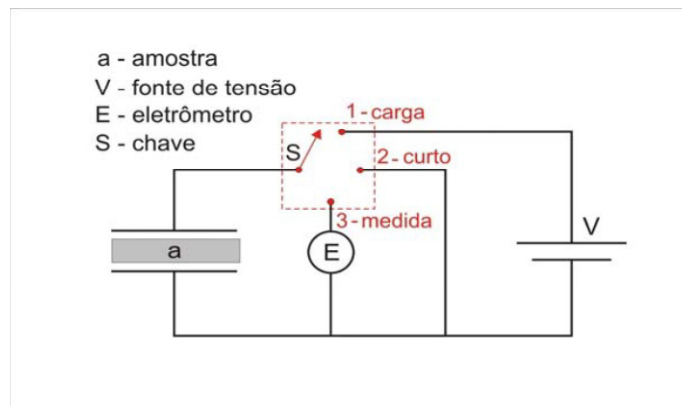


Figura 31 - Representação esquemática do circuito de testes para medida de tensão de retorno.

Fonte: BRESSAN, 2006, p. 25.

7.1.1 Sistema de Comutação das Etapas da Tensão de Retorno

Considerado como ponto crítico no desenvolvimento do trabalho de Bressan, devido à necessidade de se obter uma alta impedância de entrada foi elaborado uma chave, conforme Figura 32.

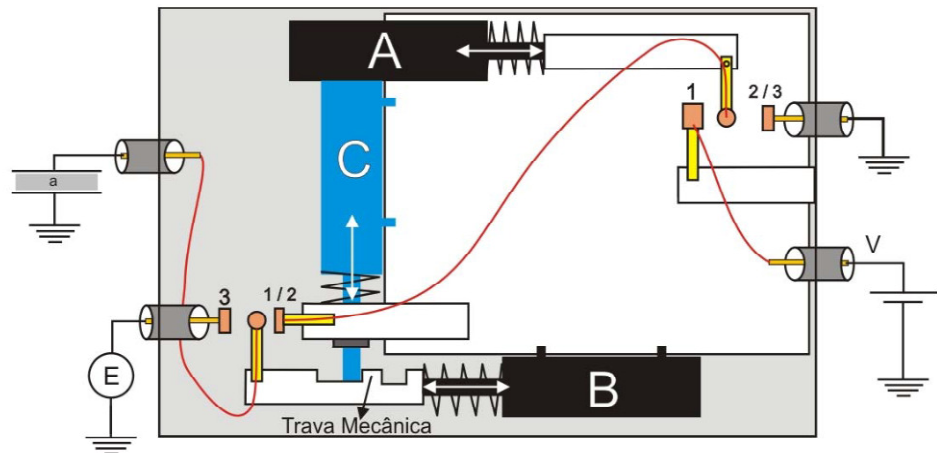


Figura 32 - Esboço da configuração interna da chave. Com os contatos na posição 1 ocorre a carga, na posição 2 ocorre o curto-circuito, e na posição 3 ocorre o processo de medida.

Fonte: BRESSAN, 2006, p. 25.

7.1.2 Computador e Programas

Foi desenvolvido um programa para controlar o circuito eletrônico descrito a seguir. O programa consiste basicamente em fornecer em intervalos de tempo (determinados na janela do programa), valores de tensão (0 ou 5 V) pela da porta paralela do computador. A tela de controle do programa é apresentada na 50. Conectado à porta paralela, o circuito eletrônico desenvolvido controla os atuadores magnéticos da chave de comutação (BRESSAN, 2006, p. 26).

7.1.3 Circuito de Controle da Chave de Comutação

Foi desenvolvido um circuito eletrônico, controlado por microcomputador para controle das etapas das medidas de tensão de retorno, conforme Figura 33.

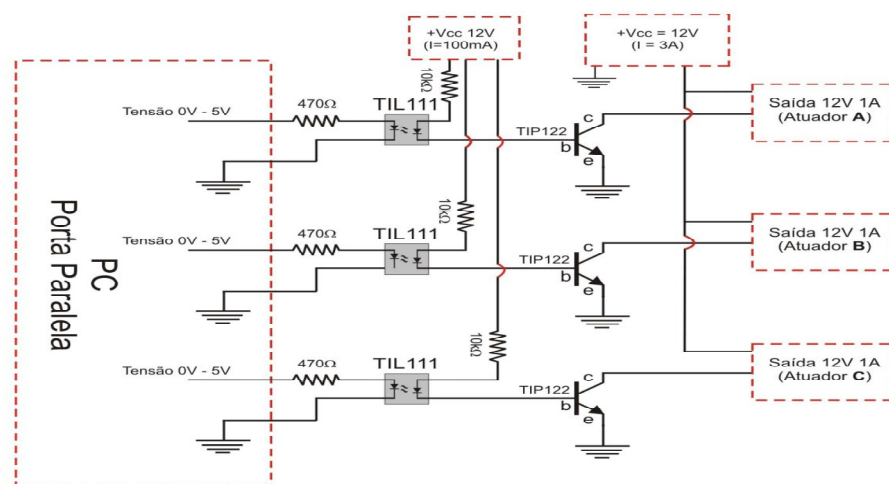


Figura 33 - Representação esquemática do circuito eletrônico para controle automatizado da chave.

Fonte: BRESSAN, 2006, p. 27.

7.1.4 Descrição e Preparo das Amostras

Para a realização das medidas de tensão de retorno foram utilizados três pares de amostras, de cabos isolados em XLPE, sendo cada par constituído de um cabo novo e um cabo envelhecido em campo (BRESSAN, 2006, p. 26). Sendo que a LACTEC forneceu de seu almoxarifado as amostras utilizadas no ensaio conforme descrições na Tabela 5.

Tabela 5 – Descrição das amostras de cabos novo e envelhecido, utilizadas nos testes de tensão de retorno.

| Descrição | Amostras | Código da Amostra |
|---|-------------------------|-------------------|
| Cabo Novo | Amostra 1 - Novo | A1.N |
| • Fabricante: GENERAL CABLE | Amostra 2 - Novo | A2.N |
| • classe de tensão: 12/20 kV | Amostra 3 - Novo | A3.N |
| • isolamento: XLPE | | |
| • data de fabricação: 2002 | | |
| Cabo Envelhecido | Amostra 1 - Envelhecido | A1.E |
| • Fabricante: SUMITOMO ELECTIC INDUSTRIES | Amostra 2 - Envelhecido | A2.E |
| • classe de tensão: 12/20 kV | Amostra 3 - Envelhecido | A3.E |
| • isolamento: XLPE | | |
| • data de fabricação: 1971 | | |

Fonte: Adaptado de BRESSAN, 2006, p. 30.

Foi necessária preparação das amostras para a realização do ensaio, pois segundo BRESSAN (2006, p. 31) o preparo das pontas das amostras é necessário para se realizar com segurança o acesso ao condutor e à blindagem, além de também conferir igualdade entre as amostras. Para a realização das medidas de tensão de retorno, as pontas dos cabos foram preparadas de acordo com a Figura 34.

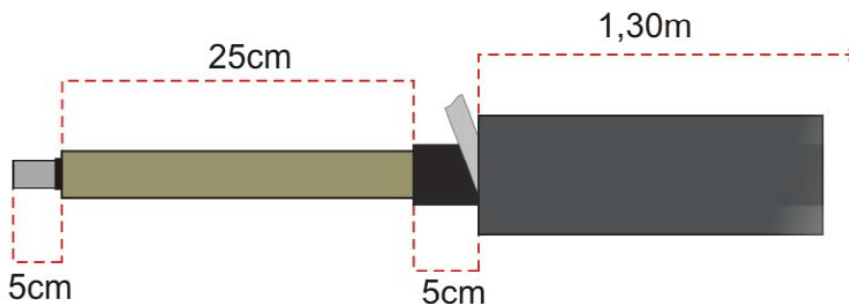


Figura 34 - Detalhamento da preparação das pontas dos cabos isolados.

Fonte: BRESSAN, 2006, p. 31.

7.1.5 Parâmetros e Procedimentos Adotados para as Medidas de Tensão de Retorno

Segundo BRESSAN (2006, p. 18) “as características dielétricas de uma isolamento dependem fortemente da história prévia do material (elétrica, térmica, mecânica e química)”. A impedância do sistema composta da impedância original do sistema e das impedâncias parasitas, durante as medidas de tensão de retorno fica em paralelo com a impedância total da amostra reduzindo a impedância do conjunto a um valor inferior à menor das resistências envolvidas. Gerando uma grande dificuldade em se mensurar a tensão de retorno, uma vez que a alta impedância necessária para mensurar a tensão de retorno contribui para um acúmulo de cargas por meio de indução.

Para minimizar essa dificuldade BRESSAN (2006, p. 31), dada a sensibilidade do processo de medida de tensão de retorno, em todos os testes foram realizados alguns procedimentos com a intenção de controlar o maior número possível das variáveis envolvidas durante o processo de medida.

Sendo essas variáveis “Temperatura Adotadas”, “Tensão Aplicada (U_0)”, “Tempo de Carga (t_c) _ Polarização”, “Tempo de Descarga (t_d)”, “Tempo de Aterramento_ Despolarização”, “Aquecimento da Chave de Comutação”, “Aquecimento das Amostras de Cabo” e “Umidade Relativa”. Através de todos os aparatos, comerciais e desenvolvidos, e nas variáveis a serem controladas, foi possível materializar o processo experimental objetivado (Figura 35).

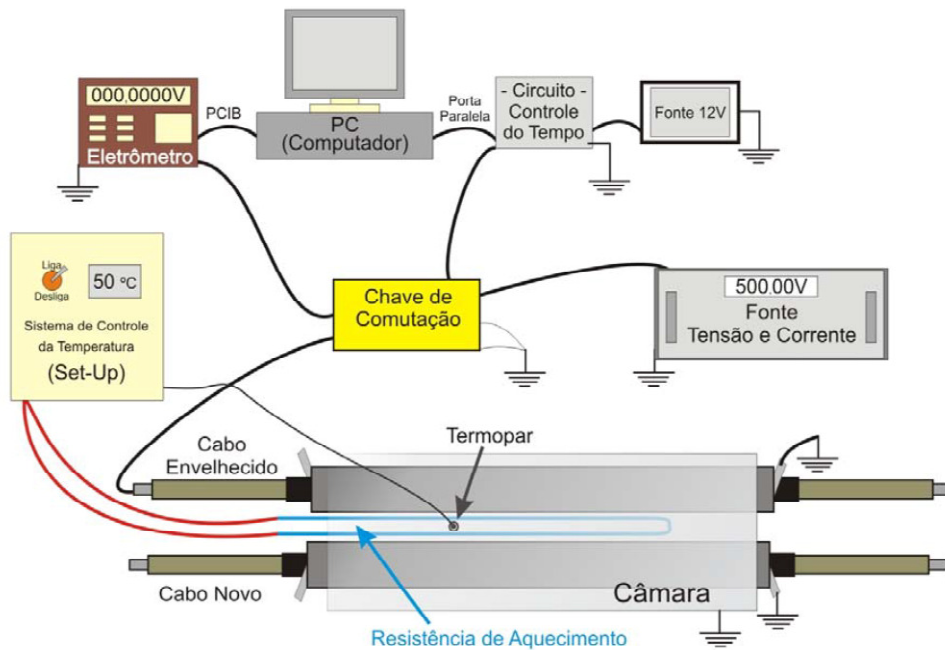


Figura 35 - Representação esquemática do sistema utilizado para realização das medidas de tensão de retorno.

Fonte: BRESSAN, 2006, p. 22.

7.1.6 Resultados e Conclusões do Experimento

Para se conseguir algum resultado significativo (Figura 36) foi necessária a realização de diversos ensaios na busca pelo tempo de carregamento ideal, a dedução matemática da impedância do sistema de medida. Além da verificação da indução do sistema que segundo BRESSAN (2006, p. 37) para avaliar se o sistema sofre, ou gera induções eletromagnéticas durante a realização das medidas, foram utilizados cabos submetidos a um longo período de aterramento, ao menos 24 h, de forma que se possa considerar que estes

cabos se encontram totalmente despolarizados. Aonde após a utilização do método “zero-test” foi possível concluir que:

A princípio, parece que podemos considerar que as induções medidas pelo sistema são muito pequenas, e não devem interferir significativamente nas medidas de tensão de retorno (BRESSAN, 2006, p. 26).

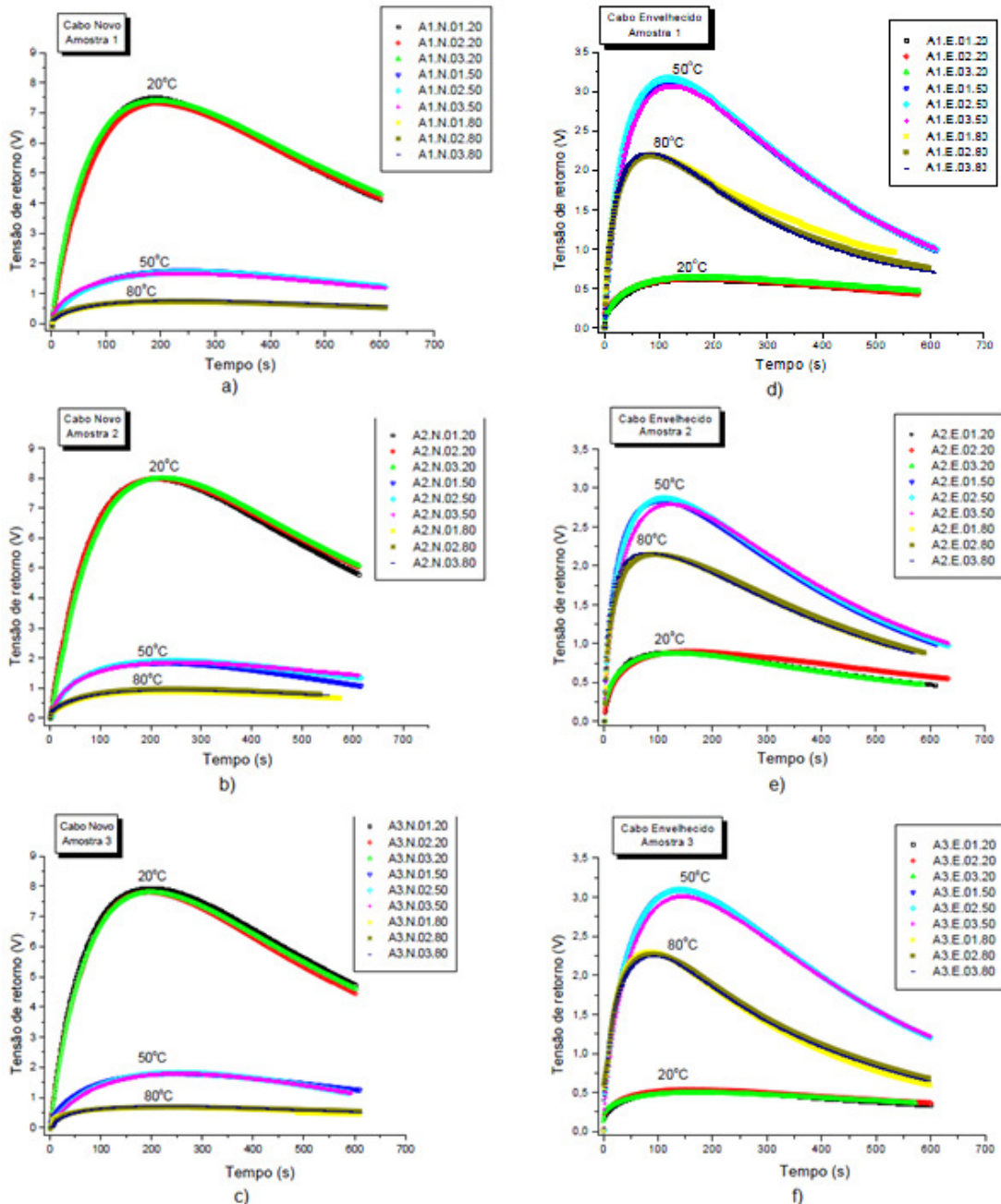


Figura 36- Gráficos das curvas de tensão de retorno obtidas em função da temperatura. Amostras novas 1, 2 e 3; a), b) e c) respectivamente, amostras envelhecidas 1, 2 e 3; d), e) e f) respectivamente.

Fonte: Adaptado de BRESSAN, 2006, p. 41.

Ao ser analisado esse experimento é notório a dificuldade que se teve em medir a tensão de retorno, onde houve a necessidade da criação de software e equipamentos específicos, sendo alguns de grande complexidade além de equipamentos de alto valor comercial.

Apesar desses obstáculos, para BRESSAN (2006, p. 48) o sistema de medida desenvolvido preenche as principais características necessárias de um sistema de medida de tensão de retorno, os quais são: elevada impedância de entrada e baixa susceptibilidade às interferências eletromagnéticas.

7.2 Ensaio Prático Realizado por Muhammad I. B. Sujani

SUJANI (2010, p. 20) apresenta um experimento específico para avaliar os danos causados por arborescências na isolação de cabos XLPE, quando os mesmos se encontram em meio aquático energizados com alta tensão contínua (HVDC – *high voltage direct current*).

Para analisar os efeitos da arborescência em campo, com cabos ensaiados na prática, Sujani utilizou-se de vários tipos de monitoramento do ambiente e do cabo, como controle da tensão aplicada, resistência de isolação do cabo, nível de degradação dos cabos, danificações na isolação, entre outros. A grandeza monitorada mais relevante aqui é a tensão de retorno, que foi medida constantemente em vários tipos de cabo durante os experimentos citados.

Os procedimentos para a metodologia de medições para este estudo são focados na medição de parâmetros elétricos como resistência de isolação, fator de potência, capacitância e tensão de retorno nos cabos XLPE testados, sobre influência de arborescência da água sob alta tensão. (SUJANI, 2010 , p 14).

7.2.1 Descrição Experimento

Basicamente, o experimento proposto e realizado por Sujani se constitui da preparação dos terminais de amostras conhecidas de cabo XLPE e imersão das amostras em um tanque de água. Então, são feitas aplicações de valores de tensão conhecidos, para então monitorar os fenômenos que acontecem com os cabos.

Foram usados cabos em vários estados de conservação: desde cabos novos a cabos seriamente danificados. Desse modo, pôde-se analisar a influência da idade do cabo nos danos sofridos durante os experimentos (SUJANI, 2010, p. 15).

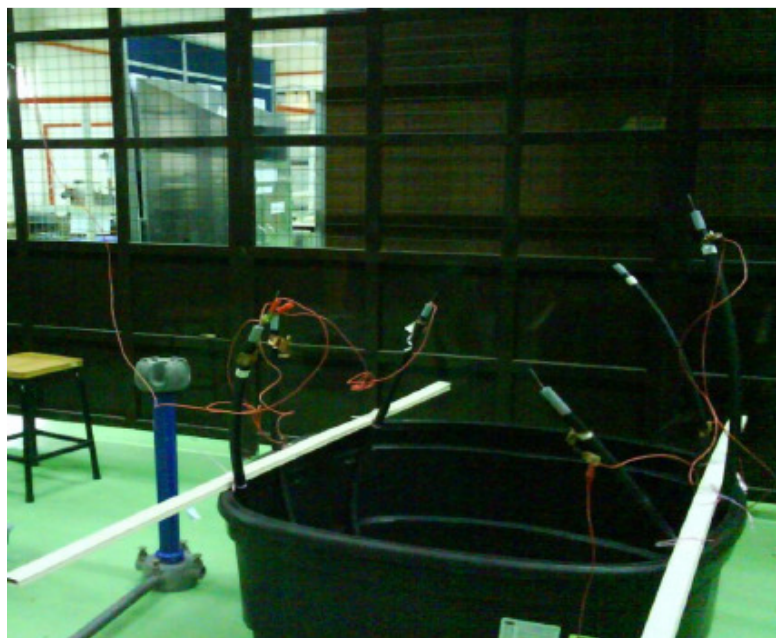


Figura 37 – Tensão de retorno medida, para diferentes tempos de imersão das amostras.

Fonte: SUJANI, 2010, p. 16.

Os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios práticos descritos foram os seguintes:

- Amostras de cabo com isolamento XLPE, com vários estados de degradação por idade (novo, levemente danificado e seriamente danificado);
- Medidor de resistência de isolamento (megômetro Kyoritsu);
- Medidor de tensão de retorno (Tettex 5461);
- Ponte medidora para capacitâncias (Tettex 2816);
- Fonte de tensão HVDC;
- Tanque com água para imersão;
- Cabos e conectores diversos.

O experimento foi executado conforme uma série de procedimentos, de modo a garantir o sucesso nas medições, no monitoramento do sistema e na possibilidade de análise de danos existentes no cabo após a aplicação de tensão.

Os procedimentos relevantes adotados foram:

- Preparação das amostras de cabo, com decapagem e exposição direta do condutor e da blindagem em ambas as extremidades;
- Fixação de conectores nas extremidades da amostra;
- Preparação e simulação dos vários estágios de degradação: cada estágio foi simulado através de furos feitos com pregos na isolação ao longo do cabo;
- Enchimento do tanque com água;
- Imersão do cabo e espera por vários dias, para observação do efeito de arborescência em água;

7.2.2 Procedimentos para Medição

Os cabos foram deixados em imersão por 20 e 40 horas para se avaliar a influência do envelhecimento do cabo na arborescência. Percebe-se, também, uma alteração na tensão de retorno existente, conforme o tempo de imersão do cabo em água. As amostras são todas ligadas em paralelo, de modo que uma tensão única de 2 kV seja aplicada sobre todas ao mesmo tempo. A tensão é aplicada durante 2 a 3 horas por dia, e as medições de tensão de retorno são feitas após o tempo total de envelhecimento dos cabos (20 e 40 horas).

Através das fotos e dados disponíveis em SUJANI (2010 p. 15), percebe-se que as amostras de cabos são relativamente curtas, com comprimento médio aproximado de três metros.



Figura 38 –Amostra de cabo preparada para medições, após o ensaio.

Fonte: SUJANI, 2010, p. 48.

7.2.3 Medição da Tensão de Retorno

Todas as medições de tensão de retorno foram efetuadas através de medidor próprio, modelo Tettex 5461. Por se tratar de equipamento específico, trata-se de aparelho dificilmente encontrado disponível para utilização.



Figura 39 –Amostra de cabo preparada para medições, após o ensaio.

Fonte: SUJANI, 2010, p. 49.

Através do equipamento citado, foi possível estabelecer medições da tensão de retorno em função do tempo de ensaio, bem como mensurar o carregamento e descarregamento dos cabos. Os valores de tensão e tempo são mostrados diretamente em displays apropriados, facilitando a obtenção de dados para construção de gráficos e tabelas (SUJANI, 2010, p. 19).

O medidor de tensão de retorno teve os terminais conectados diretamente ao condutor e à blindagem das amostras, e o comportamento da tensão de retorno após o tempo total de imersão é mostrado na Figura 40:

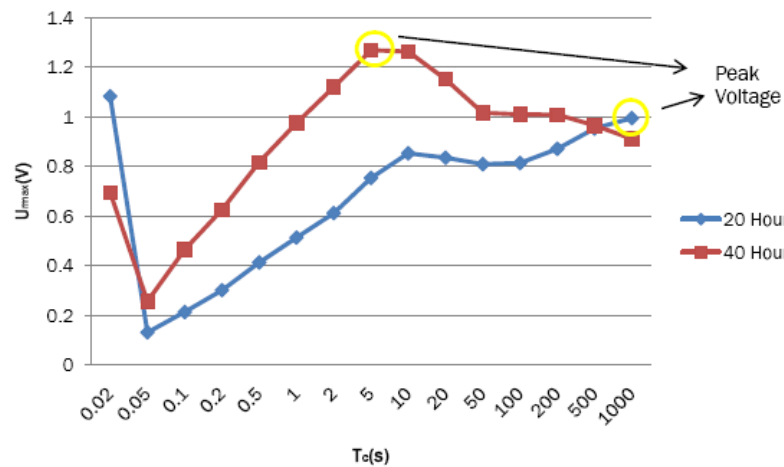


Figura 40 – Tensão de retorno medida, para diferentes tempos de imersão das amostras.

Fonte: SUJANI, 2010, p. 29.

7.2.4 Conclusões do Experimento

Através dos dados obtidos por Sujani, percebe-se que é possível, sim, medir com certa precisão a tensão de retorno em cabos de média tensão. Porém, há a dificuldade de aquisição de equipamento próprio para tal abordagem. Percebe-se também que a tensão de retorno é influenciável por vários parâmetros externos, como danos do cabo, envelhecimento, entre outros, confirmando o estabelecido em 5.5.

7.3 Ensaio Prático Realizado por Fernando Piazza

Segundo PIAZZA (2001, p. 1) a confiabilidade dos equipamentos depende da integridade dos seus sistemas isolantes. Em seu trabalho Piazza tem como objetivo avaliar o estado de envelhecimento da isolação de transformadores isolados em papel e óleo e cabos isolados em XLPE utilizando a técnica de tensão de retorno fazendo uso de faixa de tensão carga de 200 a 2000 Vcc.

A principal característica da resposta dielétrica é o efeito memória, pelo qual o comportamento no tempo presente depende da história do dielétrico (PIAZZA, 2001, p. 16). De acordo com o que já foi explicado nesse trabalho e para PIAZZA (2001, p. 16) nos materiais dielétricos reais, a componente lenta da resposta implica em um grande tempo de relaxação. Desta maneira no tempo atual, o valor da polarização depende de excitações por campos elétricos em tempo passado.

7.3.1 Parâmetros e Procedimentos Adotados para as Medidas

Para a realização do ensaio foram retiradas amostras de cabos da linha subterrânea de distribuição de energia elétrica que apresentaram falha. O objetivo do trabalho de Piazza quanto do ensaio com os cabos era de comparar a utilização da técnica de tensão de retorno e de técnicas convencionais para avaliar o estado de envelhecimento das amostras.

Os ensaios realizados por Piazza foram:

- Corrente de Fuga x Rampa de Tensão em CC;
- Corrente de Fuga x Tempo em CC;
- Capacitância e Fator de Perdas, em Alta Tensão a 60 Hz;
- Tensão de Retorno.

As amostras utilizadas foram de acordo com PIAZZA (2001, p. 67) condutores de alumínio, classe de tensão 15 kV, camada semicondutora em EVA, isolamento em XLPE, fitas de cobre como blindagem e revestimento em PVC conforme Figura 41.

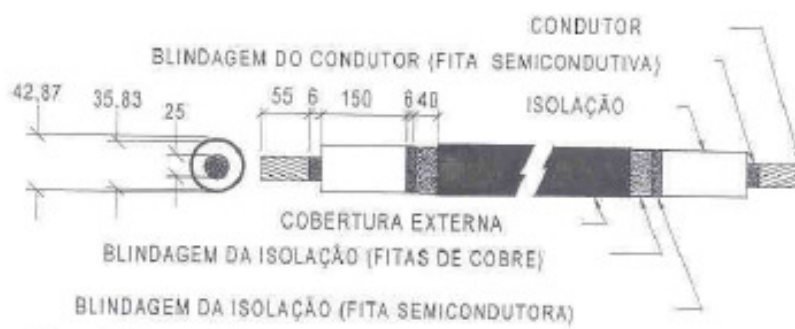


Figura 41 - Preparação das terminações dos cabos, dimensões em milímetros.

Fonte: PIAZZA, 2001, p. 67.

7.3.2 Experimentos

7.3.2.1 Corrente de fuga x tensão CC e Corrente de fuga x tempo

O ensaio de corrente de fuga é realizado usando o método de ensaios de tensão aplicada. Para sua realização é necessário o cabo a ser medido e o equipamento Hipot conforme

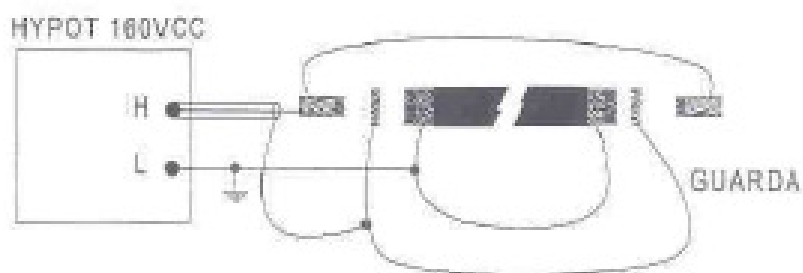


Figura 42 - Esquema para determinação da corrente de fuga x tensão e corrente de fuga x tempo

Fonte: PIAZZA, 2001, p. 68.

7.3.2.2 Capacitância e fator de dissipação

Para a realização do ensaio foram utilizados uma ponte de medição de capacitância e fator de dissipação e um transformador de ensaio. Esse ensaio (Figura 43) foi regido pela NBR-7295 na intenção de capturar a capacitância e fator de dissipação em cada degrau de tensão.

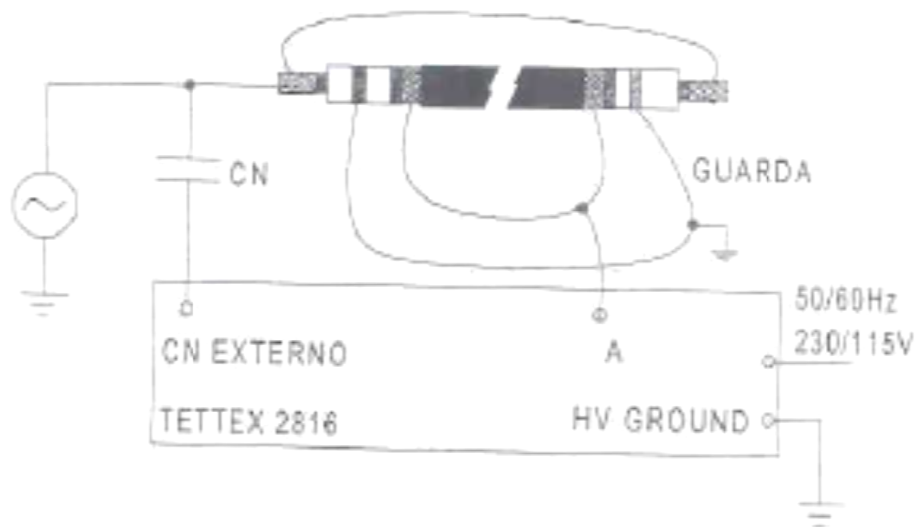


Figura 43 - Esquema para determinação da capacitância e fator de dissipação.

Fonte: PIAZZA, 2001, p. 69.

7.3.2.3 Tensão de Retorno

Foram realizadas medições de tensão de retorno utilizando medidor de tensão de retorno marca TETTEX, modelo 5461... Foram realizadas medições com tempo de carga de 1000 segundos e tempo de descarga de 2 segundos. A temperatura ambiente foi mantida em torno de 20 °C e a umidade relativa 70%. Foram realizadas medições com 1000 Vcc e com 2000 Vcc e foram registrados valores de tensão de retorno máximos e o tempo para atingirem-se estes valores máximos. (PIAZZA, 2011, p. 69).

Pode-se visualizar a maneira de montagem na Figura 44

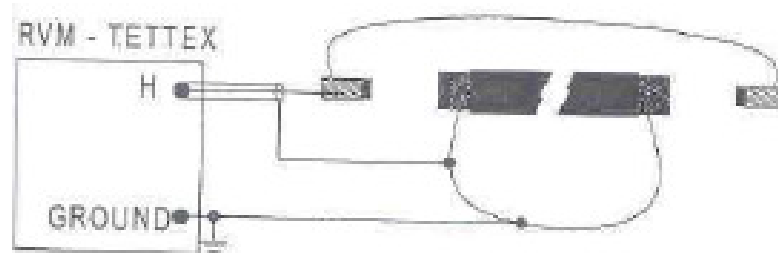


Figura 44 - Esquema para determinação da tensão de retorno com RVM Tettex.

Fonte: PIAZZA, 2001, p. 69.

7.3.3 Resultados e Conclusões do Experimento

Através do conjunto de ensaio realizado é possível observar que PIAZZA (2001, p. 82) concluiu que, no caso de cabos extrudados e XLPE, o uso da técnica de tensão de retorno permite uma análise do tamanho das arborescências presentes na isolação e que o uso e implementação da técnica de tensão nas concessionárias de energia elétrica dependem de normalização de procedimento de ensaio e análise, sendo que na época a implementação e a aceitação encontravam-se em pesquisa e desenvolvimento. O comportamento da corrente de fuga x tensão pode ser visto na Figura 45 aonde se supõe que o comportamento apresentado é devido à presença de umidade ou de mecanismos de envelhecimento

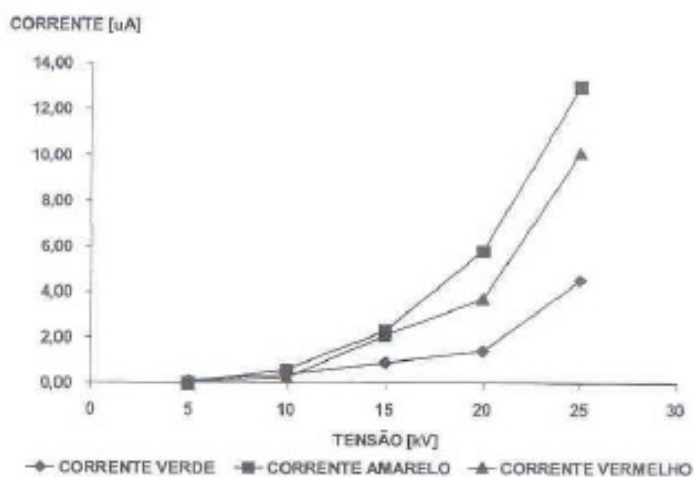


Figura 45 - Gráfico de Corrente de fuga x Tensão

Fonte: PIAZZA, 2001, p. 75.

A seguir será apresentado o comportamento corrente de fuga x tempo aonde é possível observar um decaimento inicial de todas as curvas, o qual supostamente pode ser atribuído ao processo de absorção dielétrica conforme Figura 46.

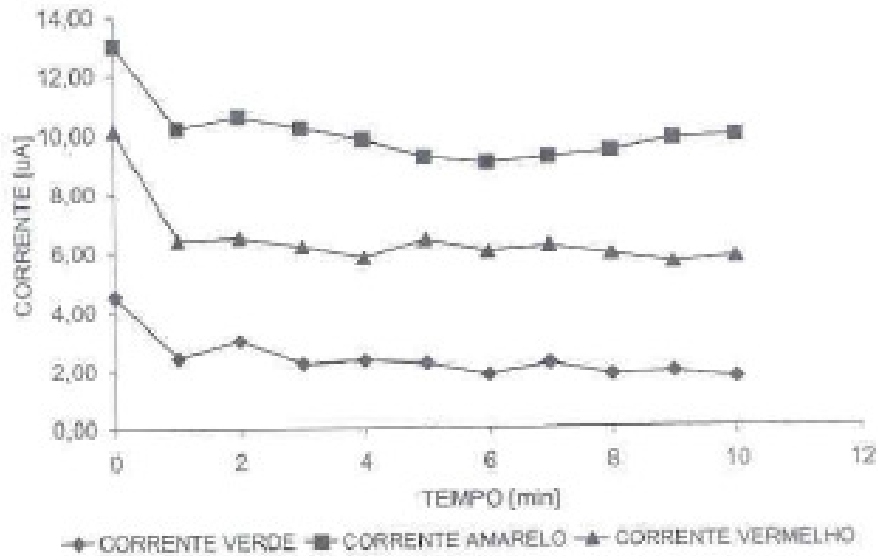


Figura 46 - Corrente de fuga x Tempo

Fonte: PIAZZA, 2011, p. 76.

Para o ensaio de tensão de retorno os resultados apresentados são referentes á medição de tensão de retorno com ciclo de carga de 1000 s e ciclo de descarga de 2 s para as tensões de carga de 1000 e 2000 V CC (Figura 47). Foi possível mensurar o tempo para atingir a tensão de retorno máxima

Tabela 6 - Tempo para o valor máximo de tensão de retorno

| Tensão de Carga Vcc | I _{max} Fase Amarela [s] | I _{max} Fase Vermelha [s] | I _{max} Fase Verde [s] |
|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 1000 | 99,00 | 67,20 | 45,30 |
| 2000 | 215,00 | 132,00 | 76,60 |

Fonte: Adaptado de PIAZZA, 2001, p. 79.

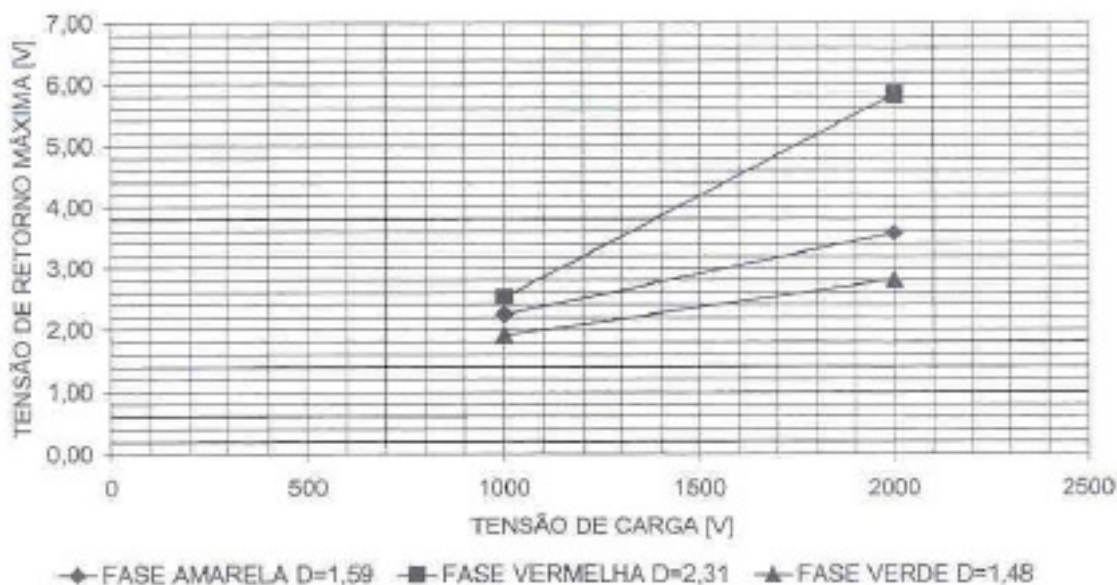


Figura 47 – Tensão máxima de retorno para tensões de carga de 1000 V CC e 2000 V CC.

Fonte: PIAZZA, 2011, p. 76.

Segundo Piazza (2001, p. 79) “o resultado do ensaio de tensão de retorno corrobora os resultados dos ensaios de corrente de fuga e fator de dissipação e, além disso, fornece mais informações concernentes ao estado da isolação, principalmente quanto ao crescimento de arborescência (*water trees*)”.

7.4 Conclusões Sobre Estudos de Ensaio

Foi possível observar que no ensaio realizado por Bressan foi necessário o desenvolvimento de sistema de alta complexidade para ser possível mensurar a tensão de retorno. O contrário pode ser visto nos demais ensaios que se utilizara de equipamentos comerciais específicos para medição de tensão de retorno, facilitando e dando maior confiabilidade em suas aquisições de dados. Todos os ensaios anteriormente mostrados não tiveram como objetivo a elaboração de uma proporcionalidade tensão de retorno x comprimento do cabo.

Porém podemos observar a influência da temperatura e do envelhecimento do cabo, no ensaio realizado por Bressan, já no ensaio realizado por Sujani é perceptível a influência da imersão do cabo condutor na água. Finalmente no ensaio realizado por Piazza há como

verificar que a tensão de carga influi diretamente na tensão de retorno remetendo que há a possibilidade de nos ensaios de tensão aplicada a tensão de retorno pode ser elevado a um nível significativo.

Essas conclusões deixam margem para se analisar que após o ensaio de tensão aplicada, a tensão de retorno pode ser alta uma vez que o seu tempo de carregamento é alto e sua tensão de carregamento chega a níveis muito maiores do que os utilizados nos ensaios anteriores. Toda via não é possível concluirmos que realmente haverá um nível perigoso de tensão de retorno uma vez que não se sabe sobre possíveis saturações dos materiais.

8 METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA OS ENSAIOS

8.1 Definição da Topologia

Através dos dados teóricos apresentados nos capítulos 2 e 6 percebe-se que os resultados obtidos de eventuais testes e ensaios são diretamente influenciados pela topologia de estudo utilizada. Desse modo, fatores como o número de cabos utilizado e o tipo de instalação podem alterar a tensão residual encontrada, e também o efeito de polarização de dielétrico estudado.

Sendo assim, faz-se necessário optar por apenas uma topologia básica a ser estudada, de modo que os dados pertinentes sejam facilmente evidenciados. Tendo obtido todas as informações desejadas em uma única disposição de cabos, o trabalho de transportá-las para topologias diferentes ou específicas fica facilitado.

A topologia a ser utilizada nos ensaios é a mais simples possível, ou seja: os testes serão feitos com apenas um cabo blindado de média tensão, de cada vez, totalmente isolado eletricamente, com contato estabelecido apenas nos terminais do equipamento Hipot.

O tipo de instalação a ser utilizado depende muito da aplicação específica dos cabos. Sabe-se que os testes de Hipot são realizados com a finalidade de assegurar uma boa isolamento no cabo quando instalado em obra. Portanto, o tipo de instalação dependerá apenas do projeto da obra na qual ele será aplicado. Para os testes realizados, o cabo ou estará suspenso e totalmente isolado, reduzindo, portanto, interferências externas ou estará armazenado em forma de bobina como padrão de armazenagem pra transporte.

8.2 Cálculo das Características Elétricas do Sistema

Antes de se efetuar o desenvolvimento de ensaios práticos com o equipamento Hipot, é preciso calcular as características elétricas do sistema adotado para testes, originando assim uma base teórica a ser comparada com os resultados obtidos em campo. Inicialmente, pretende-se calcular apenas as grandezas relevantes para o processo de surgimento de tensão

residual no cabo, quais sejam: o campo elétrico \vec{E} atuante no cabo, a capacitância total do cabo utilizado, o circuito equivalente específico para o procedimento de ensaio de tensão aplicada, e a curva de descarregamento do capacitor criado entre o condutor e a blindagem.

Além de estabelecer toda a base teórica envolvida, o grande propósito do cálculo de tais grandezas é dar margem a futuras simulações do sistema elétrico utilizado e do cabo por *software*, de modo a prever o comportamento das tensões de retorno, o descarregamento do capacitor surgido entre o condutor e a blindagem do cabo, bem como o tempo de descarga de todo o sistema propriamente dito, após o aterramento adequado de todos os componentes envolvidos.

8.2.1 Definição de grandezas

Inicialmente, será feita a definição de algumas grandezas utilizadas para os cálculos do sistema. Para um perfeito entendimento dos cálculos teóricos necessários, é preciso apresentar todos os fatores envolvidos, bem como a simbologia a ser utilizada.

As grandezas envolvidas nos cálculos seguintes, bem como suas unidades no Sistema Internacional (SI), são as seguintes:

Tabela 7 - Grandezas físicas e suas unidades.

| Grandeza | Simbologia | Unidade (SI) |
|-------------------------|------------|-------------------|
| Tensão Elétrica | V | V |
| Campo Elétrico | \vec{E} | V/m |
| Indução Elétrica | \vec{D} | Wb/m ² |
| Permissividade Elétrica | ϵ | F/m |
| Comprimento do Cabo | H | m |
| Carga Elétrica | Q | C |

Fonte: Adaptado de Wolski, 2005.

8.2.2 Cálculo do Campo Elétrico

Considere-se um cabo teórico, composto apenas de condutor e isolamento. Faz-se passar determinada corrente elétrica através do condutor. Analisando todas as medidas e grandezas nele presentes, tem-se o desenho:

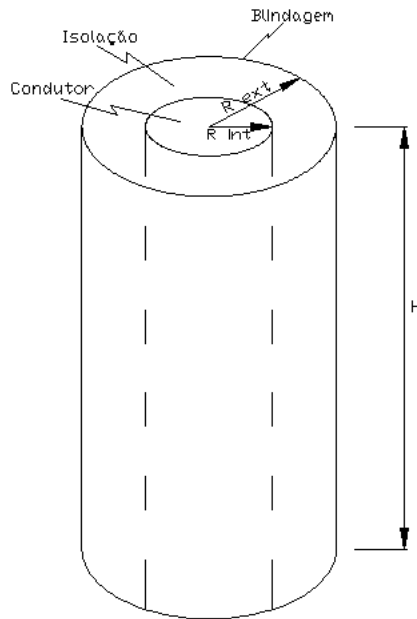


Figura 48 – Esquemático do cabo de Média Tensão.

Fonte: Os autores, 2011.

Considerando-se um ponto qualquer no centro da secção transversal do cabo como o ponto de origem em um sistema de coordenadas cilíndricas, sabe-se que, nesse sistema, o campo elétrico atuante é simétrico em relação ao eixo vertical. Desse modo, pode-se utilizar o Teorema de Gauss: “O fluxo elétrico total que atravessa qualquer superfície fechada é igual à carga total envolvida por esta superfície” (HAYT JR., 2003, p. 48).

Matematicamente, tem-se:

$$\oiint_{S(V)} \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (9)$$

Considerando que o efeito de espraiamento do campo elétrico pode ser desprezado, e analisando apenas o campo elétrico inserido no sistema de coordenadas mencionado, tem-se:

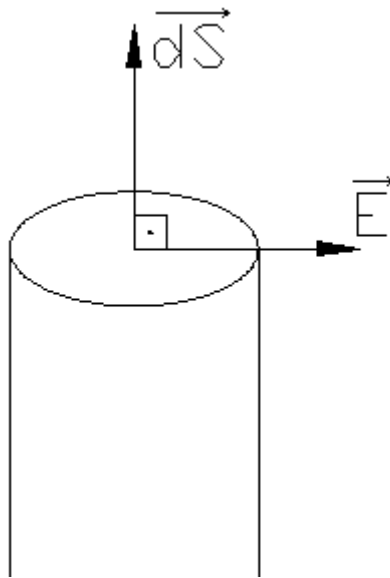


Figura 49 – Campo elétrico e vetor direcional na extremidade do cabo.

Fonte: Os autores, 2011.

Sabe-se que no topo e na base do cabo (extremidades), o produto escalar $\vec{E} \cdot d\vec{S}$ é nulo ($\vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$), pois o campo elétrico atravessa apenas a superfície lateral do condutor (que pode ser considerado um objeto perfeitamente cilíndrico). Considerando S_l a área lateral de tal cilindro, conclui-se que:

$$\iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iint_{S_l} \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (10)$$

Comparando o cálculo do módulo do vetor densidade de fluxo elétrico (\vec{D}) com a fórmula tradicional de cálculo do módulo do vetor campo elétrico (\vec{E}), tem-se a relação de proporcionalidade entre as duas grandezas que, segundo Hayt Jr., é:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (11)$$

Onde ϵ é a permissividade elétrica do meio considerado. Através da igualdade apresentada na equação (11) e comparando com a equação (9), tem-se:

$$\iint_{S_i} \epsilon \cdot \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q \quad (12)$$

Na superfície lateral do condutor, é sabido que os vetores campo elétrico (\vec{E}) e diferencial de espaço ($d\vec{S}$) são colineares, e de mesmo sentido. Portanto, através da teoria de Álgebra de Vetores, tem-se a igualdade:

$$\vec{E} \cdot d\vec{S} = E \cdot dS \quad (13)$$

Para um raio constante ao longo do cilindro (condutor), o campo elétrico possui valor também constante. Portanto, pode-se escrever:

$$\epsilon \cdot E \iint_{S_l} dS = Q \quad (14)$$

Desenvolvendo a integral de superfície no cilindro do condutor (matematicamente igual ao volume do cilindro), tem-se:

$$\iint_{S_l} dS = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H \quad (15)$$

Finalmente, isolando o módulo do campo elétrico na equação (14) e substituindo na (15), deduz-se a fórmula para cálculo do campo elétrico atuante no condutor, qual seja:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon r H} \quad (16)$$

8.2.3 Cálculo da Tensão Elétrica no Cabo

A tensão elétrica (ou diferença de potencial) é definida como “um trabalho realizado por uma fonte externa, ao mover uma carga unitária positiva de um ponto a outro em um campo elétrico” (Hayt, 2003, p. 76).

Resumidamente, tem-se a equação matemática:

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (17)$$

Aplicando a equação (17) para o caso específico do cabo, tem-se que $d\vec{l} = d\vec{r}$, e que o vetor campo elétrico (\vec{E}) é colinear com $d\vec{r}$, portanto, $\vec{E} \cdot d\vec{r} = E \cdot dr$. Substituindo as equivalências em (16) e (17), tem-se:

$$V = \int_{r_{\text{int}}}^{r_{\text{ext}}} \frac{Q}{2\pi\epsilon r H} \cdot dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon H} \int_{r_{\text{int}}}^{r_{\text{ext}}} \frac{dr}{r} \quad (18)$$

Portanto, resolvendo a integral, tem-se a fórmula simplificada para cálculo da tensão elétrica:

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon H} \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{ext}}}{r_{\text{int}}}\right) \quad (19)$$

8.2.4 Cálculo da Capacitância do Cabo

Sabe-se que a capacitância pode ser calculada através da razão entre o módulo da carga total envolvida e a diferença de potencial entre os terminais do capacitor (Hayt, 2003, p. 123). Assimilando juntamente a equação (19), tem-se:

$$C = Q/V = \frac{Q}{\frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi\epsilon H}} \quad (20)$$

Simplificando, tem-se a fórmula para cálculo da capacitância do cabo, qual seja:

$$C = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)} \quad (21)$$

Dessa forma, percebe-se que o valor da capacitância do cabo depende da permissividade elétrica da isolação, do comprimento do cabo, e dos raios externo e interno (ou seja, da secção nominal do condutor e da isolação).

Segundo DIELEC (2011), a capacitância pode ser medida através de um excitador de ressonância, utilizado para testar o isolamento em cabos de média tensão. Os valores de capacitância fornecidos são:

Tabela 8 – Capacitância de cabo isolado de Média Tensão, em $\mu\text{F}/\text{km}$.

| Secção Nominal (mm^2) | Capacitância ($\mu\text{F}/\text{km}$) |
|----------------------------------|--|
| 25 | 0,19 |
| 50 | 0,24 |
| 95 | 0,30 |
| 120 | 0,32 |
| 150 | 0,35 |

Fonte: Adaptado de DIELEC, 2011, p.13.

Em forma de gráfico, tem-se:

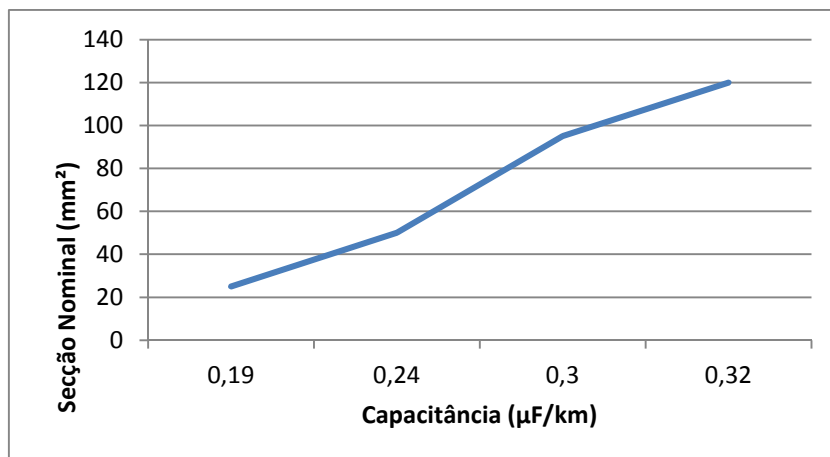


Figura 50 – Gráfico da capacitância do cabo, em função da secção nominal..

Fonte: DIELEC, 2011, p. 13.

Percebe-se que, à medida que a secção nominal do cabo aumenta, a razão r_{ext}/r_{int} vai diminuindo, fazendo com que a capacitância seja diretamente proporcional à primeira grandeza, confirmando o estabelecido na equação (21).

8.2.5 Estabelecimento do Circuito Equivalente

Uma vez estabelecidos os métodos e fórmulas para cálculo direto das grandezas do cabo de média tensão, é possível instituir o circuito equivalente do cabo, considerando todos os efeitos físicos relevantes para o ensaio de Tensão Aplicada e o surgimento de tensão residual.

O circuito equivalente do cabo é uma capacitância C (formada pelo condutor e a isolamento do cabo), em série com uma resistência R , ou seja, a resistência transversal do cabo (fisicamente, a resistência elétrica do material isolante).

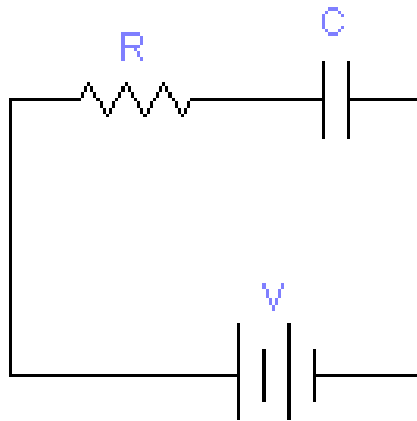


Figura 51 – Circuito equivalente do cabo, para o ensaio de Tensão Aplicada.

Fonte: Os autores, 2011.

Pode-se medir R experimentalmente, através da tensão aplicada no ensaio e a corrente de fuga que surge entre o condutor e a blindagem do cabo. Portanto:

$$R = \frac{\text{Tensão Aplicada}}{\text{Corrente de Fuga}} \quad (22)$$

A tensão de retorno surgida no cabo é basicamente causada pela descarga do capacitor C do circuito, após sua carga com a tensão V (tensão aplicada pelo equipamento Hipot durante o ensaio de Tensão Aplicada).

Sabe-se que, após a realização do ensaio, a tensão no cabo (e, portanto, no capacitor C) diminui gradativamente, conforme a descarga do capacitor. Assim, pode-se apresentar a expressão do decaimento da tensão em relação ao tempo, para o circuito da Figura 51:

$$V = V_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (23)$$

Onde τ é a constante de tempo do circuito, dada por $\tau = R \cdot C$. Desse modo, percebe-se que os valores da resistência (R) e capacitância (C) influenciam diretamente a equação (23) e, portanto, alteram o tempo de descarga do capacitor.

Através da equação (23), pode-se obter a forma da onda de tensão no capacitor (V_c), conforme o tempo passa. No gráfico, os valores de tempo estão em função da constante τ .

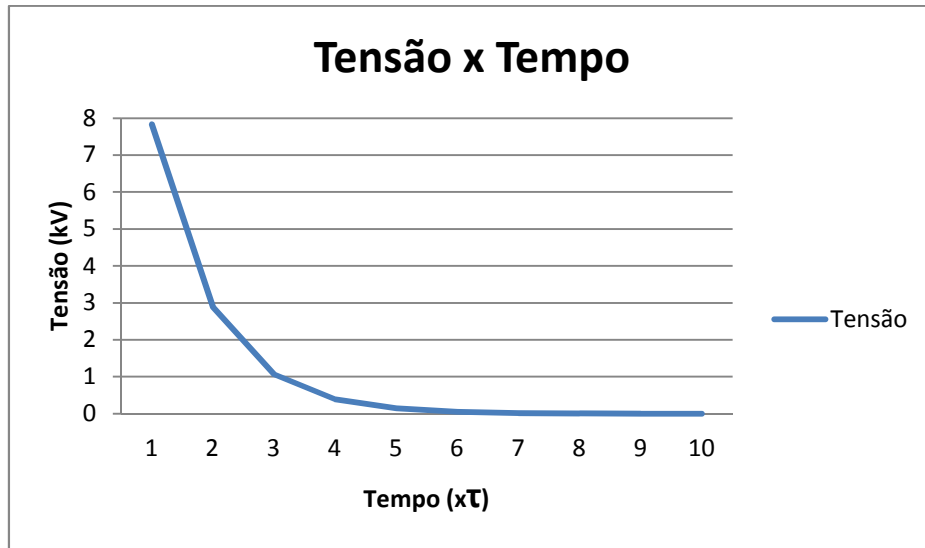


Figura 52 – Curva de decaimento da tensão no capacitor C.

Fonte: Os autores, 2011.

9 ENSAIOS REALIZADOS

9.1 Ensaio 01

O primeiro ensaio foi realizado com o intuito de conhecer o equipamento utilizado nas obras industriais para a realização do ensaio de tensão aplicada e a maneira de sua utilização em campo.

O equipamento utilizado foi o Hipot da marca Instrum, modelo HY 60 kV – 5mA CC (Figura 53 e Figura 54) devidamente calibrado e juntamente com o equipamento a certificação de calibração (Figura 55) .



Figura 53 – Equipamento Hipot instalado em bancada de serviço, antes da realização dos ensaios.

Fonte: Os autores, 2011.



Figura 54 – Vista do painel de controle do equipamento Hipot, com as respectivas conexões realizadas.

Fonte: Os autores, 2011.

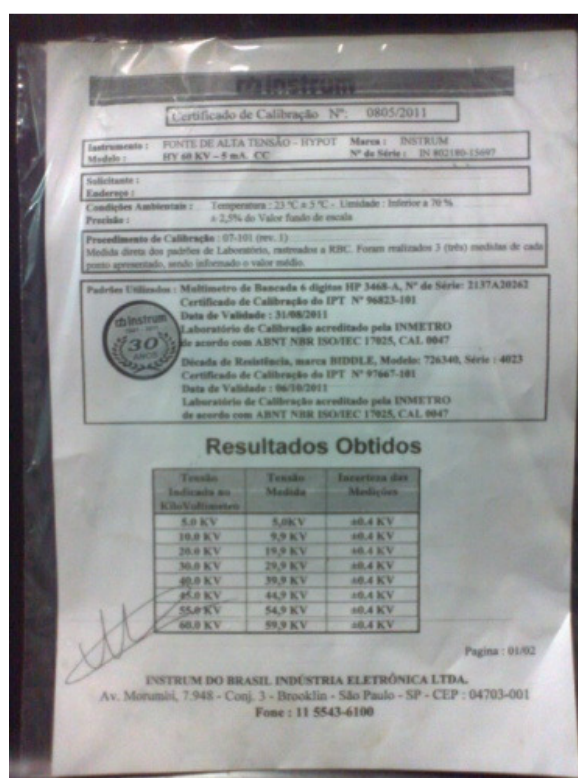


Figura 55 – Certificado de calibração do equipamento Hipot, incluso no mesmo e garantindo a validade dos dados obtidos.

Fonte: Os autores, 2011.

Foi ensaiado um cabo blindado de média tensão 12/20 kV de 50 mm² com aproximadamente 2 m de comprimento. Uma extremidade do cabo ficou isolada e a outra foi

preparada para receber os terminais do equipamento, conforme se vê nas figuras Figura 56 - Extremidade do cabo isolada, Figura 57 e Figura 58 respectivamente.



Figura 56 - Extremidade do cabo isolada

Fonte: Os autores, 2011.



Figura 57 - Extremidade preparada para receber os terminais do equipamento de teste.

Fonte: Os autores, 2011.

Após a preparação dos cabos, o teste foi iniciado. O nível máximo de tensão aplicada, de acordo com a NBR 7286 (ASSOCIAÇÃO..., 2000, p. 16) é 80% de 72 kV para cabos novos com isolamento 12/20 kV durante 15 minutos consecutivos. Devido a isso, chegou-se à tensão máxima de 57,6 kV.



Figura 58 – Terminais ligados ao cabo.

Fonte: Os autores, 2011.

O ensaio realizado resultou nos dados apresentados na Tabela 9:

Tabela 9 – Corrente de fuga do ensaio 01.

| Tempo (min.) | Tensão (%) | Tensão (kV) | Corrente de fuga (μ A) |
|-----------------|---------------|----------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 20% | 14,40 | 17 |
| 4 | 40% | 28,80 | 21 |
| 6 | 60% | 43,20 | 26 |
| 8 | 80% | 57,60 | 82 |
| 8,5 | 80% | 57,60 | 82 |
| 9 | 80% | 57,60 | 87 |
| 12 | 80% | 57,60 | 100 |
| 15 | 80% | 57,60 | 94 |
| 18 | 80% | 57,60 | 70 |
| 21 | 80% | 57,60 | 75 |
| 24 | 80% | 57,60 | 73 |

Fonte: Os autores, 2011.

Tentou-se medir a tensão de retorno com o auxílio de um osciloscópio, porém apenas ruídos (Figura 59) foram obtidos, por possível influência de eventos externos não-previstos,

como interferência de reatores eletrônicos, ruídos provenientes da própria rede de alimentação dos equipamentos, entre outros, confirmando o descrito na seção 5.5.2.3.

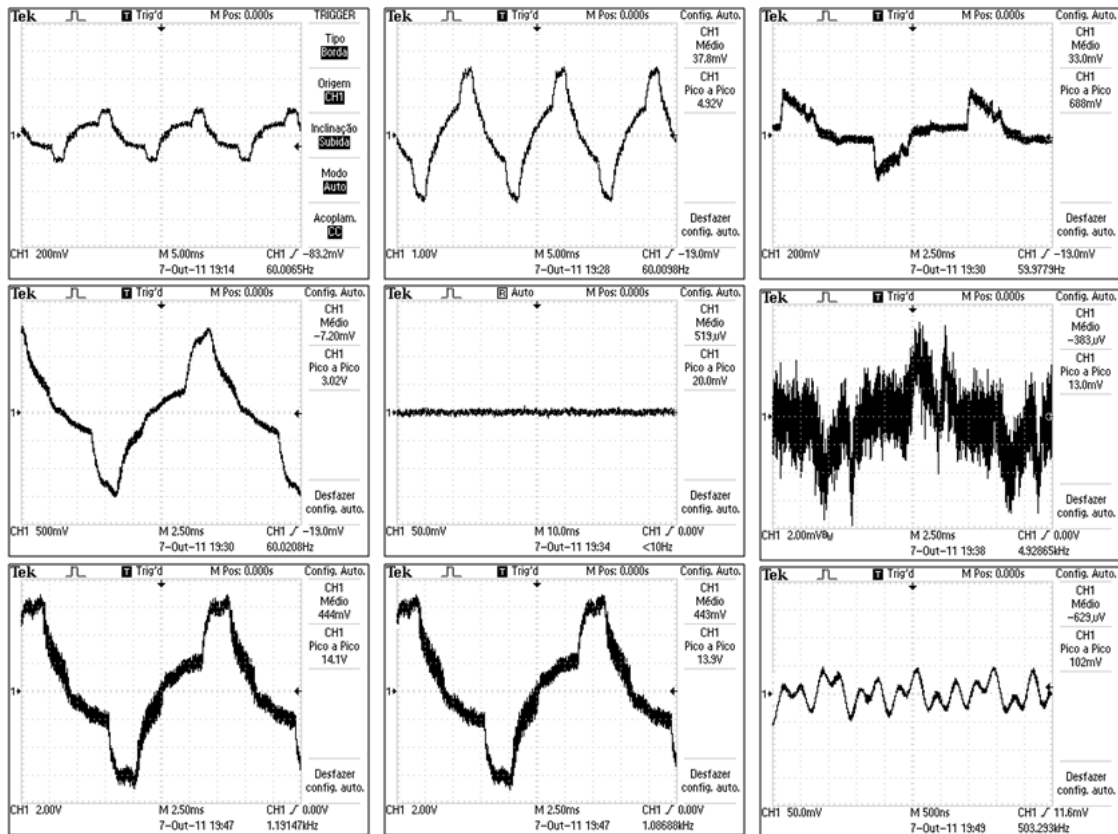


Figura 59 – Formas de onda obtidas com o osciloscópio (ruído)

Fonte: Os autores, 2011.

9.2 Ensaio 02

O ensaio 02 foi realizado com o objetivo de coletar possíveis dados da tensão residual após o ensaio de tensão aplicada.

A Figura 60 ilustra o equipamento utilizado, que foi o Hipot da marca Eletroteste, modelo EH6005C.



Figura 60 – Equipamento Hipot utilizado para a realização do ensaio 02.

Fonte: Os autores, 2011.

Foi ensaiado um cabo blindado de média tensão 12/20 kV de 95 mm² com aproximadamente 149 m de comprimento. Uma extremidade do cabo ficou isolada (Figura 61) e a outra foi preparada para receber os terminais do equipamento (Figura 62 e Figura 63).



Figura 61 - Extremidade a ser isolada.

Fonte: Os autores, 2011.



Figura 62 - Extremidade conectada ao equipamento.

Fonte: Os autores, 2011.

Após a preparação dos cabos, o teste foi iniciado. O nível máximo de tensão aplicada foi de 35,0 kV.



Figura 63 - Terminais ligados ao cabo.

Fonte: Os autores, 2011.

O ensaio realizado resultou nos dados apresentados na Tabela 10:

Tabela 10 – Corrente de fuga do Ensaio 02

| Tempo (s) | Tensão (kV) | Corrente de fuga (μA) |
|--------------|----------------|---------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 6,7 | 29 |
| 25 | 19,0 | 25 |
| 45 | 25,2 | 34 |
| 65 | 35,0 | 28 |
| 80 | 35,0 | 17 |
| 197 | 35,0 | 17 |
| 206 | 22,7 | 38 |
| 207 | 21,3 | 37 |
| 208 | 21,1 | 34 |
| 209 | 19,8 | 33 |
| 210 | 19,1 | 32 |
| 211 | 18,3 | 31 |
| 212 | 17,7 | 30 |
| 213 | 17,2 | 29 |
| 214 | 16,6 | 28 |
| 215 | 14,3 | 23 |
| 216 | 10,6 | 18 |
| 217 | 9,6 | 16 |
| 218 | 8,2 | 14 |
| 219 | 6,4 | 10 |
| 220 | 5 | 8 |
| 221 | 4,2 | 7 |
| 222 | 3,8 | 6 |
| 223 | 3,1 | 5 |
| 224 | 2,9 | 4 |
| 225 | 2,3 | 4 |
| 226 | 2,2 | 3 |
| 227 | 1,9 | 3 |
| 228 | 1,6 | 2 |

Fonte: Os autores, 2011.

9.3 Acompanhamento de Ensaio - em Empresa Fabricante de Cabos

Foi realizado o acompanhamento de um ensaio de tensão aplicada em uma empresa fabricante de cabos. O objetivo desse acompanhamento foi verificar como o ensaio é realizado, conhecer seus resultados, comparar o ensaio realizado em laboratório e o ensaio realizado em campo e se era possível detectar e medir a tensão de retorno.

A empresa possui um ambiente próprio para a realização desse ensaio. Devida a alta tensão aplicada nos terminais dos cabos, esse ambiente é fechado, isolado eletricamente das demais áreas e possui duas áreas distintas, uma para a realização do ensaio e outra para o controle do equipamento. A sala é aterrada, possuindo uma malha de aterramento ligada à estrutura. O aterramento do equipamento Hipot bem como toda a sua instrumentação se dá através de chapas de cobre.

O equipamento utilizado foi o JTCX da Shanghai Dielec Electrotechnics CO, LTD. Sua tensão máxima aplicada é de 90 kV, segundo funcionários. Durante o ensaio uma extremidade do cabo ficou isolada do meio externo para isso ela foi imersa em óleo isolante, em invólucro próprio, e na outra extremidade foram conectados os terminais do equipamento.

A tensão foi elevada gradualmente até 30,50 kV e foi mantida por 5 minutos. Após esse período de tempo houve uma redução para 13,00 kV na qual foi mantida por 30 s. m seguida a tensão é reduzida a zero, conforme gráfico mostrado na Figura 64. De acordo com os resultados obtidos, é possível determinar se o cabo está apto ou não a comercializado.

| HV(kV) | HI(A) | PD(pC) | Time(S) | Result |
|--------|-------|--------|----------|--------|
| 30.50 | 0.89 | | 00:05:00 | OK |
| 13.00 | 0.35 | | 00:00:30 | OK |

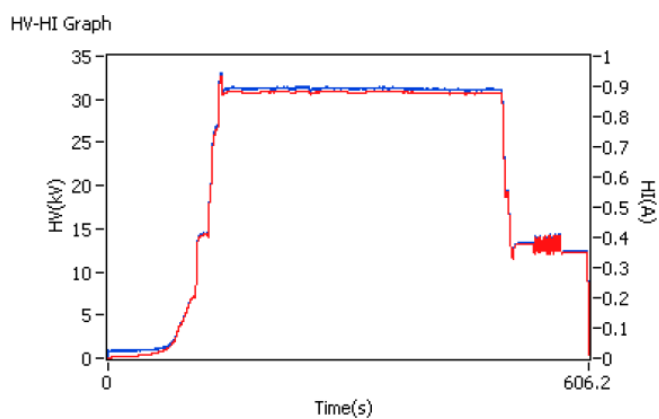


Figura 64 – Resultado obtido

Fonte: Adaptado de Condispar, 2011

Também foi utilizado o equipamento JFD-3 *Partial Discharge Measurement System* da Dielec Electrotechnics CO, LTD.

Com esse equipamento é possível observar como fatores externos influenciam na medição. O gráfico da Figura 65 foi retirado quando o portão do local de ensaio estava fechado. O gráfico da Figura 66 - Resultado com muita influência externa. foi retirado ao abrir o portão do local de ensaio.

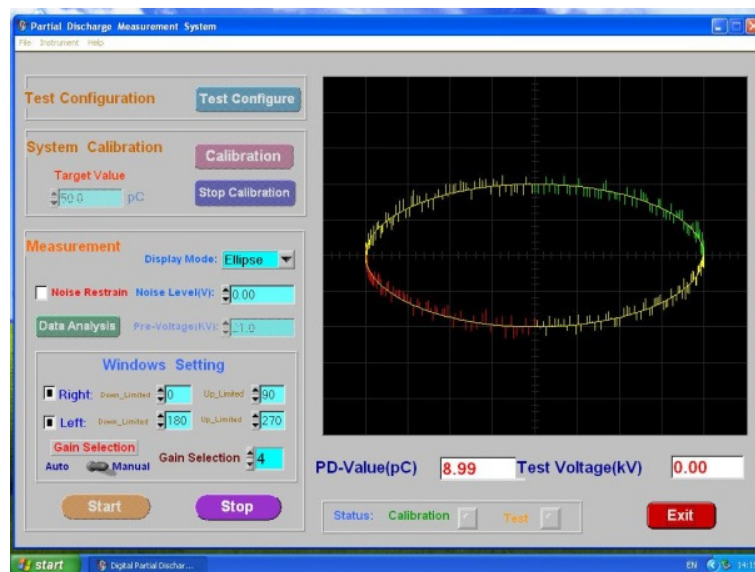


Figura 65 - Resultado com pouca influência externa.

Fonte: Adaptado Condispar, 2011

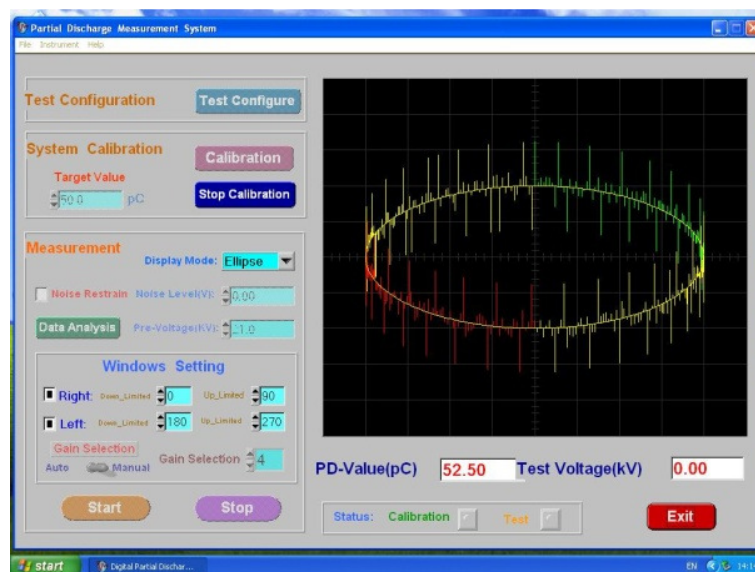


Figura 66 - Resultado com muita influência externa.

Fonte: Adaptado Condispar, 2011

9.4 Conclusões dos Ensaios

Após o término dos ensaios, concluiu-se que, nas condições em que foram realizadas, não foi possível detectar e medir a tensão de retorno utilizando um osciloscópio.

As medições realizadas no 9.1 foram apenas de ruídos causados por agentes externos como interferência de reatores eletrônicos, ruídos provenientes da própria rede de alimentação dos equipamentos, entre outros. Isso ocorre devido ao comprimento do cabo ser de aproximadamente 2 m, assim ele atuou como uma antena, recebendo diversas interferências, ocasionando um sinal de ruído maior que o sinal a ser medido. Já no 9.2, foi feito uso de um cabo de maior comprimento a fim de verificar se as interferências seriam menores do que o sinal pretendido. Para os ensaios foi desconsiderado de forma acadêmica e por limitações técnicas o explanado em 5.5.3.2, pois a impedância de entrada do osciloscópio utilizado estava na ordem de grandeza de 10^6 .

Para o acompanhamento é possível perceber, de forma concisa, que o método de aterramento bem como a robustez dos equipamentos dos laboratórios torna ínfimo qualquer tipo de sinal além dos pretendidos.

10 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

O presente capítulo tem como principal objetivo demonstrar os resultados obtidos através dos ensaios práticos realizados. Serão apresentados dados, gráficos, tabelas e valores relevantes para o levantamento de dados e conclusões referentes à tensão residual.

10.1 Ensaio 01

No primeiro ensaio realizado, foram feitas medições graduais da tensão aplicada sobre o cabo, do tempo de aplicação da tensão e da corrente de fuga medida pelo Hipot durante o ensaio, conforme tabela a seguir. Assim, ao decorrer do tempo, a tensão aplicada no cabo e a corrente de fuga (Figura 67) medida tiveram o seguinte comportamento:

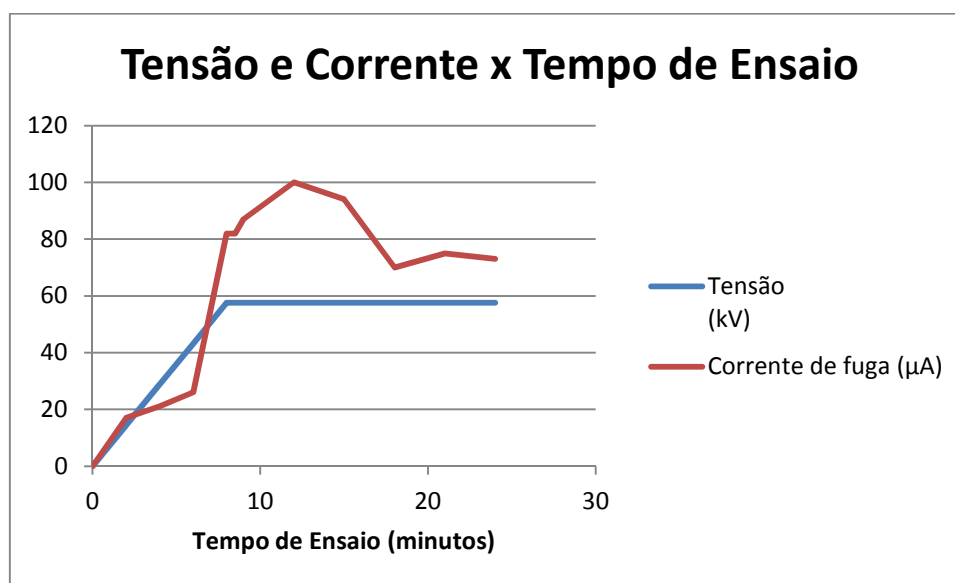


Figura 67 – Tensão Aplicada e corrente de fuga no Ensaio I.

Fonte: Os autores, 2011.

Sabe-se que a tensão aplicada pelo Hipot foi conectada entre o condutor e a blindagem do cabo (ou seja, exatamente nos “terminais” do capacitor que surge no cabo).

Desse modo, tem-se a curva de carregamento do capacitor (Figura 68), através da tensão aplicada durante o ensaio:

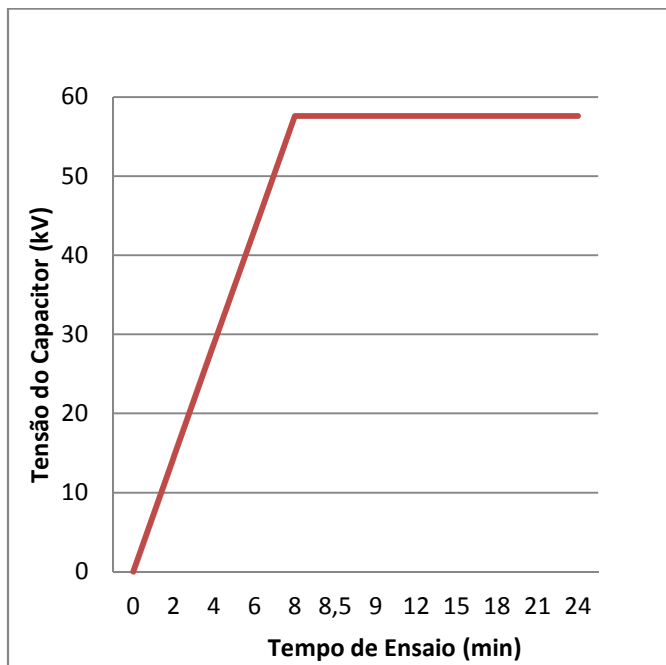


Figura 68 – Curva de carregamento do capacitor formado no cabo, conforme tensão aplicada.

Fonte: Os autores, 2011.

10.2 Ensaio 02

Este ensaio apresentou os dados mais conclusivos, e foi o que melhor evidenciou a presença de tensão residual no cabo de média tensão. Por se tratar de cabo com um comprimento maior (149 metros), a capacitância é relativamente maior, comparando com a dos cabos de outros ensaios, segundo a equação (7.2.4).

10.2.1 Dados Obtidos Experimentalmente

No ensaio em campo, foram obtidos os valores de tensão (V), corrente de fuga (μA) e tempo de ensaio (em segundos). Assim, monta-se uma tabela com todos os valores, de

acordo com a progressão dos procedimentos de ensaio. Vale ressaltar que os dados obtidos são referentes ao período pós-ensaio, ou seja, após zerar a tensão aplicada pelo Hipot. Nota-se que a tensão medida é a própria tensão residual.

Assim, tem-se graficamente (Figura 69) o comportamento da tensão medida no cabo e da corrente de fuga no mesmo, com o passar do tempo:

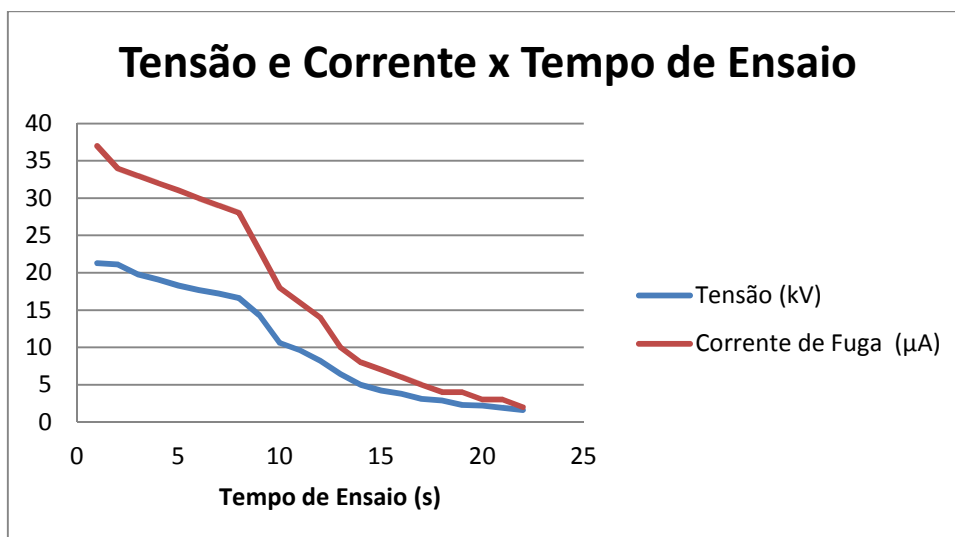


Figura 69 – Comportamento da tensão residual (V) e da corrente de fuga (µA) do cabo em função do tempo (s) após zerar a tensão aplicada pelo Hipot para Ensaio 02.

Fonte: Os autores, 2011.

O gráfico de Tensão x Corrente de Fuga (Figura 70) também se apresenta útil nesse caso, pois estabelece a relação entre as duas grandezas (portanto, a resistência elétrica da isolamento do cabo) ao longo do tempo.

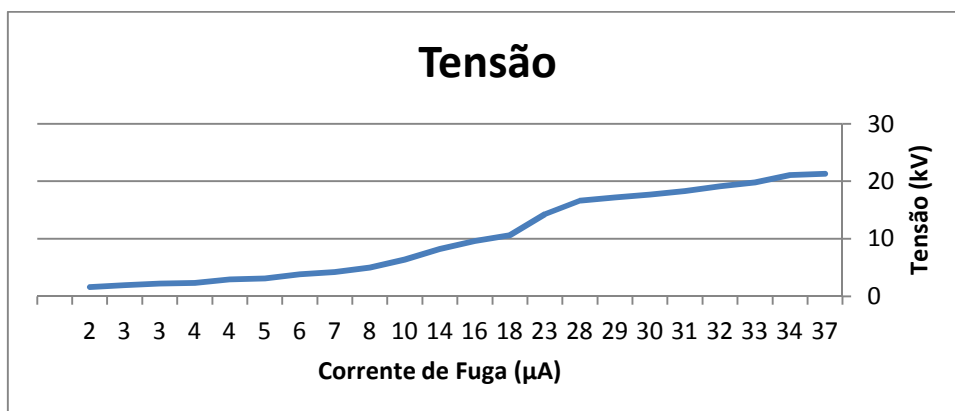


Figura 70 – Comportamento da tensão residual (kV) e da corrente de fuga (µA).

Fonte: Os autores, 2011.

10.2.2 Cálculos efetuados sobre os dados obtidos

Tendo como base os dados obtidos, já apresentados no item 10.2.1, bem como a teoria apresentada anteriormente no trabalho no item 8.2, é possível calcular vários dados relativos ao cabo ensaiado, como sua capacitância e, em especial, a curva de descarregamento do cabo por seu efeito capacitivo.

A primeira grandeza a ser calculada é a resistência elétrica da isolação presente entre o condutor e a blindagem. Considerando a tensão aplicada e a corrente de fuga apresentadas anteriormente, pode-se obter a resistência através da razão entre V e I. A partir dos dados obtidos na prática, monta-se inicialmente a

Tabela 11:

Tabela 11 - Valores Obtidos no Ensaio 02, conforme tempo de ensaio.

| Tensão (kV) | Corrente de Fuga (μA) | Tempo (s) | Resistência ($\text{M}\Omega$) |
|-------------|------------------------------------|-----------|----------------------------------|
| 21,3 | 37 | 1 | 575,676 |
| 21,1 | 34 | 2 | 620,588 |
| 19,8 | 33 | 3 | 600,000 |
| 19,1 | 32 | 4 | 596,875 |
| 18,3 | 31 | 5 | 590,323 |
| 17,7 | 30 | 6 | 590,000 |
| 17,2 | 29 | 7 | 593,103 |
| 16,6 | 28 | 8 | 592,857 |
| 14,3 | 23 | 9 | 621,739 |
| 10,6 | 18 | 10 | 588,889 |
| 9,6 | 16 | 11 | 600,000 |
| 8,2 | 14 | 12 | 585,714 |
| 6,4 | 10 | 13 | 640,000 |
| 5 | 8 | 14 | 625,000 |
| 4,2 | 7 | 15 | 600,000 |
| 3,8 | 6 | 16 | 633,333 |
| 3,1 | 5 | 17 | 620,000 |
| 2,9 | 4 | 18 | 725,000 |
| 2,3 | 4 | 19 | 575,000 |
| 2,2 | 3 | 20 | 733,333 |
| 1,9 | 3 | 21 | 633,333 |
| 1,6 | 2 | 22 | 800,000 |

Fonte: Os autores, 2011.

Desse modo, constrói-se o gráfico apresentado na Figura 71 e na Figura 72:

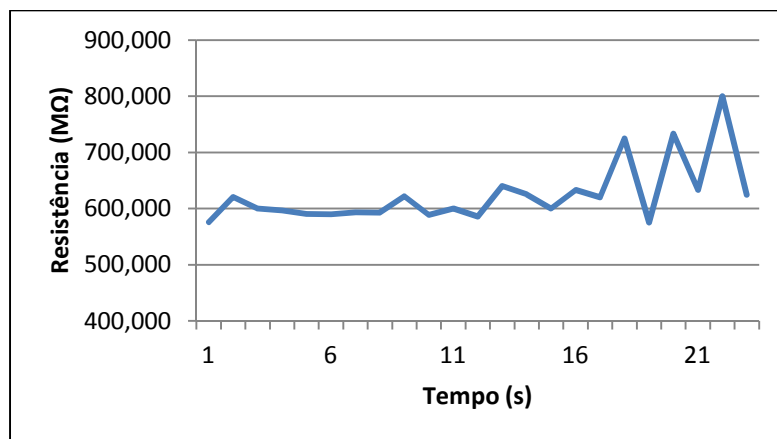


Figura 71 – Resistência elétrica da isolamento ao longo do tempo.

Fonte: Os autores, 2011.

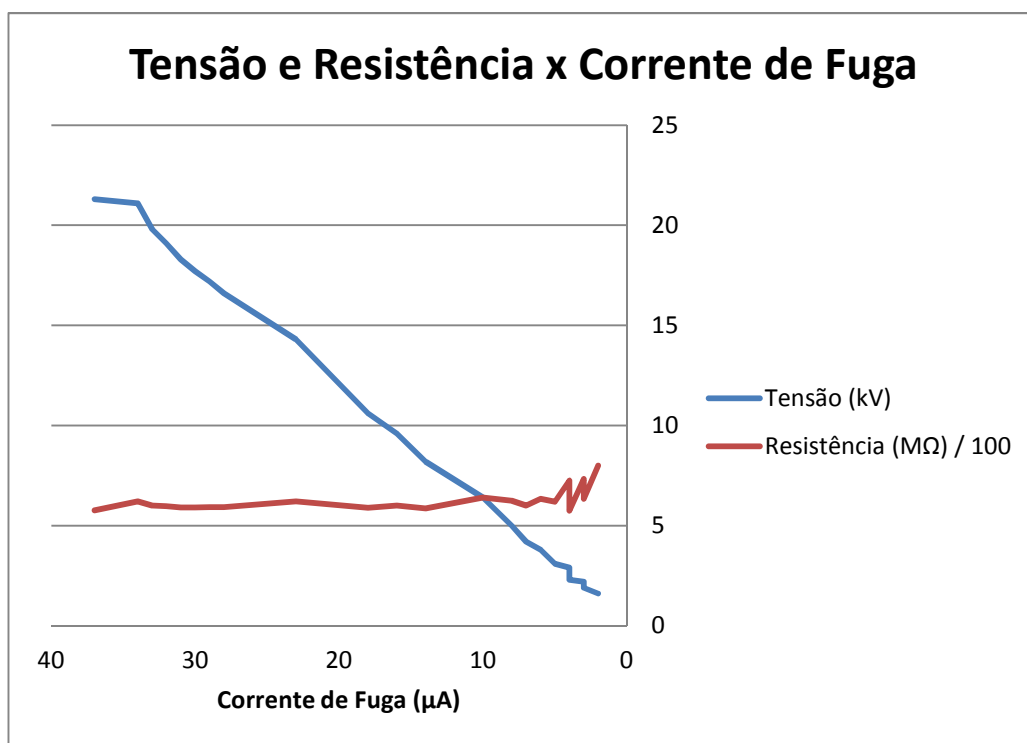


Figura 72 – Tensão residual e Resistência em relação à corrente de fuga.

Fonte: Os autores, 2011.

Percebe-se que a resistência da isolamento também não é constante ao longo do tempo, em decorrência dos processos físicos que ocorrem no cabo, além da alta tensão aplicada e dos danos causados pela corrente de fuga em tal meio.

A capacitância do cabo também pode ser calculada, através das fórmulas já apresentadas. Desse modo, para o cabo ensaiado, tem-se:

$$C = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln\left(\frac{r_{\text{ext}}}{r_{\text{int}}}\right)} \quad (24)$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2,302 \cdot 10^{-11} \cdot 149}{\ln\left(\frac{11,8}{5,7}\right)} = 0,02961 \mu\text{F} \quad (25)$$

Considerando que o cabo tem comprimento (H) de 149 metros, percebe-se que o valor da capacitância está de acordo com o estabelecido em 8.2.4.

Além da capacitância, é preciso calcular uma resistência média da isolação do cabo, para fazer os cálculos da curva de descarregamento capacitivo. Através da Tabela 11 tem-se que a resistência média é de 624,58 MΩ, com desvio padrão de 5,4%.

A partir dos valores de capacitância e resistência, pode-se calcular a constante de tempo τ , qual seja:

$$\tau = R \cdot C = (624,58 \cdot 10^6) \cdot (0,02961 \cdot 10^{-6}) = 18,49 \text{ s} \quad (26)$$

Desse modo, obtém-se a expressão da curva de descarga do cabo:

$$V = V_0 \cdot e^{-t/\tau} = 21,3 \cdot e^{-t/18,49} \quad (27)$$

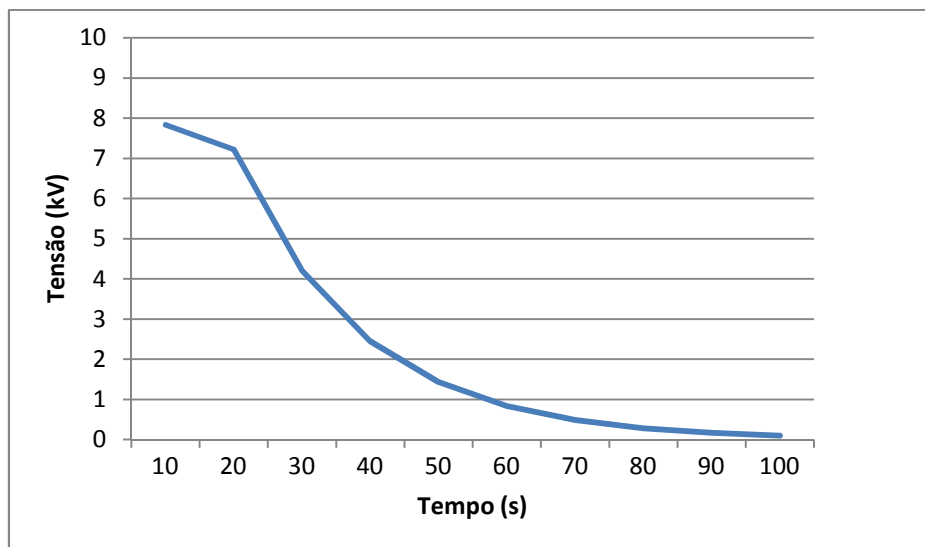


Figura 73 – Curva de descarregamento do cabo ao longo do tempo (s) para o Ensaio 02.

Fonte: Os autores, 2011.

Através dos dados obtidos, percebe-se que a partir do tempo igual a aproximadamente $(6 \times \tau)$ o descarregamento se torna efetivo.

11 SUGESTÕES DE MELHORIA NO SISTEMA

Paralelamente à realização das práticas com o equipamento Hipot, foram analisados alguns tópicos sobre a melhoria na segurança do sistema de ensaios de tensão aplicada, bem como possíveis soluções para tornar mais eficiente o descarregamento de cargas residuais no cabo ensaiado.

Inicialmente percebeu-se que, devido à disposição física dos equipamentos durante o ensaio e ao nível de tensão aplicado entre o cabo e sua blindagem, uma abordagem mais simples e prática de descarregamento, como uma simples ligação de carga, não é viável em uma primeira abordagem. Seria necessário um sistema de aterramento aperfeiçoado, de modo que a ligação entre o cabo e a terra se desse a distância, pela impossibilidade de aproximação de operadores logo após a realização do ensaio, devido a normas de segurança. Sendo cabível a utilização de vara de manobras com cabo terra afixado na ponta a fim de conectar o cabo energizado a terra. Ainda seria passível a utilização de luvas de média tensão a fim de assegurar a integridade física do operador que efetuará a conexão do cabo de média tensão à terra.

Porém, a mudança mais importante é a sugestão de implementar de um sinalizador de tensão para o ensaio de tensão aplicada. A seguir, são apresentadas as características de tal melhoria.

11.1.1 Sistema Sinalizador

Foi sugerido um sistema no qual uma carga seja adicionada após a realização do ensaio de tensão aplicada, entre o terminal condutor do cabo e sua blindagem (ou seja, nos terminais onde surge a tensão residual). Como característica principal deste sistema, está a redução do tempo de descarga da tensão residual através da ligação de cargas nos terminais, de modo a aperfeiçoar a segurança do sistema após a realização do ensaio.

11.2 DEFINIÇÃO DO SINAL DE ENTRADA

Para que o sistema a ser utilizado forneça as características de saída desejadas, foi necessário avaliar o sinal de tensão residual originado no cabo, a fim de dimensionar um possível circuito eletrônico ou outro tipo de dispositivo de segurança no sistema sinalizador.

Inicialmente sabe-se, através de dados de fabricantes de aparelhos Hipot e de normas regulamentadoras vigentes, que o equipamento é automaticamente desligado quando a tensão chega a 20% da tensão nominal do cabo ensaiado. Como os ensaios a serem realizados chegam a aproximadamente 10 kV, a tensão no momento do desligamento foi considerada como 200 V. A partir desse momento, a tensão residual surge através de uma forma de onda similar à onda de tensão gerada no descarregamento de um capacitor.

Desse modo, um gráfico aproximado da forma de onda da tensão residual que entraria no circuito sinalizador é a seguinte:

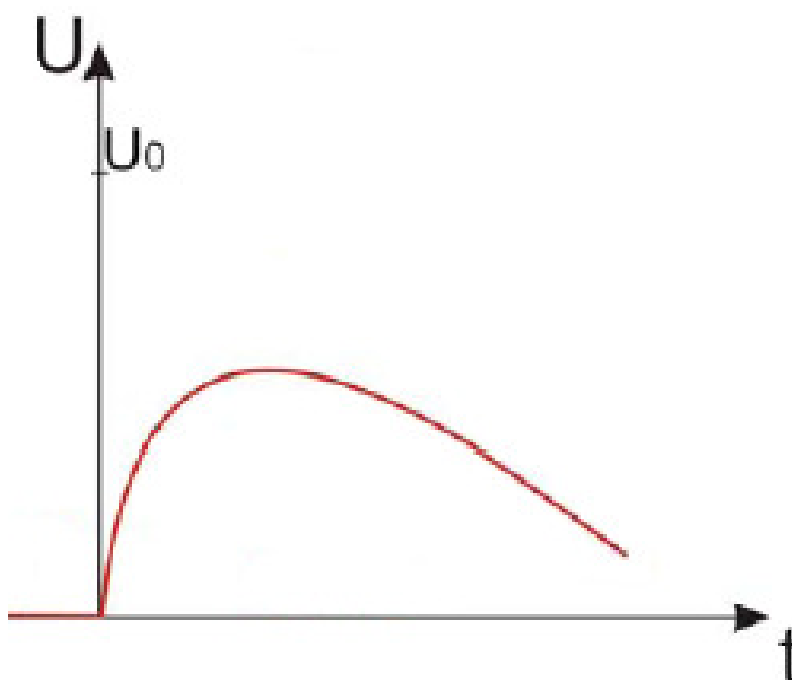


Figura 74 – Forma de onda aproximada da tensão residual no circuito sinalizador.

Fonte: BASSAN, 2006, p. 14.

11.2.1.1 Tipos de Sinalização

11.2.1.1.1 Sistema de Aviso Sonoro

Inicialmente, vários tipos de sinalização foram vistos como possíveis de se aplicar no sistema de segurança do Hipot. Inicialmente, optou-se por um sistema sonoro, que emitisse um alarme quando o nível de tensão no cabo ultrapassasse determinado limite, superior ou inferior. Tal idéia foi descartada em virtude das características indutivas de um possível alto-falante, bem como a necessidade de se implementar uma interface demasiadamente complexa na utilização de outro sistema de alarme sonoro eletrônico.

11.2.1.1.2 Sistema de Aviso Luminoso

Em seguida, foi recomendado um sistema similar, porém trocando o sistema sonoro por um aviso luminoso. Nesse escopo, há várias possibilidades de implementar fisicamente o dispositivo, uma vez que vários tipos de emissores luminosos existem para aplicação.

Foram cogitados sistemas utilizando lâmpadas incandescentes, porém esse método foi rapidamente descartado devido à inviabilidade de transporte e manuseio do equipamento em campo (por exemplo, durante a execução de uma obra) devido sua alta fragilidade. Além disso, seria preciso um sistema específico de controle das lâmpadas para que se conseguisse o efeito de barras desejado.

Finalmente, o sistema sugerido como mais adequado foi um circuito eletrônico de sinalização, que comunica ao usuário do ensaio o nível de tensão presente no cabo. O sensoriamento se dá através de uma interface que utiliza LEDs (*light emitting diodes*) dispostos de forma a sinalizar através de um gráfico de barras (*bargraph*) tensões entre 0 V e 200 V. O *range* do sensoriamento foi escolhido a partir das características intrínsecas ao equipamento Hipot, sendo que ao final do ensaio, o equipamento é desativado automaticamente quando o nível de tensão chega a 200 V.

Além da redução do tempo de descarga da tensão residual no cabo, o sistema de sinalização pós-ensaio possibilita a aperfeiçoar os procedimentos de segurança para o operador do ensaio. Como já foi apresentado no capítulo 0, as medidas de precaução em relação à segurança do operador em uma instalação ou execução elétrica constituem parte fundamental dos procedimentos a serem seguidos.

Enfim, as especificações do circuito sinalizador podem ser consideradas como a principal melhoria sugerida pela equipe nos futuros ensaios. Foi desenvolvida uma placa protótipo utilizando exatamente as mesmas características técnicas apresentadas, porém com *range* de tensão de apenas 5 V. Para a implementação prática no ensaio de tensão aplicada, uma interface de tensões deveria ser aplicada.

12 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho, que era o estudo do comportamento das tensões residuais em cabos blindados de média tensão após a realização de ensaio de tensão aplicada, foi alcançado.

Para a concretização desse estudo foram efetuadas descrições dos contextos teóricos que envolvem o ensaio no qual foi verificada a existência de várias tensões residuais em cabos de média tensão. Dentre as estudadas foi estabelecida a tensão de retorno como a de maior foco devido a sua pequena visibilidade em termos de graduação acadêmica.

Fez-se um levantamento das teorias existentes sobre o fenômeno de tensões residuais bem como das experiências realizadas, e foram apresentados circuitos equivalentes em algumas das tensões residuais. Logo após, partiu-se para a realização na prática do ensaio estudado e descrito.

Todos os ensaios realizados foram aproveitáveis em relação aos resultados esperados na teoria: mostraram com clareza todo o processo de execução do ensaio de Tensão Aplicada, e confirmaram o esperado na teoria em relação ao efeito capacitivo existente nos cabos de média tensão. Foi possível avaliar o processo de descarregamento de energia das amostras após o ensaio, bem como o tempo em que há possibilidade de choque elétrico por parte dos operadores de equipamentos durante os testes.

Após a realização dos ensaios foi possível verificar a veracidade das informações estudadas, entre elas a de interferência na medição de tensão de retorno devido a baixa impedância de entrada dos equipamentos de aquisição de sinal. Sendo necessário o desenvolvimento de um sistema de medição ou a utilização de equipamentos importados de uso para medição de tensão de retorno em transformadores.

Através desse trabalho foi possível, com base nos ensaios estudados, realizados e acompanhados, sugerir técnicas de aperfeiçoamento da segurança dos trabalhadores que efetuam esse tipo de ensaio. Através de sinalizadores visuais ou a utilização de varas de manobra para alta tensão e/ou fazer uso de luvas de média tensão, garantindo, assim, a integridade física do operador.

Por fim é possível concluir que não foi atingida a generalização de topologias devido ao grande custo agregado aos equipamentos e materiais para a realização do teste. Foram necessárias parcerias com empresas do ramo de engenharia elétrica, instaladoras e fabricantes,

a fim de conseguir a disponibilidade de utilização de equipamentos e cabos. Assim, foi limitado o aprofundamento da realização de testes, já que a maioria dos cabos utilizados seria usada para comercialização, não podendo submetê-los a níveis elevados de estresses para salvaguardar a suas propriedades físico-químicas. Assim como não foi possível a obtenção da tensão de retorno nos cabos ensaiados devido a limitação técnica dos equipamentos disponíveis.

13 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo como base o trabalho apresentado, dados coletados, ensaios realizados e a situação final da pesquisa desenvolvida, podem-se sugerir outras atividades acadêmicas futuras de modo a complementar o estudo atual. Dentre elas, citam-se:

- Simulação computacional do ensaio de tensão aplicada, através do circuito equivalente do cabo ensaiado, bem como todas as variáveis de polarização dielétrica;
- Desenvolvimento de *software* a fim de prever o tempo de descarga após o ensaio, conforme tipo de cabo e características aplicadas durante o teste;
- Implementar prática do sistema sinalizador de tensão residual, utilizando interface de tensões para aplicação em circuito eletrônico;
- Avaliação da influência de outros fatores externos no surgimento de tensão residual, tais como temperatura, umidade, depreciação e idade do cabo.
- Comparar a utilização do equipamento desenvolvido por Bressan com equipamentos comerciais de mensuração de tensão de tensão de retorno;
- Através de uma análise da tensão de retorno verificar a susceptibilidade de aumento de tensão de retorno com o comprimento de cabo;
- Através de uma análise da tensão de retorno verificar a existência de tensão de retorno nas tensões residuais oriundas do ensaio de tensão aplicada;
- Desenvolver equipamento para mensurar a tensão de retorno;
- Desenvolver dispositivo automático ou de acionamento remoto para realização do aterramento do cabo de média tensão, após a realização do ensaio de tensão aplicada, com o intuito de fazer o aterramento do cabo de média tensão, assegurando a proteção do operador ao cabo energizado.

14 REFERÊNCIAS

ALCANTARA, Daniel Soares. **O Choque Elétrico**. Disponível em:<
<http://dalcantara.vilabol.uol.com.br/index3.html> >. Acesso em: 20 de maio de 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6251**: Cabos de potência com isolamento extrudada para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos construtivos. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6881**: Fios e cabos elétricos de potência ou controle – Ensaio de tensão elétrica. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7286**: Cabos de potência com isolamento extrudada de borracha etilenopropileno (EPR) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2003.

BRESSAN, Bruno Nahuli. **Desenvolvimento de Sistema e Metodologia para Avaliar a Influência da Temperatura em Medidas de Tensão de Retorno em Cabos Isolados de XLPE**. 2006. 52p. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

BODANIS, David. **Universo Elétrico - A impressionante história da Eletricidade**. 1. Ed. São Paulo: Record. 294 p.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA - COPEL. **NTC 903100**: Fornecimento em Tensão Primária de Distribuição. Curitiba, 2002.

DIELEC ELECTROTECHNICE CO. LTD. **Partial Charge Measurement System**: User Guide. Shangai, 2010. 40 p.

ELETROTESTE IND E COM. LTDA. **Manual de utilização: Equipamento para ensaio de tensão aplicada – HIPOT mod.: EH5005C mod.: EH6005C**. Santa Rita Do Sapucaí: ELETROTESTE. 2010. 24 p.

FUNDACENTRO. **Riscos em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Disponível em: <http://www.fundacentro.gov.br/dominios/ctn/anexos/cdNr10/Manuais/M%C3%B3dulo01/444_2%20-%20RISCOS%20EM%20INSTALA%C3%87%C3%95ES%20E%20SERVI%C3%87OS%20EM%20ELETRICIDADE.pdf>. Acesso em: 18 de maio de 2011.

GONÇALVES, Edward Abreu. **Manual de segurança e saúde no trabalho**. 4. ed. São Paulo: LTr, 2008 1399 p.

GUBANSKI, S. M., et al. **Dielectric Mixtures: Electrical Properties and Modeling**. 20 p. IEEE Transactions on Dielectrics and Electric Insulation, vol. 9. Gothenburg: 2002.

HAYT JR., William Hart. **Eletromagnetismo**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 339p.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. **Aterramento elétrico**. 5. ed., modificada e ampl. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 2002 214 p.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MARQUES, Mário Osório. **Escrever é preciso: o princípio da pesquisa**. 5. ed. Ijuí, RS: Unijuí, 2006. 154 p.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO TRABALHO. **NR-10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. 2004.

OLIVEIRA, Cláudio A. Dias de. **Passo a passo dos procedimentos técnicos em segurança e saúde no trabalho: micro, pequenas, médias e grandes empresas**. São Paulo: LTr, 2002. 219 p.

OLIVEIRA, Rodrigo Aurélio Amaral Taques de. **Abordando o choque elétrico**. 2007. 42 p.

PAUL, Clayton R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. 2. ed. New York: J. Wiley, 2006.

PAULINO, Marco A. de. O Estado da Arte das Aplicações para Diagnóstico de Umidade em Transformadores de Potência. In: **CIDEL Argentina 2010**. Argentina, 2010.

PIAZZA, Fernando. **Avaliação do Estado de Envelhecimento do Sistema isolante de Transformadores em Papel-Óleo e Cabos Extrudados em XLPE, Utilizando a Técnica de Tensão de Retorno**. 2001. 94p. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

PRESENTE, Jonas Roberto. **Fundamentos de Técnica de Alta Tensão**. 2004. 135 p. Apostila - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2004.

PRYSMIAN CABOS & SISTEMAS. **Cabo Eprotenax 6 até 35kV**: catálogo. Disponível em: <<http://www.prysmian.com.br/export/sites/prysmian-ptBR/energy/pdfs/EprotenaxMediaTensao.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2011.

PRYSMIAN CABOS & SISTEMAS. **Dimensionamento**: catálogo. Disponível em: <<http://www.prysmian.com.br/export/sites/prysmian-ptBR/energy/pdfs/DimensionamentoMediaTensao.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2011.

ROBERT, Renê, et. al. **Corrente de Absorção e Reabsorção em Dielétricos**. 13 p. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 30 no. 3. São Paulo, 2008.

SCHAFRANSKI, Luiz Erley. **NR-10**. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/erley/arquivos/Nr10.zip>>. Acesso em: 18 de maio de 2011.

SILVA, Guilherme Cunha. **Comportamento elétrico e dielétrico de cabos de potência extrudados utilizados em redes de distribuição de energia elétrica**. 122 p. Curitiba. Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 2000.

SPERANDIO, Carlos A.. **Fundamentos de engenharia de segurança**: cursos de engenharia: mecânica, eletrônica e eletrotécnica. Curitiba: CEFET-PR. 19--, 253 p.

SUJANI, Muhamad Ihsan Bin. **Degradation of Polymeric Power Cable due to Water Tree Under DC Voltage**. 66 p. Malasya. Universiti Teknologi Malasya – Malasya, 2010.

TETTEX INSTRUMENTS. **Advanced Automatic Recovery Voltage Meter for diagnosis of oil-paper insulation systems** - Manual. Basel, Suíça: 2011.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Sistema de Bibliotecas. Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2009.

VÓRTEX EQUIPAMENTOS. **Teste de Resistência de Isolação** - Nota de Aplicação. Belo Horizonte: Vórtex, 2011.

WOLSKI, Belmiro. **Fundamentos de eletromagnetismo**. Rio de Janeiro, RJ: Ao Livro Técnico, 2005. 239 p.