

Felipe Schiavon Inocência de Sousa

**Construção de um divisor capacitivo
para medição de tensões impulsivas até
230 kV em linhas de 25 kV energizadas**

São Carlos
2013

Felipe Schiavon Inocêncio de Sousa

**Construção de um divisor capacitivo
para medição de tensões impulsivas até
230 kV em linhas de 25 kV energizadas**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia
Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e
Automação apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Orientador: Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos
2013

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

725c Sousa, Felipe Schiavon Inocência de
 Construção de um divisor capacitivo para medição de tensões impulsivas até 230 kV em linhas de 25 kV energizadas / Felipe Schiavon Inocência de Sousa; orientador Ruy Alberto Corrêa Altafim. São Carlos, 2013.

 Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

 1. Invólucro estrutural. 2. Transdutor de pico de tensão impulsiva. 3. Eletreto. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Felipe Schiavon Inocencio de Sousa

Título: "Construção de um divisor capacitivo para medição de tensões impulsivas até 230 kV em linhas de 25kV energizadas"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25 / 11 / 2013,

com NOTA 10 (dez, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Marcelo Basílio Joaquim - (SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino - (SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Francisco Inocêncio de Sousa e Rita de Cássia Schiavon Inocêncio de Sousa, que me apoiaram incondicionalmente ao longo de toda minha vida, sempre fazendo o melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim pela orientação neste projeto e trabalho de conclusão.

Aos Professores Marcelo Basílio Joaquim e Rogério Andrade Flauzino por aceitarem compor a banca de avaliação deste trabalho.

Ao técnico do Departamento de Engenharia Elétrica Rui Bertho por sua ajuda na confecção do protótipo.

Ao Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, pelo auxílio nos ensaios de validação dos sensores. Em particular ao técnico Clóvis Yoshio Kodaira por sua ajuda e dedicação ao projeto.

Ao colaborador Mestre Daniel Augusto Pagi Ferreira por todo o suporte ao longo do projeto.

Ao colaborador do Laboratório de Alta Tensão Mestre Daniel Rodrigo Falconi, por sua participação na construção e teste dos sensores e por seu auxílio na revisão deste texto e contribuição com relevantes fontes bibliográficas.

Ao colaborador do Laboratório de Alta Tensão Yuri Andrey Olivato Assagra.

À bibliotecária Elena Luzia Palloni Gonçalves, pela revisão deste trabalho e adequação do mesmo às normas vigentes.

À Rio Grande Energia (RGE), subsidiária do Grupo CPFL Energia, pelo financiamento do projeto.

À todos os colegas, colaboradores, técnicos e professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos por todo o apoio ao longo da graduação.

RESUMO

SOUSA, F. S. I. *Construção de um divisor capacitivo para medição de tensões impulsivas até 230 kV em linhas de 25 kV energizadas.* 57f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

O trabalho apresentado expõe o projeto e construção de um conjunto invólucro estrutural e divisor capacitivo para transdutor de pico de tensão impulsiva, para medição de impulsos da ordem de 200 kV. Sua aplicação destina-se principalmente à proteção do elemento sensor em campo instalado em linhas de distribuição de 25 kV. A aquisição do sinal de tensão impulsiva é realizada pela redução do valor de tensão do impulso à um valor seguro de operação detectável pelo sensor. O invólucro prove proteção ao elemento sensor contra fatores externos, possibilitando ainda a fácil instalação e operação do sistema por equipes de campo. O projeto compreende as etapas de: desenho mecânico do invólucro, construção do circuito capacitivo, construção do protótipo, ensaios em laboratório e construção das unidades a serem entregues ao cliente. O projeto mecânico permite a elaboração de desenhos tridimensionais e sua posterior planificação para confecção das peças componentes. Os ensaios realizados em laboratório acreditado, seguindo normas internacionais específicas para a construção de equipamentos para operação em alta tensão, habilitam as técnicas e materiais empregados.

Palavras-Chave: Invólucro estrutural. Transdutor de pico de tensão impulsiva. Eletreto.

ABSTRACT

SOUSA, F. S. I. *Construction of a capacitive divider for 230 kV impulsive voltage measurement in 25 kV distribution lines.* 57f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

The present paper exposes the development and construction of a structural casing and capacitive divider for an impulsive peak voltage transducer for measuring impulses of 200 kV. Its application consists, mainly, to protect the sensor installed on distribution lines of 25 kV. The peak voltage signal acquisition is performed by reducing the voltage level of the impulse to a safe operational value that can be detected by the sensor. The casing provides protection to the sensing element. It also allows an easy operation and installation of the system by technical support team in the field. The project comprises the following steps: mechanical design, prototype construction, laboratory test and construction of the sensing units to be delivered. The mechanical project allows the development of three-dimensional models to be constructed. Tests performed in an accredited laboratory, following specific international standards to develop high voltage equipment, certifies the techniques and materials used in this project.

Keywords: Structural casing. Peak voltage detector. Electret.

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama esquemático do transdutor de pico de tensão com a película de eletreto.....	24
Figura 2 - Amostras de película de Teflon FEP após ensaios, com marcação por pó de toner.....	25
Figura 3 - Terminal de baixa tensão com capacitores em paralelo	26
Figura 4 – Diagrama esquemático do divisor capacitivo e invólucro	27
Figura 5 - Divisor capacitivo blindado em cruzeta de madeira para ensaio.....	29
Figura 6 - Divisor capacitivo com invólucro acoplado em presilha.....	30
Figura 7 - Invólucro em vista isométrica.....	31
Figura 8 - Tubo roscado	32
Figura 9 - Vista explodida do eletrodo superior do invólucro.....	32
Figura 10 - Cone e cruzeta para encaixe.....	33
Figura 11 - Conjunto abrigo do invólucro	33
Figura 12 - Mola de PVC com revestimento de chapa de latão	34
Figura 13 - Perspectiva de encaixe e contato do invólucro ao terminal de baixa tensão do divisor	34
Figura 14 - Tubo do conjunto divisor capacitivo e tampa do abrigo.....	35
Figura 15 - Prensa cabo de aterramento com parafuso fixador	35
Figura 16 - Conjunto divisor capacitivo e abrigo completo	36
Figura 17 - Perspectiva de encaixe da placa capacitiva no interior do tubo.....	36
Figura 18 - Conexão do prensa cabo à mola de PVC com chapa de latão	36
Figura 19 - Capacitor de 1nF e 15kV	37
Figura 20 - Divisor capacitivo com capacitores alinhados paralelamente	38
Figura 21 – Capacitores alinhados de forma oblíqua	38
Figura 22 - Capacitor de 1nF e 30kV	39
Figura 23 - Ensaio de tensão senoidal aplicada, com o sensor submetido à simulação de chuva.	40
Figura 24 - Medição dos índices pluviométricos em suas componentes vertical e horizontal.....	41
Figura 25 - Divisor capacitivo e invólucro em ensaio de impulso de tensão	42
Figura 26 - Ensaio de tensão alternada sob simulação de chuva no conjunto definitivo	43
Figura 27 - Circuito de ensaio do capacitor 30kV e 1 nF.....	43
Figura 28 - Gráfico do ensaio de impulso de tensão em 150 kV do divisor com capacitores dispostos de forma paralela	45
Figura 29 - Gráfico do ensaio de impulso de tensão em 200 kV do divisor com capacitores dispostos de forma paralela	45
Figura 30 - Ensaio de impulso de tensão de 200 kV com capacitores dispostos de forma oblíqua sobre a placa	46
Figura 31 - Divisor capacitivo finalizado com eletrodo de alta tensão conectado ao gerador de sinais	46
Figura 32 - Aterramento do divisor feito pelo prensa cabo conectado ao invólucro.....	47
Figura 33 - Quarenta placas de acrílico com capacitores soldados em série.....	48
Figura 34 - Quarenta unidades de invólucro construídas de acordo com as especificações do projeto.....	48
Figura 35 - Quarenta unidades de divisores capacitivos construídos.....	49
Figura 36 - Prensa cabo para aterramento	50
Figura 37 - Detalhe da mola de PVC com revestimento de chapa de latão fixada ao prensa cabo.....	50
Figura 38 - Perfil do invólucro	51

Figura 39 - Detalhe da haste de manobra do invólucro para fixação dentro do abrigo.....	51
Figura 40 - Invólucro fixado à haste de manobra.....	52
Figura 41 - Relatório do ensaio de tensão senoidal para o conjunto finalizado	56
Figura 42 - Relatório de impulso de tensão para o conjunto finalizado	57

Sumário

1. Introdução.....	19
2. Revisão Bibliográfica.....	21
3. Projeto e construção do conjunto divisor capacitivo e invólucro.....	23
3.1. Sensor de pico de tensão impulsiva baseado em eletreto	23
3.2. Divisor Capacitivo	25
3.3. Projeto Mecânico	28
3.4. Projeto Elétrico	37
3.5. Ensaios	39
4. Resultados	45
5. Conclusão	53
Anexos.....	56

1. Introdução

A determinação da intensidade e frequência de ocorrência de descargas atmosféricas é de grande importância nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Muitos são os métodos utilizados atualmente para determinação das principais grandezas associadas aos surtos nas linhas. Devido à natureza do sistema de distribuição, caracterizado por linhas aéreas expostas, o conjunto divisor de tensão e invólucro a ser instalado deve contemplar em sua construção, instalação e operação, soluções aos principais fatores externos.

Dentre os principais fatores estão as intempéries e a grande quantidade de energia dissipada pela descarga. O projeto deve então levar em consideração a ação dos ventos, possíveis infiltrações de água, o envelhecimento e conseqüente enfraquecimento do material devido à exposição aos raios solares. A escolha de materiais adequados e o formato ergonômico dos componentes de um sensor são decisivos para o sucesso nas medições e aferição dos resultados.

Com o desenvolvimento de sensores de pico de tensão impulsiva baseados na tecnologia dos eletretos, tornou-se necessário o projeto e construção de invólucros adequados à sua instalação e operação em linhas de energia elétrica. Sua principal atribuição é fornecer proteção ao elemento sensor e ao divisor de tensão a este conectado. Além disso, o invólucro deve permitir que o elemento sensor possa ser desconectado com facilidade do sistema e assim impeça que sofra qualquer outra influência além da sensibilização pela alta tensão impulsiva proveniente da linha.

O sensor em questão é baseado na tecnologia de eletretos. Esta tecnologia consiste em uma nova fronteira na medição dos principais parâmetros associados a surtos em linhas de distribuição. Sua utilização é simples e de fácil aferição dos resultados. Sua natureza robusta permite que seja alocado em campo, sendo conectado à linha de distribuição por meio de um divisor de tensão. A construção de sensores de dimensões pequenas permite a fácil instalação e operação.

A proposta deste trabalho é expor todo o processo de construção do invólucro protetor do sensor, divisor de tensão capacitivo e aparato de operação em campo. As etapas consistem em projeto, construção e testes de protótipo e construção das demais unidades que constituem o escopo inicial de entrega para testes em campo. O projeto totaliza

quarenta unidades completas a serem entregues para instalação em postes de distribuição de energia.

A construção do invólucro estrutural é determinada pelo divisor e pelo elemento sensor. O conjunto invólucro e divisor determinam como o elemento sensor será alocado internamente e manobrado. Todas as partes constituintes devem trabalhar de forma eficiente, segura e ergonômica.

A aplicação da norma da International Electrotechnical Commission IEC (1996) em testes em laboratórios especializados comprova e garante a operação segura do conjunto. O *design* simples, simétrico e flexível permite fácil manobra e operação. A aplicação deste dispositivo nas redes de distribuição de energia elétrica depende da instalação de diversas unidades em uma área delimitada. Dessa forma, também foram levados em consideração os aspectos econômicos do projeto durante a fase de construção, além dos aspectos técnicos. Dentre os primeiros, tem-se a escolha de materiais e seus custos, manufatura dos componentes e o tempo de execução do projeto.

Assim, é importante destacar que este projeto compreende todas as etapas para desenvolvimento de um invólucro e divisor robusto, que operará em condições climáticas adversas. A utilização de técnicas de construção de equipamentos elétricos neste caso atende normas internacionais específicas. Finalmente, deve-se ir também de encontro ao melhor custo benefício para viabilizar a instalação destes dispositivos em uma rede de distribuição de energia elétrica.

2. Revisão Bibliográfica

O projeto realizado contou com fundamentação teórica de relevantes fontes bibliográficas. Em particular, a teoria de divisores de tensão resistivos e capacitivos foi amplamente abordada. A concepção do modelo de divisor utilizado, os principais elementos a serem considerados e as características inerentes ao circuito foram extensamente estudadas. Em cada caso foram levantadas as principais características descritas nos trabalhos de referência. Para os testes, as normas que orientam e determinam cada etapa do processo foram seguidas.

Schwab e Pagel (1972) propõem um divisor capacitivo de precisão para medição de impulsos. Uma primeira análise revela os principais problemas relativos aos divisores resistivos e capacitivos. Dentre estes, destacam-se efeitos relacionados a não linearidade do sistema divisor capacitivo, sendo causado principalmente por efeito corona, descargas de tensão pelos terminais dos componentes e efeitos térmicos. Todos estes fatores podem alterar as principais características do sistema, resultando no comportamento não linear. Ainda são indicados como principais fontes de ruído no processo de medição capacitâncias parasitas e efeito de carregamento do circuito. A solução proposta consiste na utilização de capacitores de gás comprimido conectados ao terminal de alta tensão. O *design* proposto de capacitores conectados em disco permite uma redução considerável de efeitos transitórios devido a características indutivas no terminal de baixa tensão. O casamento de impedâncias entre o terminal de baixa tensão e o cabo impede a reflexão de ondas, produzindo sinal claro e livre de qualquer efeito oscilatório.

Dawes, Thomas e Drought (1950) propõem a utilização de estruturas repetitivas pré-determinadas como divisora de tensão. Gerador e sistema de aquisição de sinais são conectados e testados por diversas topologias de circuitos contendo parâmetros de resistência, capacitância e indutância.

O trabalho de Bowdler (1973), em seu capítulo sobre divisores de tensão para aplicações em corrente alternada, expõe os principais tipos de capacitores resistivos e capacitivos, suas vantagens de operação e principais limitações.

Dharmalingan e Gururaj (1976) discutem os principais aspectos referentes a circuitos divisores de tensão capacitivos com amortecimento otimizado pelo estudo da relação entre os elementos de circuito agrupados.

Dowell e Foust (1933) apresentam o modelo do gerador de impulsos e especificam as principais formas de onda utilizadas em laboratório. Também propõem duas diferentes topologias para medição de impulsos: o divisor de resistor-capacitância e o de resistência-cabo. Propõem ainda uma normatização dos dados mensurados em laboratório a fim de padronizar medidas e propiciar uma melhor compreensão e compartilhamento dos resultados de ensaios.

Sessler¹ (1998 apud FALCONI, 2010) apresenta uma definição aprofundada sobre eletretos e suas principais aplicações.

Com relação ao elemento sensor utilizado neste trabalho, este foi introduzido por Altafim, Giacometti e Janiszewski (1992), quando introduzem o conceito de que eletretos podem ser formados por meio de tensões elétricas impulsivas; o que foi possível correlacionar a carga elétrica armazenada no material de eletreto com a tensão impulsiva ao qual ele foi exposto. Assim foi concebido o transdutor de eletreto para medição de tensões impulsivas. Os principais resultados com relação aos dados coletados em experimentos são expostos e discutidos a partir de curvas de reposta do sensor de impulso.

Nos trabalhos de Falconi, Altafim e Altafim (2013) e Falconi (2010), os autores dão sequência ao trabalho de estudo dos sensores baseados em eletreto. Uma abordagem mais profunda é feita com relação à calibração do sensor e ao método de revelação das leituras realizadas

¹ SESSLER, G.M. **Electrets**. Morgan Hill: Laplacian, 1998. v.1.

3. Projeto e construção do conjunto divisor capacitivo e invólucro

O projeto do conjunto invólucro e divisor capacitivo para medição de picos de tensão de descargas impulsivas é dividido em duas partes fundamentais. A primeira consiste exclusivamente no projeto do invólucro que armazena o elemento sensor e a respectiva estrutura do divisor capacitivo. Sua importância é destacada na Seção 3.3, que aborda todo o projeto mecânico. A análise de cada componente constituinte é exposta por meio de desenhos realizados em programas de projeto mecânico baseado em CAD (do inglês *computer aided design*). A segunda parte consiste no estudo dos diversos tipos de divisores de tensão capacitivos, englobando a avaliação de suas principais vantagens e desvantagens e técnicas de construção.

A Seção 3.5 apresenta os ensaios realizados a fim de homologar o conjunto para operar em linhas de distribuição. Detalhes de ensaios de tensão alternada aplicada e de impulso são expostos. Os resultados, consoantes com normas internacionais, realizados em laboratório acreditado, certificam o dispositivo para operação em condições de tensão e corrente acima dos limites especificados em projeto. As próximas seções descrevem cada componente constituinte do projeto, suas etapas de construção e teste.

3.1. Sensor de pico de tensão impulsiva baseado em eletreto

A determinação da intensidade e da densidade de descargas atmosféricas nas redes de distribuição é de grande importância. Com essas informações pode-se determinar a correta proteção para o sistema, bem como realizar mapeamento dos índices de descargas atmosféricas na rede. Para tal finalidade, vários métodos de medição são utilizados. Dentre estes métodos, o abordado neste trabalho refere-se ao sensor de pico de tensão baseado em eletreto.

Eletretos são materiais que possuem grande capacidade de polarização seja por meio de aprisionamento de cargas elétricas ou alinhamento de moléculas dipolares (SESSLER², 1998 apud FALCONI, 2010). Um transdutor de pico de tensão baseado em eletreto consiste em uma montagem com a qual é possível correlacionar o nível de tensão impulsiva e a

² SESSLER, G.M. *Electrets*. Morgan Hill: Laplacian, 1998. v.1.

carga elétrica armazenada no eletreto (ALTAFIM; GIACOMETTI; JANISZEWSKI, 1992). Há três configurações possíveis para a montagem do transdutor: planar, esférica e cilíndrica, sendo que a última é a que foi adotada neste trabalho.

Nesta montagem, uma película de material dielétrico, no caso Teflon FEP, tem um de seus lados metalizados e o outro não. O lado metalizado da película permanece em contato com o eletrodo planar aterrado, enquanto que o lado não metalizado permanece em contato com uma esfera metálica conectada ao outro eletrodo. Esse arranjo permite que o transdutor seja instalado entre os terminais de um gerador de impulsos, por exemplo, ou no caso do projeto em questão, aos eletrodos do divisor capacitivo, como ilustrado na Figura 1.

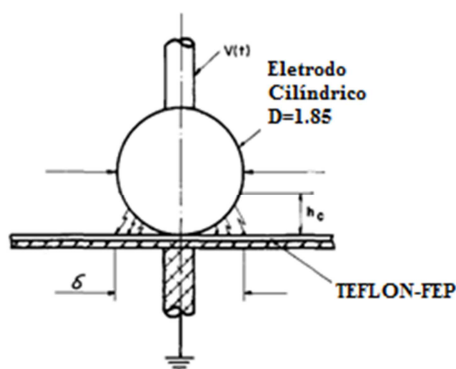


Figura 1 - Diagrama esquemático do transdutor de pico de tensão com a película de eletreto
Fonte - Altafim, Giacometti e Janiszewski (1992)

Uma vez que ocorra o impulso, há um acúmulo de cargas no terminal contendo a esfera metálica, onde são distribuídas uniformemente em padrão circular sobre a superfície do material. A marcação circular tem seu tamanho proporcional à intensidade da descarga.

A partir da medição da área carregada, pode-se determinar indiretamente o nível de tensão gerada pela descarga, representada na Figura 1 pela letra grega δ . Dentre os métodos utilizados para revelar a área carregada, destaca-se principalmente o método de revelação com pó de toner xerográfico. No artigo de Falconi, Altafim e Altafim (2013), a descrição da operação do transdutor e método de revelação do nível de tensão medido são estudados e descritos. Ainda, resultados de calibração corroboram a eficiência. Como ilustração, a película com pó de toner xerográfico é apresentada na Figura 2, com os respectivos níveis de tensão impulsiva medidos. Destaca-se a correlação entre o diâmetro da marcação e seu respectivo nível de tensão aferido.

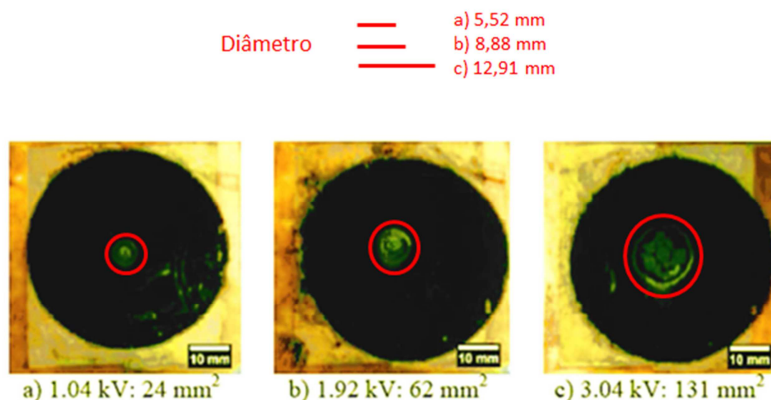


Figura 2 - Amostras de película de Teflon FEP após ensaios, com marcação por pó de toner
 Fonte - Falconi, Altafim e Altafim (2013)

3.2. Divisor Capacitivo

O divisor capacitivo tem por função reduzir o nível de tensão ao nível de operação do elemento sensor. Com impulsos da ordem de 200 kV, caso não haja uma diminuição do nível de tensão, o elemento sensor poderia ser danificado. Assim, o divisor deve operar de forma a promover uma faixa de operação adequada ao elemento sensor, sem interferir em sua precisão e exatidão. O divisor apresentado reduz o nível de tensão de um transitório impulsivo de 200 kV para aproximadamente 6 kV.

O projeto do divisor de tensão deve levar em conta principalmente, os efeitos que capacitâncias parasitas podem causar na forma de onda do circuito, particularmente na faixa de tensão aplicada no projeto. Segundo Schwab e Pagel (1972), divisores resistivos de tensão estão sujeitos a produzir modificações na forma de onda ao impulso aplicado. De acordo com o artigo, é notado um aumento no tempo de subida da onda e conseqüentemente no tempo total de resposta do circuito ao impulso. A introdução de capacitâncias em paralelo ao circuito pode minimizar estes efeitos, porém, tende a produzir um sensível efeito de carregamento do circuito. De acordo com Bowdler (1973), divisores resistivos de tensão estão limitados a 100 kV de tensão à 50 Hz de frequência.

O projeto proposto consiste então de um divisor de tensão puramente capacitivo. A medição de picos de tensão pode ser feita por divisores com um único capacitor ou com diversos capacitores associados em série. Kuffel e Zaengl (1983) destacam as qualidades de um divisor capacitivo com um único capacitor construído com gás comprimido. No entanto, a montagem de um divisor com tais características se mostra, dentre outros

problemas associados, dispendiosa. Para o projeto do divisor capacitivo apresentado, a topologia de um divisor puramente capacitivo com diversos capacitores associados em série mostra-se a mais adequada.

Tais divisores estão limitados a perdas principalmente por efeitos indutivos da linha e pelas perdas no dielétrico (BOWDLER, 1973). No nível de tensão de 25 kV e 60 Hz de frequência em corrente alternada a ser operado pelo dispositivo, e operando com impulsos da ordem de 200 kV, tais perdas podem ser desconsideradas do projeto. Com relação aos efeitos oscilatórios devido às indutâncias do circuito, Schwab e Pagel (1972) apresentam um divisor de corrente capacitivo no circuito de baixa tensão. Dawes, Thomas e Drought (1950) apresentam resultados satisfatórios em estudos com redes pré-estabelecidas de elementos de circuito associados em diversas configurações. Embora seja possível atenuar a oscilação sobreposta ao sinal do impulso, tal topologia se apresenta extremamente dispendiosa e com calibração dos parâmetros do circuito de difícil execução para o projeto em questão.

A topologia mais adequada ao projeto consiste então no divisor de corrente capacitivo que constitui o circuito de baixa tensão. Quando submetido ao impulso de tensão, tal arranjo opera como filtro reduzindo as oscilações sobrepostas ao sinal obtido. Tal montagem, proposta por Schwab e Pagel (1972) pode ser vista na Figura 3.

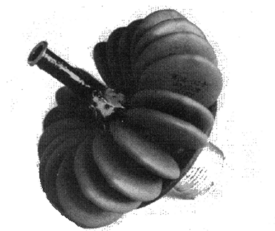


Figura 3 - Terminal de baixa tensão com capacitores em paralelo
Fonte - Schwab e Pagel (1972)

O circuito capacitivo construído é apresentado na Figura 4. O circuito consiste de vinte capacitores associados em série, configurando o circuito de alta tensão do divisor. Abaixo conectado está o circuito de baixa tensão, consistindo de dois capacitores associados em paralelo, conforme proposto anteriormente, inserido dentro do invólucro.

Associado em paralelo ao circuito de baixa tensão está o circuito constituído pelo cilindro metálico mais a película de Teflon FEP.

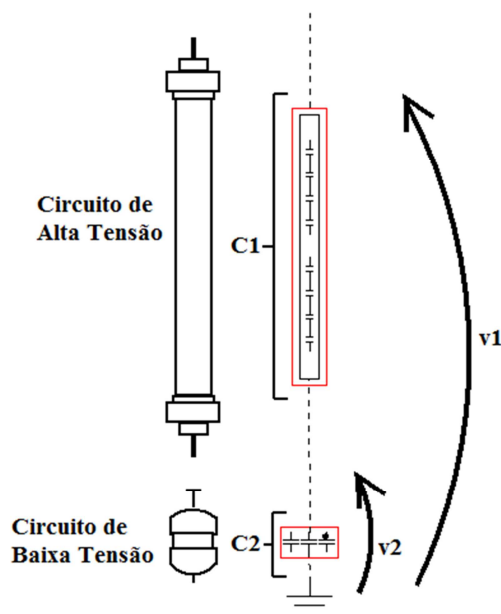


Figura 4 – Diagrama esquemático do divisor capacitivo e invólucro

A primeira montagem foi realizada com capacitores de 15 kV e 1 nF de capacitância para realização de ensaios preliminares. Os vinte capacitores foram afixados em uma placa de acrílico, com seus terminais soldados. A montagem final foi realizada com capacitores de 30 kV e 1 nF de capacitância. Sua operação se dará em linhas de distribuição de 25 kV e 60 Hz de frequência. A seguir é apresentado o projeto do divisor capacitivo. O valor da capacitância C_1 é:

$$C_1 = \frac{1}{20} \text{ nF} = 0,05 \text{ nF} \quad (1)$$

O valor da capacitância C_2 do circuito de baixa tensão é:

$$C_2 = 2 \text{ nF} \quad (2)$$

A equação que determina a relação de divisão entre a queda de tensão v_1 do conjunto e a queda de tensão v_2 do circuito de baixa tensão do sistema é:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (3)$$

A relação de transformação é:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{41} \quad (4)$$

A relação de divisão obtida com este divisor é então de 1:41. Tal resultado evidencia a relação de divisão da tensão impulsiva de 200 kV para a faixa de operação do sensor que é de até aproximadamente 6 kV.

3.3. Projeto Mecânico

O projeto mecânico necessita de um software que permita a utilização de elementos tridimensionais para elaboração do *layout* básico da estrutura. A utilização de um *computer aided design* (CAD) tridimensional permite não somente que o resultado do projeto seja visualizado ao longo da etapa de construção, mas também a realização de rápidas alterações no projeto que possam acontecer ao longo de seu desenvolvimento.

O software em questão é o Autodesk Inventor 2012, que permite a utilização de uma base CAD, como o AutoCAD, aliados a uma poderosa interface de desenvolvimento em três dimensões. O conjunto de ferramentas e o dinamismo computacional do programa foram decisivos na escolha deste para a elaboração dos desenhos mecânicos. Há ainda a possibilidade de conversão do modelo tridimensional em vistas isométricas, e principalmente na planificação, permitindo a adição de cotas e notas para a manufatura dos componentes.

O primeiro modelo de divisor proposto consistia de uma estrutura tubular de PVC com as extremidades seladas hermeticamente com cola de PVC e dois parafusos de latão, sendo um em cada extremidade para fixação de componentes e operação como eletrodos. No interior da construção seria alojada a placa de acrílico com os capacitores soldados em uma configuração paralela. Na extremidade inferior fixou-se um gancho com formato de presilha para que este pudesse segurar o invólucro do sensor a ser fixado.

Inicialmente utilizou-se material cerâmico para a confecção do invólucro. No entanto, a construção com este material se mostrou dificultosa devido principalmente à indisponibilidade no mercado de peças com as dimensões necessárias para o alojamento do elemento sensor, além do elevado custo das peças disponíveis. Tão logo esse problema foi detectado, foi sugerida uma nova opção de material, mais versátil, resistente e de baixo custo, que permite ser trabalhado com maior facilidade. Assim utilizou-se para construção do invólucro terminações de tubulação de PVC e um tubo central constituído de duas roscas simétricas equidistantes que age como corpo do invólucro. As tampas roscadas fixadas nas extremidades do tubo garantem a estanqueidade. Esta montagem permite ainda a fixação de elementos como presilhas, cruzetas, ou qualquer outro elemento que possa funcionar como eletrodo ou ponto de fixação. A Figura 5 mostra uma foto em perfil do divisor instalado em uma cruzeta, pronto para realização dos ensaios no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE-USP).



Figura 5 - Divisor capacitivo blindado em cruzeta de madeira para ensaio

A Figura 6 mostra o divisor capacitivo com o invólucro acoplado à presilha inferior para realização de testes de tensão senoidal aplicada e impulso.



Figura 6 - Divisor capacitivo com invólucro acoplado em presilha

Uma das principais limitações com relação a este tipo de projeto era o fato de o invólucro permanecer suspenso por uma simples cruzeta pela presilha do tubo de PVC. A exposição do invólucro ao sol poderia acelerar seu processo de degradação, promovendo o envelhecimento do material tornando-o quebradiço. Em condições climáticas desfavoráveis a estanqueidade da cápsula poderia ser comprometida. Além disso, ventos fortes, bem como objetos que pudessem eventualmente atingir o invólucro, poderiam danificá-lo permanentemente ou ainda derrubá-lo, inviabilizando as medidas.

Outro fator importante a ser levado em consideração é a operação em campo do sistema. A cápsula tem por função não somente fornecer proteção ao sensor, mas também permitir que este possa ser facilmente substituído por outro após ter sido sensibilizado por uma descarga atmosférica. A presilha de cobre ofereceu um modo de fixação do invólucro com relativa facilidade ao encaixe, porém a operação de retirada da cápsula mostrou-se difícil. Outro fator inviabilizador é o fato de o cobre perder sua memória elástica após poucas manobras, adicionando folgas ao encaixe e comprometendo o acoplamento do invólucro.

Embora a montagem inicial apresentasse os problemas citados anteriormente, ela apresentou uma configuração interessante para o acoplamento do invólucro ao longo dos

ensaios, apresentando boa estanqueidade. Com o sucesso apresentado nos ensaios, um novo projeto foi elaborado, visando melhorar o acoplamento das partes e a ergonomia.

A solução proposta foi o desenvolvimento de um abrigo que pudesse prover a proteção necessária ao invólucro e fixá-lo de forma a facilitar as substituições. Um simples movimento de encaixe em uma única direção e o invólucro seria acoplado ao abrigo e retirado para manutenção do sensor. O abrigo consiste de um tubo de PVC maior e mais robusto, de diâmetro ligeiramente maior que o do invólucro. Em seu interior é fixada uma mola feita a partir de chapa de PVC moldada em formato de foice, flexível o suficiente para permitir que o material trabalhe conforme o invólucro é inserido. O excursionamento da mola prende o invólucro contra a parede do tubo, fixando-o. Com a utilização do Autodesk Inventor, foi realizado um modelo tridimensional de todo o conjunto.

Na vista isométrica apresentada na Figura 7, pode-se destacar as duas tampas roscadas, que são fixadas à estrutura tubular. Acima, tem-se o eletrodo superior do invólucro conectado a alta tensão, ao centro o anel de latão que reveste toda a estrutura do tubo, funcionando como eletrodo inferior do invólucro, conectado ao terra do sistema. Na extremidade inferior, a estrutura de alumínio com cruzeta de latão permite o fácil encaixe e fixação de uma vara de manobra, para instalação ou retirada do sensor em campo.

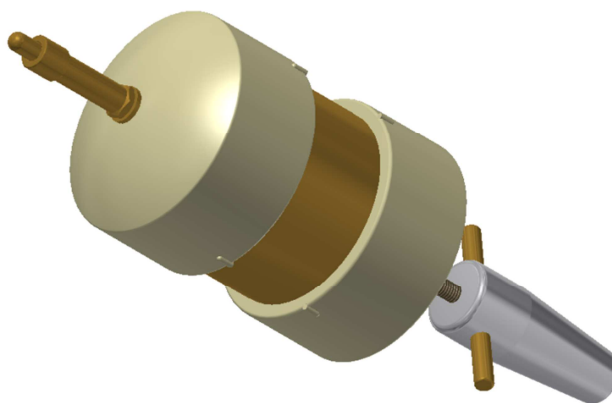


Figura 7 - Invólucro em vista isométrica

A Figura 8 apresenta o tubo roscado, que constitui o corpo principal do invólucro, onde as duas tampas são rosqueadas.



Figura 8 - Tubo roscado

Na Figura 9 tem-se a vista explodida do eletrodo superior do invólucro. Em seu projeto foi previsto a construção de uma estrutura com rosca para fixação na tampa de PVC e uma câmara para alojar uma mola. Esta última permite que o pino de contato do eletrodo possa ser excursionado livremente, garantindo contato elétrico e um encaixe preciso do invólucro dentro do abrigo.



Figura 9 - Vista explodida do eletrodo superior do invólucro

A Figura 10 apresenta o cone de alumínio que permite que o operador consiga um rápido e fácil encaixe da vara de manobra ao corpo do invólucro. Após o encaixe, com um movimento de giro, a vara pode ser travada na cruzeta de latão, permitindo que o invólucro seja puxado para fora do abrigo. O cone com cruzeta é fixado no eletrodo inferior e aterrado ao anel de latão com uma fita de latão. O aterramento ao poste será descrito posteriormente, conforme outros componentes do projeto forem apresentados.

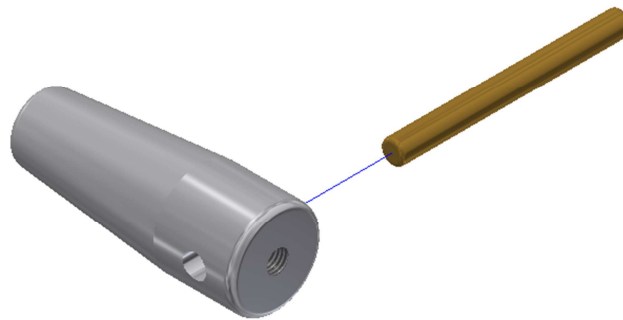


Figura 10 - Cone e cruzeta para encaixe

O elemento que permite a proteção do invólucro, permitindo que este fique estável e protegido de intempéries está exposto na Figura 11. Ele consiste de um tubo de PVC rígido, com comprimento suficiente para encobrir todo o invólucro e diâmetro que permita que este permaneça bem fixado pela atuação da mola de PVC interna, porém ainda permitindo que o operador possa encaixá-lo com facilidade no interior do abrigo com a vara de manobra. Na parte superior do tubo, uma tampa de PVC reveste o conjunto vedando a abertura do tubo e fornecendo uma base para encaixe do divisor capacitivo logo acima.

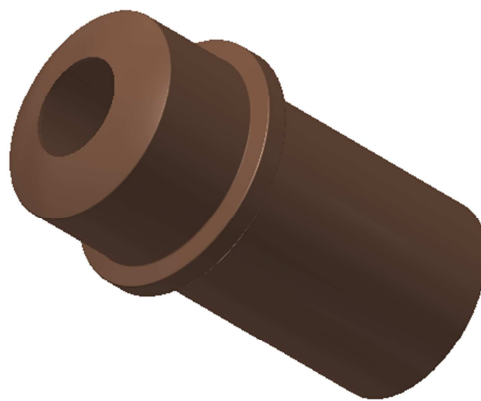


Figura 11 - Conjunto abrigo do invólucro

O elemento que permite a fixação do invólucro no interior do tubo do abrigo consiste de uma mola de PVC, conforme mostrado na Figura 12. Uma chapa de PVC aquecida e moldada no formato de foice permite que o material trabalhe suavemente quando o invólucro é introduzido no interior do tubo. A mola pressiona o invólucro contra

a parede do tubo, fixando-o por atrito, e possui sua superfície superior revestida por uma fina chapa de latão flexível. O latão se deforma junto com a mola de PVC sem interferir em seu movimento, e propiciando contato elétrico com o anel de latão do invólucro. Na base da mola, dois furos permitem que esta seja fixada ao corpo do tubo do abrigo por dois rebites.

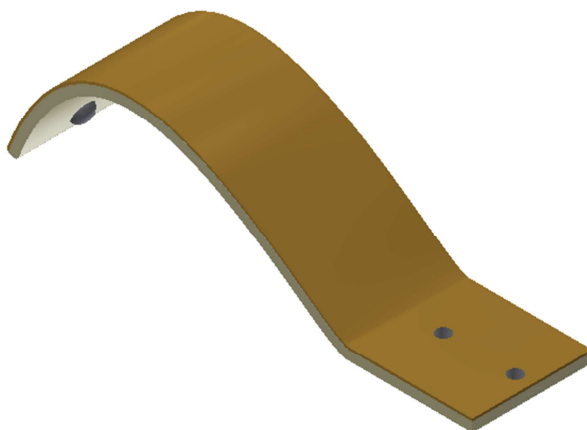


Figura 12 - Mola de PVC com revestimento de chapa de latão

Na tampa do tubo do abrigo, um anel de alumínio realiza o contato elétrico entre o eletrodo inferior do divisor capacitivo e o eletrodo superior do invólucro, como apresentado na Figura 13.

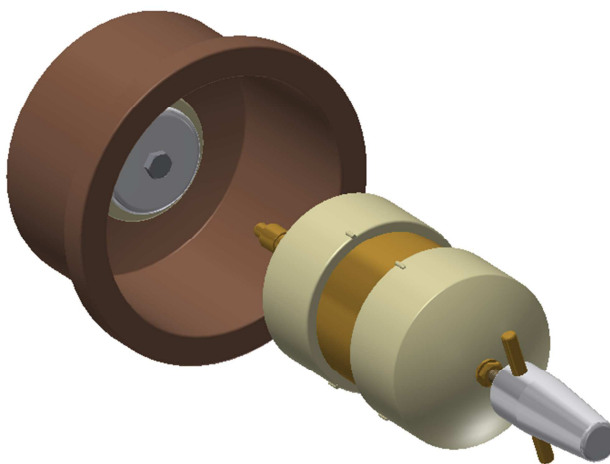


Figura 13 - Perspectiva de encaixe e contato do invólucro ao terminal de baixa tensão do divisor

O tubo do circuito capacitivo montado na tampa do abrigo está apresentado na Figura 14. A fixação ocorre pelo atrito deste com a parede da tampa e com a aplicação de cola própria para uso em materiais de PVC. A vedação entre a tampa e o tubo do circuito

capacitivo é feita com silicone. O tubo, feito de PVC, permite o fácil encaixe das tampas e a fixação de parafusos que operam como eletrodos. No interior, é instalada a placa acrílica com capacitores.

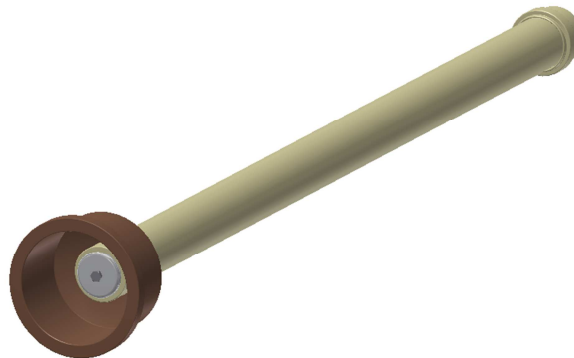


Figura 14 - Tubo do conjunto divisor capacitivo e tampa do abrigo

O aterramento é feito por um prensa cabo de latão, fixada do lado externo do tubo de PVC do abrigo por dois rebites, conforme Figura 15. Esta estrutura realiza contato elétrico com a superfície de latão da mola de PVC, promovendo o aterramento do conjunto.



Figura 15 - Prensa cabo de aterramento com parafuso fixador

O equipamento completo está apresentado na Figura 16. Saias de material plástico foram adicionadas para evitar a formação de caminhos de água enquanto o sensor estiver exposto à chuva.

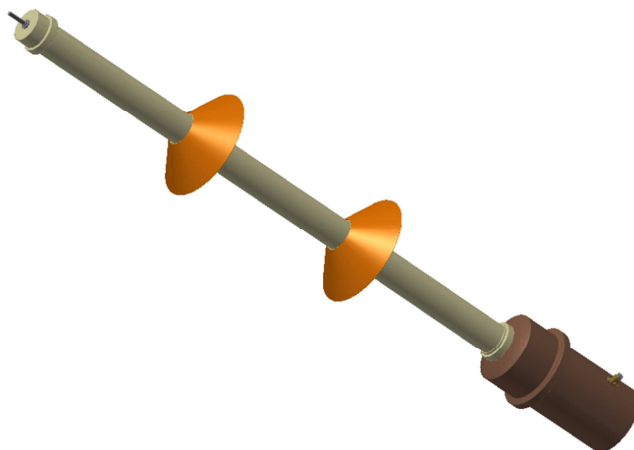


Figura 16 - Conjunto divisor capacitivo e abrigo completo

A Figura 17 apresenta uma perspectiva do encaixe da placa de capacitores dentro do tubo de PVC.

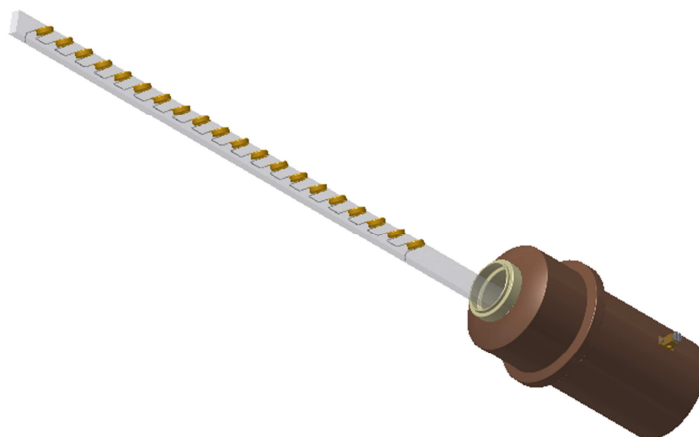


Figura 17 - Perspectiva de encaixe da placa capacitiva no interior do tubo

Na Figura 18 tem-se o detalhe da conexão e contato elétrico do prensa cabo com a mola de PVC e chapa de latão.

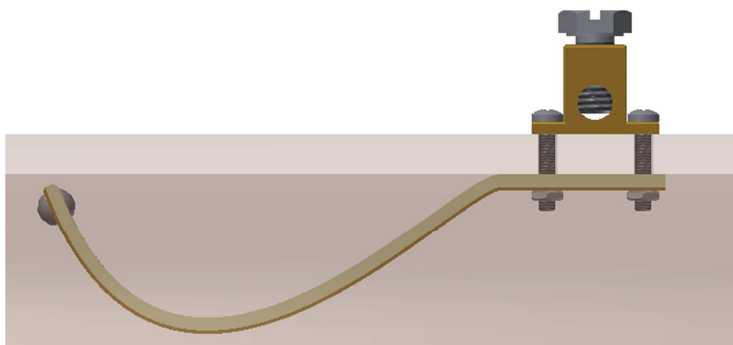


Figura 18 - Conexão do prensa cabo à mola de PVC com chapa de latão

3.4. Projeto Elétrico

O divisor capacitivo empregado neste trabalho consiste basicamente de uma placa de acrílico com perfurações ao longo de seu comprimento para encaixe dos capacitores. Foram afixados vinte capacitores com especificações de 15 kV e 1 nF de capacitância conforme Figura 19. Os furos foram feitos paralelos um ao outro conforme configuração apresentada na Figura 20. Inicialmente, cada terminal do capacitor foi soldado ao terminal do capacitor adjacente em um circuito de associação série, com os capacitores alinhados de forma paralela. Em ensaios de impulso de tensão realizados no IEE-USP, esta configuração apresentou ruptura de arco entre os terminais de cada capacitor.



Figura 19 - Capacitor de 1nF e 15kV



Figura 20 - Divisor capacitivo com capacitores alinhados paralelamente

A nova configuração proposta, ilustrada na Figura 21, na qual os capacitores são dispostos de maneira oblíqua sobre a placa acrílica, permite um maior espaçamento de ar entre os terminais de dois capacitores adjacentes. Em ensaios posteriores, esta configuração se mostrou adequada para o ensaio de impulso de tensão em 200 kV.

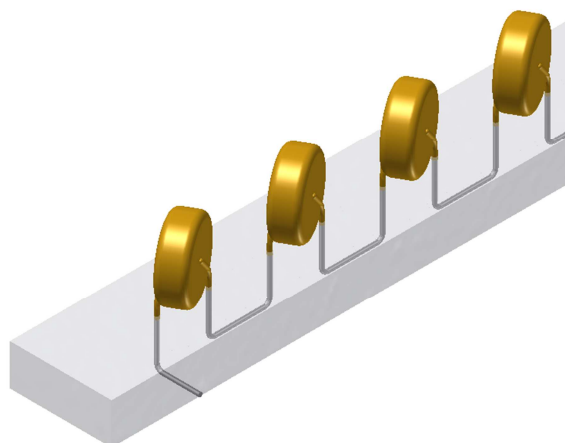


Figura 21 – Capacitores alinhados de forma oblíqua

Com a distribuição dos capacitores determinada, o projeto definitivo da placa de capacitores foi desenvolvido. Após o uso dos capacitores especificados anteriormente, com o objetivo de estabelecer um protótipo do divisor para ensaios, definiu-se os capacitores utilizados no projeto final. O desempenho satisfatório obtido nos ensaios com os capacitores de 15 kV e 1 nF justificaram a escolha dos capacitores cerâmicos utilizados. Destaca-se ainda a robustez deste tipo de elemento, sua facilidade em ser encontrado no mercado e seu baixo custo se comparado a capacitores de outro tipo, ou especificados em outra faixa de capacitância. A fim de garantir um desempenho superior ao circuito e conferir maior segurança ao projeto, as especificações do capacitor utilizado no projeto final do divisor são de 30 kV de tensão de operação e capacitância de 1 nF, conforme Figura 22.



Figura 22 - Capacitor de 1nF e 30kV

3.5. Ensaios

A montagem inicial, apresentada na Figura 5, se mostrou bastante simples, permitindo a realização de teste de suportabilidade à tensão senoidal sob chuva e teste de impulso de tensão. Ambos os testes estão descritos na norma da International Electrotechnical Commission IEC (1996), que estabelece os procedimentos e condições necessárias à realização de ensaios em equipamentos de alta tensão.

O primeiro ensaio realizado foi o de operação sob chuva à tensão senoidal. Este ensaio tem por objetivo verificar o nível de isolamento da blindagem do divisor capacitivo em condições de chuva. Aplicou-se tensão de 30 kV senoidal na frequência de 60 Hz durante 60 segundos, a fim de testar o isolamento do material nas condições descritas. A Figura 23 ilustra as condições específicas as quais o ensaio foi realizado.



Figura 23 - Ensaio de tensão senoidal aplicada, com o sensor submetido à simulação de chuva

A montagem foi afixada em cruzeta de madeira, com os seus terminais conectados ao gerador de alta tensão. O dispositivo para simulação de chuva é então acionado. O bocal do dispositivo de aspersão é projetado de forma a espalhar gotículas de água com diâmetros específicos, sem que estas formem uma neblina ao redor da superfície da montagem. Com o auxílio de um medidor pluviométrico, os níveis de precipitação em suas componentes vertical e horizontal foram medidos, conforme Figura 24. Esta medição permite adequar a vazão da bomba e a abertura dos bocais de modo que os valores de precipitação estejam dentro daqueles estabelecidos pela norma IEC (1996). Neste ensaio o divisor capacitivo foi aprovado pela equipe técnica do IEE-USP, não havendo condução entre os dois terminais pela blindagem.

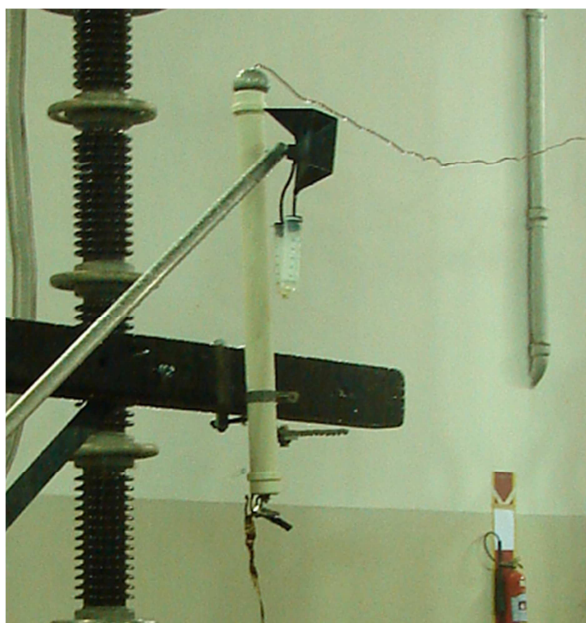


Figura 24 - Medição dos índices pluviométricos em suas componentes vertical e horizontal

A Tabela 1 ilustra as condições de simulação de chuva em que o ensaio foi realizado. Cada parâmetro medido está de acordo com o especificado pela norma, atendendo os requisitos para homologação de equipamentos utilizados em alta tensão.

Tabela 1 - Condições do ensaio de tensão alternada aplicada

Data	Componente Vertical de precipitação	Componente Horizontal de precipitação	Condutividade elétrica da água	Resistividade elétrica da água
18/12/2012	2.0 mm/min	1.2 mm/min	1.52 uS/m	107.0 Ω /m

O segundo ensaio consiste na aplicação de uma tensão impulsiva de 200 kV de pico. O objetivo é testar a suportabilidade da placa capacitiva às condições de impulso de tensão. O conjunto divisor capacitivo, com capacitores alinhados em paralelo (Figura 20), e invólucro, é conectado ao gerador de impulso. O valor do pico de tensão configurado no gerador é elevado gradualmente, em passos de 20 kV, até que a tensão de operação do sistema, definida no projeto, seja atingida. A montagem pode ser vista na Figura 6, com o divisor capacitivo conectado ao circuito gerador de impulso de tensão.

Como destacado anteriormente na Seção 3.3, esta montagem contribuiu significativamente para a evolução do projeto. Assim, o novo modelo de divisor e invólucro

foi construído. Nos laboratórios do IEE-USP, foram novamente realizados os ensaios de tensão senoidal sob chuva e impulso de tensão. A Figura 25 ilustra o conjunto instalado em cruzeta para ensaio de impulso de tensão do divisor capacitivo com capacitores alinhados de forma oblíqua (Figura 21). Os dados referentes ao tipo de gerador utilizado, bem como condições atmosféricas gerais do ensaio, podem ser encontrados no laudo do Anexo II. Neste ensaio, o projeto foi aprovado pela equipe técnica do IEE-USP, não havendo rompimento de arco entre os terminais dos capacitores.



Figura 25 - Divisor capacitivo e invólucro em ensaio de impulso de tensão

Na Figura 26 tem-se o conjunto finalizado montado em cruzeta para novo ensaio de tensão alternada sob simulação de chuva. O equipamento para simulação de chuva foi calibrado conforme especificações da norma IEC (1996), seguindo o mesmo procedimento descrito no ensaio do primeiro conjunto. Foi aplicado no conjunto uma tensão alternada de 50 kV em 60 Hz de frequência. As informações referentes aos equipamentos utilizados no ensaio e as condições atmosféricas gerais podem ser encontradas no Anexo I. Neste ensaio, o projeto também foi aprovado pela equipe técnica.



Figura 26 - Ensaio de tensão alternada sob simulação de chuva no conjunto definitivo

O último ensaio foi realizado no Laboratório de Alta Tensão da Escola de Engenharia de São Carlos (LATM-EESC). O capacitor de 30 kV e 1nF utilizado no projeto foi submetido a um teste de tensão de corrente contínua e medição do valor de capacitância. O ensaio tem por principal objetivo aferir as especificações de fábrica do capacitor. A Figura 27 mostra esquematicamente o circuito utilizado no ensaio de tensão contínua do capacitor.

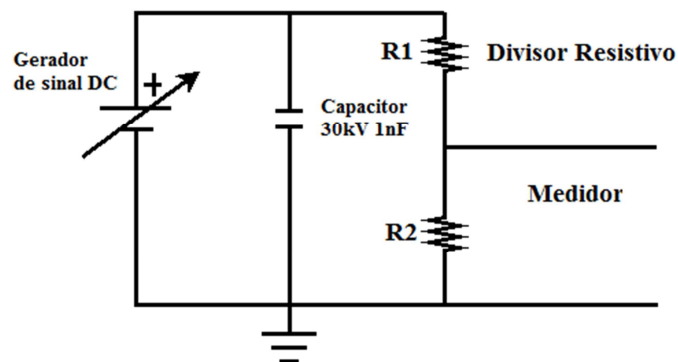


Figura 27 - Circuito de ensaio do capacitor 30kV e 1 nF

Os equipamentos utilizados para ensaio do capacitor de 30 kV e 1 nF e os dados atmosféricos estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - Equipamentos utilizados na medição e resultados do ensaio do capacitor de 30 kV e 1 nF

Data	Medidor LCR	Gerador de sinal DC e medidor	Capacitância
10/09/2013	HP Digital Measuring Instrument DMI 551	Hipotronics Model HD 100	1nF±0.05
Temperatura	Humidade	R1	R2
26°C	43%	280MΩ	15kΩ

4. Resultados

O ensaio de suportabilidade à tensão impulsiva realizado com o conjunto invólucro-divisor de tensão, sendo o divisor de tensão montado com os capacitores alinhados em paralelo (Figura 20), gerou os gráficos mostrados nas Figuras 28 e 29. A Figura 28 apresenta a forma de onda da tensão impulsiva com pico de 150 kV, suportada pelo divisor capacitivo sem ocorrência de arco elétrico entre os terminais dos capacitores.

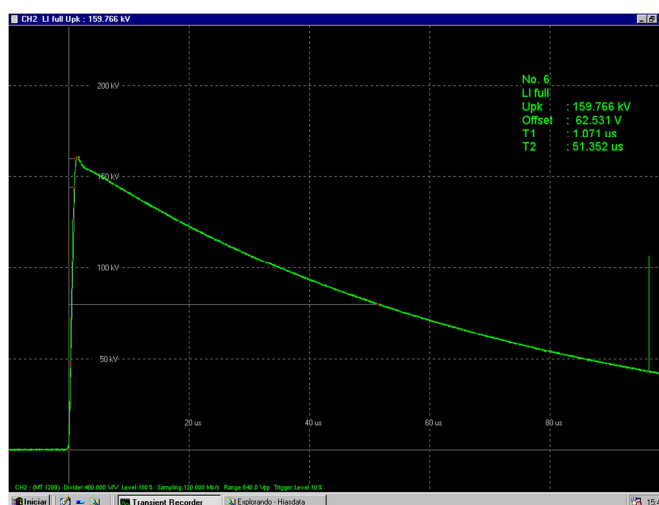


Figura 28 - Gráfico do ensaio de impulso de tensão em 150 kV do divisor com capacitores dispostos de forma paralela

No entanto, com a tensão de pico sendo aumentada gradualmente, conforme descrito na Seção 3.5, página 39, à 200 kV a rigidez dielétrica do ar ao redor dos terminais de cada capacitor foi rompida, como pode ser visualizado na Figura 29.

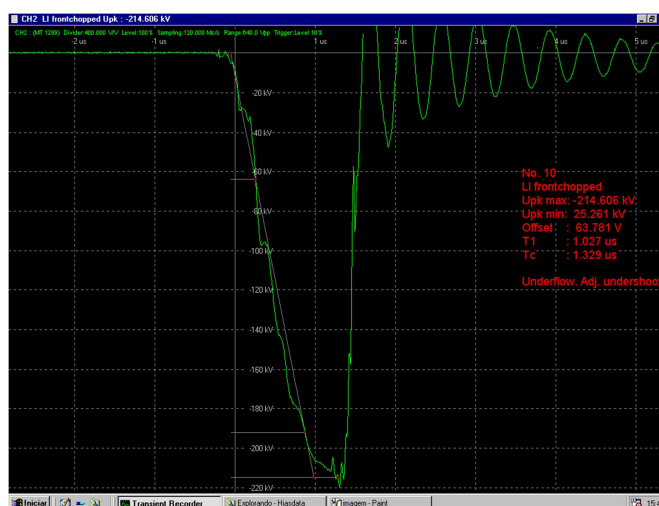


Figura 29 - Gráfico do ensaio de impulso de tensão em 200 kV do divisor com capacitores dispostos de forma paralela

Como solução proposta, os capacitores foram redistribuídos conforme apresentado no desenho da Figura 21 (capacitores alinhados em configuração oblíqua). A nova disposição dos capacitores na placa mostrou-se eficaz, suportando um pico de tensão de 200 kV, de acordo com as especificações do projeto. A Figura 30 ilustra a forma de onda do ensaio com o divisor capacitivo.

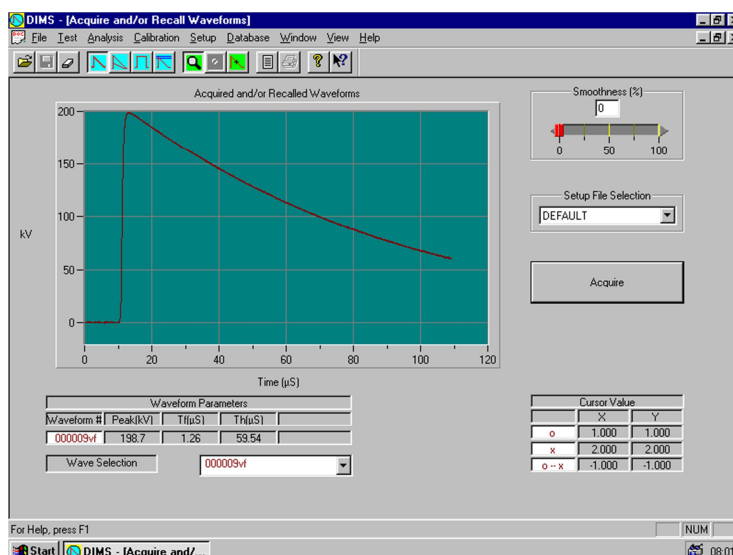


Figura 30 - Ensaio de impulso de tensão de 200 kV com capacitores dispostos de forma oblíqua sobre a placa

A Figura 31 apresenta a última versão do divisor capacitivo durante ensaio de suportabilidade ao impulso. Os resultados são expostos no Anexo II.

O ensaio de suportabilidade à tensão alternada sob simulação de chuva foi realizado com tensão de 50 kV. Os resultados obtidos estão expostos no Anexo I.



Figura 31 - Divisor capacitivo finalizado com eletrodo de alta tensão conectado ao gerador de sinais

Na Figura 32 tem-se o aterramento do divisor para realização dos ensaios, com seu terminal de baixa tensão conectado ao terra pelo prensa cabo.



Figura 32 - Aterramento do divisor feito pelo prensa cabo conectado ao invólucro

Finalmente, o ensaio do capacitor de 30 kV e 1 nF (Figura 22) utilizado na montagem do divisor capacitivo foi realizado no LATM-EESC. O resultado final do ensaio foi rompimento de arco elétrico pelos terminais do capacitor com uma tensão de 15 kV corrente contínua.

Como resultado final do desenvolvimento do projeto, todos os quarenta divisores capacitivos e invólucros construídos a serem instalados na rede de distribuição estão mostrados nas figuras seguintes. Na Figura 33 são apresentadas quarenta placas de acrílico com capacitores de 1nF e 30 kV soldados em associação série. Estas placas posteriormente são alocadas no interior dos tubos do divisor capacitivo. Os terminais dos capacitores nas extremidades de cada placa são conectados aos eletrodos do divisor.

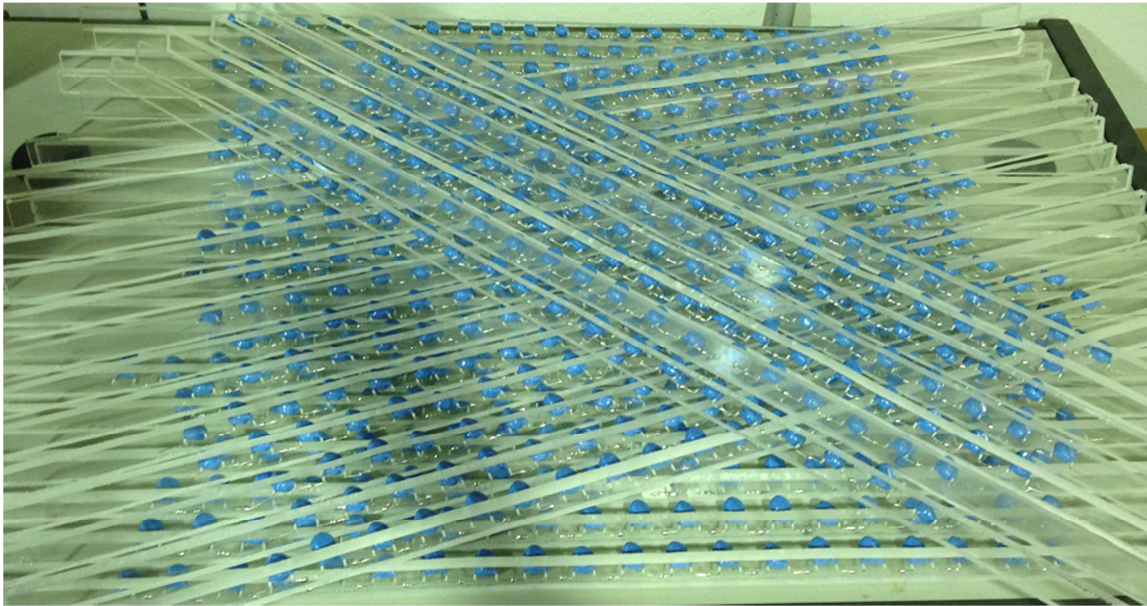


Figura 33 - Quarenta placas de acrílico com capacitores soldados em série

A Figura 34 apresenta quarenta unidades do invólucro para o elemento sensor, consoantes com os desenhos tridimensionais.



Figura 34 - Quarenta unidades de invólucro construídas de acordo com as especificações do projeto

Na Figura 35, quarenta unidades de divisores capacitivos enfileirados são expostos. Destacam-se as saias plásticas para evitar a formação de caminhos de água, o abrigo onde os invólucros são inseridos e o prensa cabo fixado em cada divisor.

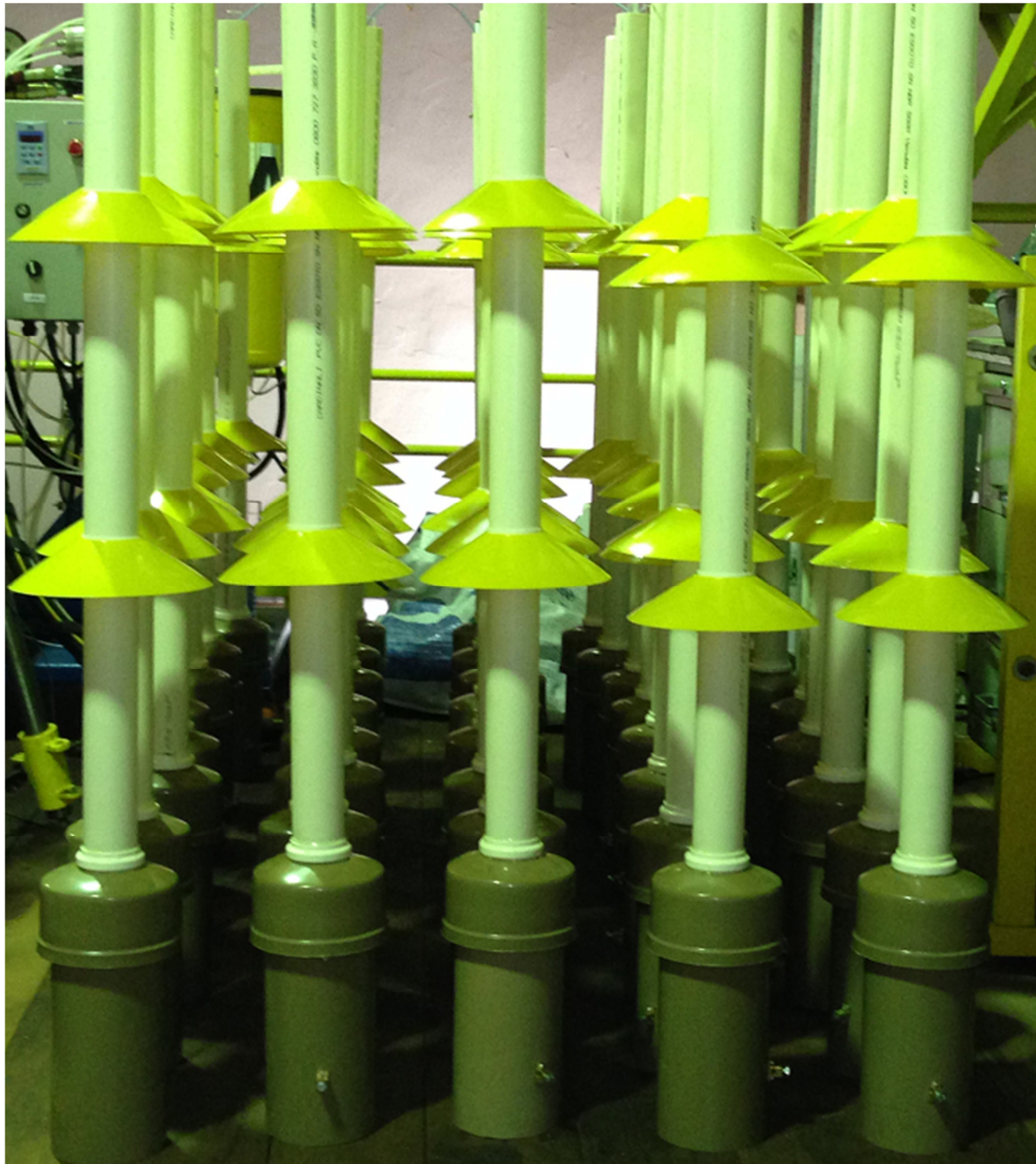


Figura 35 - Quarenta unidades de divisores capacitivos construídos

A Figura 36 destaca o prensa cabo para aterramento do sistema. Esta peça possui um orifício para passagem do cabo de aterramento e parafuso para fixação. Em sua base, dois rebites que atravessam o tubo do abrigo fixam o prensa cabo à estrutura. Estes rebites fixam a mola de PVC ao conjunto pela parte interna do abrigo.

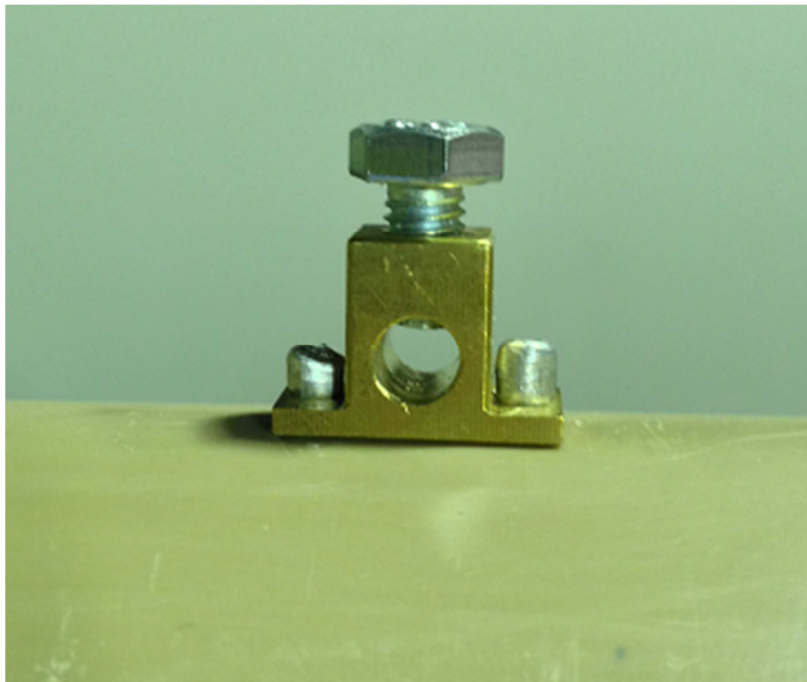


Figura 36 - Prensa cabo para aterramento

A Figura 37 evidencia a mola feita a partir de chapa de PVC moldada, revestida com chapa de latão, para promover o contato elétrico com o anel de latão do invólucro. Sua fixação se dá pelos dois rebites que atravessam o tubo do abrigo e se fixam ao prensa cabo. Ao fundo o disco de alumínio fixado ao eletrodo inferior do divisor capacitivo.



Figura 37 - Detalhe da mola de PVC com revestimento de chapa de latão fixada ao prensa cabo

A Figura 38 ilustra o invólucro do elemento sensor em perfil com o cone de alumínio e o eletrodo superior fixados. A estreita cinta de chapa de latão que percorre a

tampa de PVC promove o contato elétrico entre o eletrodo inferior do invólucro e o anel de latão.

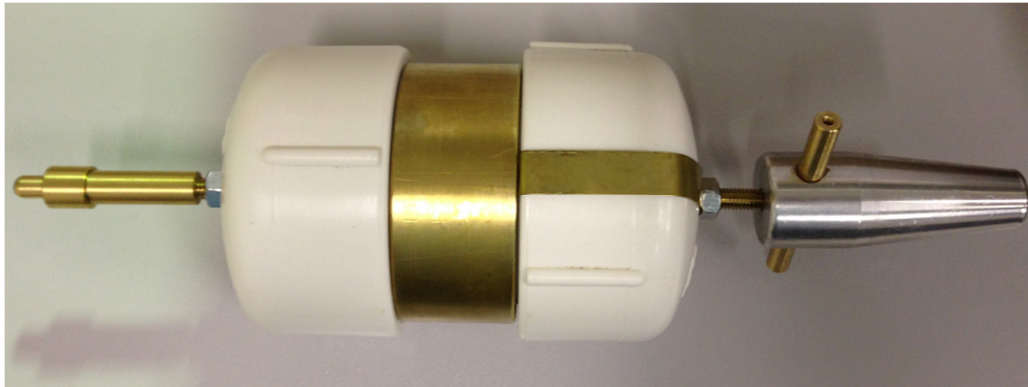


Figura 38 - Perfil do invólucro

A Figura 39 exibe a extremidade da haste de manobra para inserção do invólucro dentro do abrigo. O cone de alumínio permite um fácil encaixe, enquanto a cruzeta permite que o invólucro permaneça fixado à haste enquanto conduzido pelo operador.



Figura 39 - Detalhe da haste de manobra do invólucro para fixação dentro do abrigo

Na Figura 40 o invólucro é fixado à haste de manobra. O conjunto permite uma fácil operação por equipes de campo para inserção e retirada do invólucro com o sensor em seu interior. Uma fácil operação é de extrema importância, pois permite que a leitura do nível de tensão medido possa ser rapidamente aferida.



Figura 40 - Invólucro fixado à haste de manobra

5. Conclusão

O projeto do invólucro e a montagem do divisor capacitivo atenderam as expectativas com relação à operação nos testes realizados no IEE-USP, um instituto especializado, que segue o padrão internacional para realização de ensaios em equipamentos de alta tensão. O invólucro, bem como a estrutura de abrigo fornecida pelo divisor, oferece proteção ao sensor de eletreto contra infiltrações de água, além de contribuir para uma maior durabilidade do mesmo contra os efeitos da radiação ultravioleta. A maior vantagem na aplicação deste sistema, porém, consiste no fato de permitir que o invólucro seja instalado e retirado sem dificuldades por um operador com uma vara de manobra apropriada. O desenho simples e robusto da cruzeta e do cone de alumínio permite o encaixe da vara de manobra sem grandes esforços. O formato da mola de PVC permite uma acomodação segura do invólucro dentro da estrutura. O sistema construído pode ser instalado em redes de distribuição de energia elétrica para medição dos picos de tensão induzida por descargas atmosféricas. Todas as etapas referentes ao desenvolvimento de um projeto foram contempladas, permitindo a construção de sensores de baixo custo dentro de um prazo estipulado.

Referências

ALTAFIM, R. A. C.; GIACOMETTI, J. A.; JANISZEWSKI, J. M. An Electret transducer for impulse voltage measurements. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 28, n. 5, p. 1217-1222, Sept./Oct. 1992.

BOWDLER, G. W. Voltage dividers. In:_____. **Measurement in high-voltage test circuits**. Oxford: Pergamon Press, 1973. Cap. 2, p. 11-40. (International Series of Monographs in Electrical Engineering, 5).

DAWES, C. L.; THOMAS, C. H.; DROUGHT, A. B. The Measurement of impulse voltages by repeated structure networks. **Electrical Engineering**, New York, v. 69, n. 8, p. 673-677, Aug. 1950.

DHARMALINGAN, K.; GURURAJ, B. I. Step response of optimally damped EHV capacitive dividers. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-95, n. 6, p. 1777-1785, Nov./Dec. 1976.

DOWELL, J. C.; FOUST, C. M. Laboratory measurement of impulsive voltages. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York, v. 52, n. 2, p. 537-543, June 1933.

FALCONI, D. R. **Sensor piezelétrico baseado na tecnologia dos eletretos termo-formados**: aprimoramentos dos processos de produção. 2010. Dissertação (Mestrado em Processamento de Sinais de Instrumentação) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18152/tde-20042010-095926/>>. Acesso em: 25 set. 2013.

FALCONI, D. R.; ALTAFIM, R. A. P.; ALTAFIM, R. A. C. Impulse voltage sensor based on electret technology. In: SPANISH-PORTUGUESE CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 13., Valencia, 2013. Disponível em: <<http://www.aedie.org/papers-3.html>>. Acesso em: 10 Sept. 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **60060-2**: High-voltage test techniques. Geneve, 1996.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S. Measurement of high voltages. In:_____. High voltage engineering fundamentlas. Oxford: Pergamon, 1983. Cap. 3, p. 88-206.

SCHWAB, A. J.; PAGEL, J. H. W. Precision capacitive voltage divider for impulse voltage measurements. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-91, n. 6, p. 2376-2382, Nov. 1972.

Anexos

I - Relatório de ensaio de tensão senoidal aplicada no conjunto divisor capacitivo e invólucro


USP		UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA Nº SEÇÃO TÉCNICA DE ALTA TENSÃO		NÚMERO DE OS FOLHA	
ENSAIO DE TENSÃO SUPOSTÁVEL EM 60 Hz					
<input type="checkbox"/> À SECO <input checked="" type="checkbox"/> SOB CHUVA					
NORMA / PROCEDIMENTO:			DATA: 10/05/2013		
CORPO DE PROVA: DIV. CAPAC / INVOLUCRO PINTADO					
DISTÂNCIAS DE ARCO: BASE ATERRADA: m			BASE FLUTUANTE: m		
Condições ambientais: Ts= 18,6 °C Tu= 15,0 °C P= 207 mmHg					
Sistema medição c.a.: <input checked="" type="checkbox"/> MT1623 <input type="checkbox"/> MT1555					
Paicrômetro: <input checked="" type="checkbox"/> MT460		Barômetro: <input checked="" type="checkbox"/> MT451		Pluviômetro: <input checked="" type="checkbox"/> MT1686	
Cronômetro: <input checked="" type="checkbox"/> MT1274		Condutímetro: <input checked="" type="checkbox"/> MT466		Trena: <input type="checkbox"/> MT469	
TRANSFORMADOR DE ENSAIO: <input checked="" type="checkbox"/> CASCATA <input checked="" type="checkbox"/> ESTÁGIO(S) <input type="checkbox"/> Haefely 100kV <input type="checkbox"/> OUTRO:					
TENSÃO SUPOSTÁVEL			tempo de aplicação: <input checked="" type="checkbox"/> 60 s <input type="checkbox"/> 10 s <input type="checkbox"/> outro:		
DISPOSIÇÃO	NORMALIZADO (kV)	CORRIGIDO (kV)	VALOR MEDIDO	ESCALA	
			$U_m \sqrt{2}$		
①	50	—	50,	150	
②	50	—	50	150	
③	—	—	—	—	
POSIÇÃO DE ENSAIO / TERMINAL ENSAIADO	① Invol. fumaço c/ 50seg.	② DIV. CAPAC.	③		
	Resultado <input checked="" type="checkbox"/> SUPORTOU <input type="checkbox"/> DESCARGA <input checked="" type="checkbox"/> SUPORTOU <input type="checkbox"/> DESCARGA <input type="checkbox"/> SUPORTOU <input type="checkbox"/> DESCARGA				
DADOS DA PRECIPITAÇÃO DE CHUVA ARTIFICIAL					
Comp. Horizontal (mm/min)	1,25	1,5	—		
Comp. Vertical (mm/min)	1,2	1,2	—		
Condutância (G) x Escala	1,50 x 100 (µS)	1,50 x 100 (µS)	— x 100 (µS)		
* Resistividade (ρ) (Ω.m) $\rho = \frac{16364}{G} (\Omega \cdot m)$	109,1	109,1	—		
EQUIPE EXECUTANTE: Clovis Paulo, Jair					
ASSINATURA: 					

Figura 41 - Relatório do ensaio de tensão senoidal para o conjunto finalizado

