



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

CARLOS JUACYR ANACLETO DE OLIVEIRA FILHO

**CONSTRUÇÃO DE UM DIVISOR DE TENSÃO
RESISTIVO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES
IMPULSIVAS ATÉ 50 kV**

CAMPINA GRANDE – PB

OUTUBRO DE 2016

CARLOS JUACYR ANACLETO DE OLIVEIRA FILHO

CONSTRUÇÃO DE UM DIVISOR DE TENSÃO
RESISTIVO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES
IMPULSIVAS ATÉ 50 kV

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Alta Tensão

Orientador:

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc

CAMPINA GRANDE – PB

OUTUBRO DE 2016

CARLOS JUACYR ANACLETO DE OLIVEIRA FILHO

CONSTRUÇÃO DE UM DIVISOR DE TENSÃO
RESISTIVO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES
IMPULSIVAS ATÉ 50 kV

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Alta Tensão

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, que por mim tudo fizeram sem medir esforços.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado perseverança e coragem para enfrentar dificuldades que muitas vezes ultrapassaram os contornos acadêmicos.

Aos meus pais, Juacyr e Wilca, por todos os ensinamentos e conselhos dados durante toda a minha vida. Foram os principais personagens da minha caminhada até esse momento. Sem eles eu jamais teria conseguido dar os passos que dei ou sequer ser a pessoa que sou.

À minha irmã, Maria Clara, por todo o companheirismo e amizade em todos os momentos.

À minha família em geral, tios, tias, avôs, avós, primos, etc. Foram de grande apoio em muitos momentos difíceis.

Aos meus amigos Jovy Araújo, Danilo Leite e Olivandro Oliveira, com quem tive a honra de dividir o teto assim que comecei o curso. Agradeço por todo o apoio e amizade prestados. Grandes amigos!

Aos meus amigos de curso, Fábio, Ruam, Rodrigo, Guilherme, Lucas, entre outros, que dividiram comigo dias difíceis durante essa trajetória. Sem vocês a caminhada seria bem mais complicada. Obrigado por tudo.

Ao professor George Lira, pelos ensinamentos e conselhos prestados desde que fui aluno na disciplina de Laboratório de Instalações Elétricas até o momento em que foi meu orientador de monitoria desta mesma disciplina e das atividades no LAT.

À Valdemir Brito, por toda a amizade e orientação concedida na elaboração deste trabalho e de tantas outras atividades desempenhadas no LAT.

À João Marcelo por todo o companheirismo e ajuda prestados.

Aos meus amigos do LAT, Raphael Borges e Antônio Neto, pela amizade formada desde os tempos de graduação.

À todos os meus amigos que fizeram parte dessa história.

Enfim, à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram nessa minha jornada.

Carlos Juacyr Anacleto de Oliveira Filho

*“Devia ter amado mais
Ter chorado mais
Ter visto o sol nascer
Devia ter arriscado mais e
até errado mais
Ter feito o que eu queria
fazer”*

Titãs

RESUMO

O presente trabalho aborda a construção de um divisor de tensão resistivo utilizado para medição de tensões impulsivas de até 50 kV. O foco principal foi contido na estruturação física de como esse tipo de equipamento normalmente é confeccionado. Dessa forma, toda a estrutura foi feita por meio da modelagem 3D do *software* AUTOCAD. O *design* final do equipamento manteve a composição padrão que usualmente é encontrada em ensaios laboratoriais e nas literaturas associadas.

Palavras-chave: divisor de tensão, tensão impulsiva, gerador de impulso, sistema de medição.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito equivalente de um divisor de tensão genérico.....	05
Figura 2 – Circuito equivalente de um divisor de tensão resistivo.....	06
Figura 3 – Resposta do divisor de tensão resistivo frente a um degrau de tensão.....	08
Figura 4 – Circuito equivalente de um divisor de tensão capacitivo.....	09
Figura 5 – Resposta do divisor de tensão capacitivo frente a um degrau de tensão.....	11
Figura 6 – Detalhe da resposta do divisor de tensão capacitivo frente a um degrau de tensão	12
Figura 7 – Circuito equivalente do divisor de tensão misto.....	13
Figura 8 – Forma de onda típica de um impulso de corrente.....	15
Figura 9 – Circuito básico de um gerador de impulso de corrente.....	15
Figura 10 – Forma de onda típica de um impulso de tensão.....	16
Figura 11 – Circuito básico de um gerador de impulso de corrente.....	17
Figura 12 – Esquema básico de um sistema de ensaio.....	18
Figura 13 – Configuração do sistema de medição no terminal de alta tensão.....	19
Figura 14 – Circuito de medição para o divisor de tensão resistivo puro.....	20
Figura 15 – Circuito de medição para divisores puramente capacitivos ou mistos.....	21
Figura 16 – Circuito de medição para divisores puramente capacitivos ou mistos.....	21
Figura 17 – Resistor utilizado no divisor de tensão.....	23
Figura 18 – Vista frontal e vista em perspectiva do eletrodo.....	24
Figura 19 – Haste isolante.....	24
Figura 20 – Pinos/conectores.....	25
Figura 21 – Invólucro externo do divisor de tensão.....	25
Figura 22 – Vista superior do divisor de tensão resistivo.....	26
Figura 23 – Conexão entre resistores.....	27
Figura 24 – Conexão entre o eletrodo e o resistor.....	27
Figura 25 – Corte transversal exibindo a conexão do ramo de baixa de tensão com o terminal de entrada para medição.....	28
Figura 26 – Vista interna do divisor de tensão com destaque para o ramo de baixa tensão.....	28

Figura 27 – Estrutura interna do divisor de tensão resistivo.....	29
Figura 28 – Visão geral do divisor de tensão.....	30
Figura 29 – Vista interna x externa.....	34
Figura 30 – Vista externa do divisor com aplicação de material.....	35
Figura 31 – Vista interna do divisor com aplicação de material.....	35

SUMÁRIO

1. Introdução	01
1.1. Objetivos.....	02
1.2. Estrutura do Trabalho.....	02
2. Divisores de tensão	03
2.1. Modelo Padrão de um Divisor de Tensão.....	04
2.2. Divisor de Tensão Resistivo.....	06
2.2.1. Resposta ao Degrau do Divisor de Tensão Resistivo.....	07
2.3. Divisor de Tensão Capacitivo.....	09
2.3.1. Resposta ao Degrau do Divisor de Tensão Capacitivo.....	10
2.4. Divisor de Tensão Misto.....	13
3. Geração de Formas de Onda Impulsivas	14
3.1. Gerador de Impulso de Corrente.....	14
3.2. Gerador de Impulso de Tensão.....	16
4. Sistema de Medição para Tensões Impulsivas	18
4.1. Interação Entre o Divisor de Tensão e o Gerador.....	18
4.2. Interação Entre o Sistema de Medição e o Terminal de Baixa Tensão do Divisor	19
5. Construção do Divisor de Tensão Resistivo Proposto	22
5.1. Componentes do Divisor.....	23
5.1.1. Resistores.....	23
5.1.2. Eletrodos.....	23
5.1.3. Hastes Isolantes.....	24
5.1.4. Pinos/Conectores.....	24
5.1.5. Invólucro Isolante.....	25
5.2. Montagem do Divisor de Tensão.....	26
6. Conclusão	31
7. Trabalhos Futuros	32
8. Referências Bibliográficas	33
ANEXO A – Vistas Auxiliares	34

1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico como um todo está sujeito às mais diversas formas de perturbação, sejam elas de origem natural, como as descargas atmosféricas, ou de procedência técnica, como sobretensões de manobra. É evidente que os efeitos causados por esses fenômenos prejudicam a operação adequada dos equipamentos, podendo chegar ao ponto de haver uma interrupção do serviço ou até mesmo algum acidente.

Em vista dos problemas que os fenômenos impulsivos possam causar em qualquer setor do sistema elétrico, seja na geração, transmissão ou distribuição, tornou-se necessária a iniciativa de estudos que buscassem cada vez mais mecanismos amenizadores dos efeitos colaterais causados por esses distúrbios. Tratar situações onde grandezas como tensão e corrente variam bruscamente não é uma tarefa fácil, pois os equipamentos de proteção precisam estar muito bem projetados e articulados de tal sorte que a perturbação prejudique a menor área possível.

As formas de onda típicas proporcionadas pelos fenômenos impulsivos foram um dos principais pontos estudados nas pesquisas relacionadas ao tema. Para conseguir mensurar essas curvas tornou-se necessária a construção de mecanismos que reproduzissem em laboratório as mesmas condições encontradas em campo. Um exemplo bastante comum desses mecanismos é o gerador de impulso de corrente, em que o processo compõe-se basicamente em carregar capacitores com o nível de tensão desejado e depois realizar a descarga em um corpo de teste.

O sistema de medição encarregado de coletar os dados dos ensaios é extremamente importante para todo o funcionamento de testes e resultados obtidos. Os divisores de tensão, que fazem parte desse sistema, contribuem fortemente na fidelidade dos valores adquiridos, como também proporcionam a devida segurança aos instrumentos medidores. Nesse sentido, é imprescindível o projeto adequado de um divisor de tensão que possibilite uma boa robustez aos esforços exigidos pelas altas correntes e tensões as quais vai estar submetido quando em operação.

Portanto, movido pela necessidade de abordar um tópico bastante comum e que preenche um papel fundamental na engenharia elétrica, este trabalho tem como foco o projeto de um divisor de tensão resistivo de alta tensão para medição de tensões impulsivas até 50 kV.

1.1. OBJETIVOS

Tomando como base o que foi apresentado, este trabalho objetiva realizar a modelagem de um divisor de tensão resistivo para medição de tensões impulsivas até 50kV. Assim, o trabalho diz respeito ao projeto técnico de um divisor de tensão empregado em ensaios de alta tensão.

Através da modelagem 3D do *software* AUTOCAD, serão desenhados todos os componentes constituintes do divisor, como os resistores, eletrodos, hastes, entre outros. A partir destes, a estrutura completa será ilustrada, mostrando detalhes das principais conexões realizadas.

Portanto, visa-se mostrar como um divisor de tensão utilizado em ensaios de alta tensão pode ser construído.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em seis seções. A primeira, Introdução, aborda as considerações gerais, o objetivo do trabalho e sua estrutura.

Na segunda, Divisores de Tensão, são mostrados os principais divisores de tensão utilizados, retratando suas estruturas básicas e principais características.

Na terceira, Geração de Formas de Onda Impulsivas, são exibidas as principais estruturas empregadas para a geração de ondas impulsivas, como o gerador de impulso de corrente e o gerador de impulso de tensão.

Na quarta, Sistema de Medição para Tensões Impulsivas, são abordadas as estruturas de medição em ensaios de alta tensão mais utilizadas, retratando assim a interação entre o terminal gerador com o ramo de alta tensão do divisor, assim como deste último com o terminal de baixa tensão do divisor.

Na quinta, Construção do Divisor de Tensão Resistivo Proposto, são mostrados os componentes constituintes do divisor, as ligações realizadas e por fim toda a estrutura montada.

Na sexta, Conclusões, são abordadas as considerações gerais sobre o trabalho realizado.

2. DIVISORES DE TENSÃO

Os divisores de tensão possuem um papel bastante importante em todos os sistemas, sejam eles de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica. A necessidade cada vez maior de se realizar medições precisas e confiáveis de correntes e tensões faz com que a boa qualidade do sistema de medição seja fator imprescindível. No entanto, medições em sistemas de potência possuem um alto grau de complexidade, pois devido aos elevados valores de tensão, que podem chegar a algumas centenas de quilovolts, a dissipação de calor nos componentes, a própria dimensão física dos equipamentos e o controle dos campos elétricos gerados tornam-se problemas de difícil solução (KUFFEL, 2000).

Dessa forma, como os instrumentos de medição não são projetados para serem conectados diretamente a terminais de alta tensão, os divisores de tensão têm justamente a função de reduzir a amplitude do sinal aos valores de operação dos equipamentos. Assim, quanto mais preciso for o fator de escala do divisor, e conseqüentemente seu funcionamento como um todo, mais seguras serão as medições realizadas pelo sistema responsável.

Os tipos de divisores de tensão mais comumente utilizados são compostos por resistores, capacitores ou uma combinação destes, formando assim divisores resistivos, capacitivos e mistos, respectivamente. Com menor grau de aplicabilidade ainda pode-se citar o divisor de tensão indutivo, que por sua vez é empregado em casos de medições em alta frequência.

O emprego de um tipo de divisor ou outro ainda é uma questão em discussão. No entanto, os divisores resistivos são preferenciais em medições de tensões impulsivas devido esse fenômeno possuir tempo de duração curto e características dinâmicas rápidas (PAN, 2012; LIU, 2011).

Os fatores que mais comprometem o desempenho de um divisor de tensão são seus parâmetros parasitas, compostos por capacitâncias e indutâncias que se formam no instrumento. As primeiras são provenientes da própria disposição dos resistores no circuito, e estas últimas ao fluxo de corrente presente nos condutores. Uma estimativa dos erros introduzidos por um divisor de tensão está intrinsecamente relacionada com a determinação desses parâmetros parasitas, que muitas vezes são de difícil obtenção (NAPOLI, 1979).

Algumas soluções são capazes de reduzir, a padrões aceitáveis, os erros causados por esses parâmetros. Para restringir os efeitos causados pelas capacitâncias parasitas, um dos métodos de compensação mais utilizados se dá pela disposição dos componentes próprios do circuito em um arranjo de tal forma que os campos elétricos formados sejam amenizados. Outra forma é tentar diminuir o tamanho físico do divisor, no entanto a amplitude de tensão também será reduzida limitando assim sua utilização (RIVERA, 1997). Tratando-se das indutâncias parasitas, a utilização de resistores não indutivos é a principal maneira de reduzir os efeitos indutivos dos componentes.

2.1. MODELO PADRÃO DE UM DIVISOR DE TENSÃO

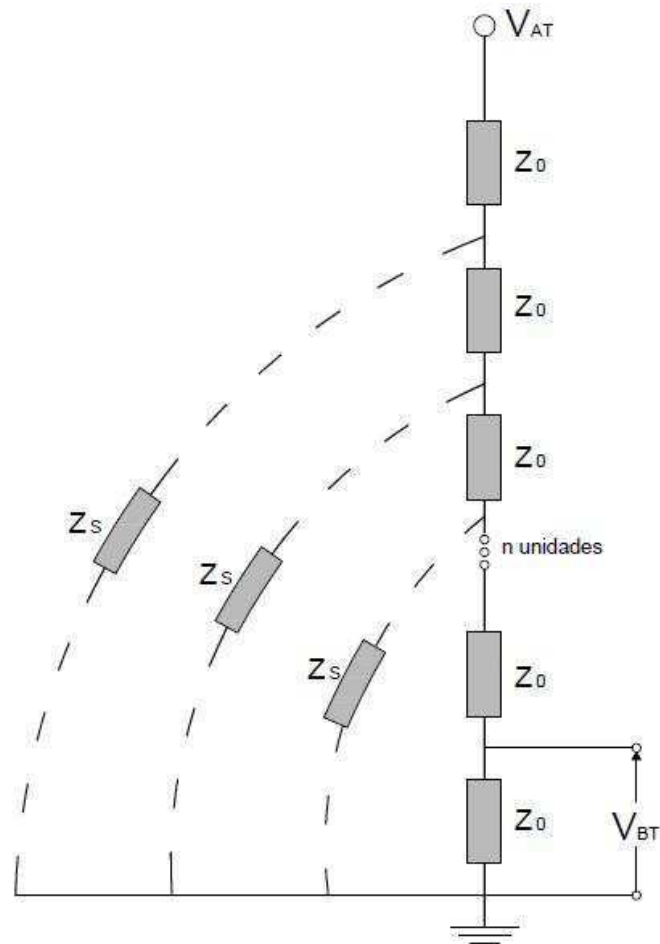
O modelo básico de um divisor de tensão é composto basicamente por suas impedâncias próprias e por seus parâmetros parasitas. Na Figura 1 é mostrado o esquema de um divisor de tensão genérico. Observa-se que as impedâncias parasitas Z_S são formadas entre as impedâncias próprias do circuito Z_0 e a Terra. Os terminais de alta e baixa tensão são indicados por V_{AT} e V_{BT} , respectivamente. Este último, por sua vez, é o grande ponto de interesse do equipamento, pois todo o projeto é voltado para a determinação de parâmetros e componentes necessários à obtenção da tensão no terminal de baixa tensão.

Outro ponto de grande relevância no desenvolvimento de um divisor de tensão, seja ele qual for, é o seu fator de escala ou de atenuação. Este parâmetro é definido como sendo a relação entre a tensão de entrada V_{AT} e a de saída V_{BT} , portanto:

$$n = \frac{V_{AT}}{V_{BT}}. \quad (1)$$

Para se obter uma boa precisão e confiabilidade nas medições realizadas, é de extrema importância que essa relação atenda a alguns critérios, tais como: deve ser independente da frequência para evitar a distorção dos sinais de múltiplas harmônicas, ser constante durante o tempo caso as características das impedâncias não variem com o aquecimento, e não apresentar descargas parciais em toda sua extensão para evitar medições errôneas devido à corrente consumida nessas descargas (DUARTE-RAMOS, 1977). Outro fator a ser atendido é minimizar a defasagem entre corrente e tensão a depender das características capacitivas ou indutivas do circuito.

Figura 1 – Circuito equivalente de um divisor de tensão genérico



Fonte: o próprio autor

Segundo Kuffel (2000), as análises pra esse tipo de modelo podem ser realizadas a partir da função de transferência do sistema, que relaciona, por sua vez, a tensão de saída V_{BT} , a tensão de entrada V_{AT} e a o fator de escala n do divisor. A representação dessa relação é mostrada na equação a seguir.

$$h_t(s) = \frac{nV_{BT}}{V_{AT}} = n \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{Z_0(s)/Z_S(s)}}{\sinh \sqrt{Z_0(s)/Z_S(s)}}. \quad (2)$$

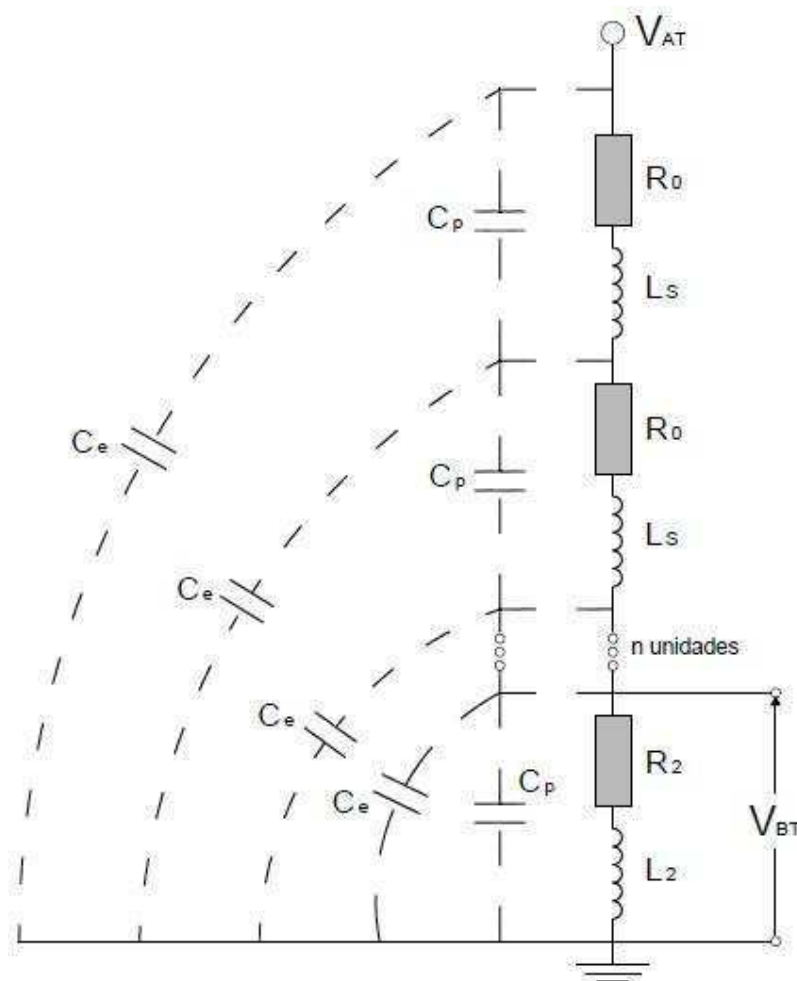
Como o foco deste trabalho é a construção de um divisor de tensão para medição de tensões impulsivas, torna-se interessante a avaliação da resposta do divisor frente a um degrau de tensão. Dessa maneira, a equação que melhor representa a situação de interesse é dada por:

$$g_t(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} h_t(s) \right]. \quad (3)$$

2.2. DIVISOR DE TENSÃO RESISTIVO

O circuito equivalente de um divisor de tensão resistivo segue o mesmo padrão do modelo geral apresentado na Figura 1. Esse, por sua vez, é configurado com os resistores próprios R_0 e R_2 , componentes indutivas L_S e L_2 , e as capacitâncias parasitas C_e e C_p . Vale lembrar que as resistências provenientes dos condutores e componentes presentes no circuito foram consideradas nos valores de R_0 e R_2 . Na Figura 2 está representada toda a distribuição dos parâmetros constituintes do divisor de tensão resistivo.

Figura 2 – Circuito equivalente de um divisor de tensão resistivo



Fonte: o próprio autor

Um dos grandes problemas encontrados na utilização de divisores de tensão resistivos para alta tensão é a dissipação de calor nos resistores. Esse é um fator que pode levar o equipamento a uma situação de risco, pois um superaquecimento dos componentes

ocasiona um mau desempenho do instrumento, além de que as chances de ocorrer um acidente, como a queima ou explosão, tornam-se possíveis. Do ponto de vista do circuito de medição, é imprescindível que os resistores presentes nos ramos de alta e baixa tensão possuam as mesmas propriedades térmicas. Isso fará com que as variações do fator de escala com a temperatura sejam mínimas (DUARTE-RAMOS, 1977). Uma alteração térmica diferente entre os resistores de alta e baixa tensão durante a aplicação do pulso de tensão, motivará o surgimento de erros transitórios induzidos termicamente (BOGGS, 1996).

A atuação de indutâncias e capacitâncias parasitas também pode comprometer a performance do divisor. Existem algumas maneiras de amenizar a presença desses parâmetros. Uma delas é a utilização de um eletrodo de equalização no terminal de alta tensão. Isso proporcionará uma uniformização do campo elétrico ao longo do divisor, reduzindo assim a influência de capacitâncias parasitas. A depender da amplitude de tensão à qual o equipamento vai estar submetido, outra prática bastante eficiente é o uso de vários anéis equalizadores ao longo do comprimento do divisor, de tal forma que o diâmetro dos anéis seja decrescente do topo até a base. Como foi dito anteriormente, para a redução das componentes indutivas normalmente são aplicados resistores de fios não indutivos.

2.2.1. RESPOSTA AO DEGRAU DO DIVISOR DE TENSÃO RESISTIVO

No intuito de se realizar análises à respeito do comportamento da resposta do divisor de tensão resistivo quando submetido a um degrau de tensão, é necessário expressar sua função de transferência para a situação em questão. Assim, de acordo com Kuffel (2000):

$$g_t(t) = 1 + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2}. \quad (4)$$

Onde:

$$a = \frac{R}{2L}, \quad b_k = \sqrt{\alpha^2 - \frac{k^2 \pi^2}{LC_e \left[1 + \left(\frac{C_p}{C_e} \right) k^2 \pi^2 \right]}}$$

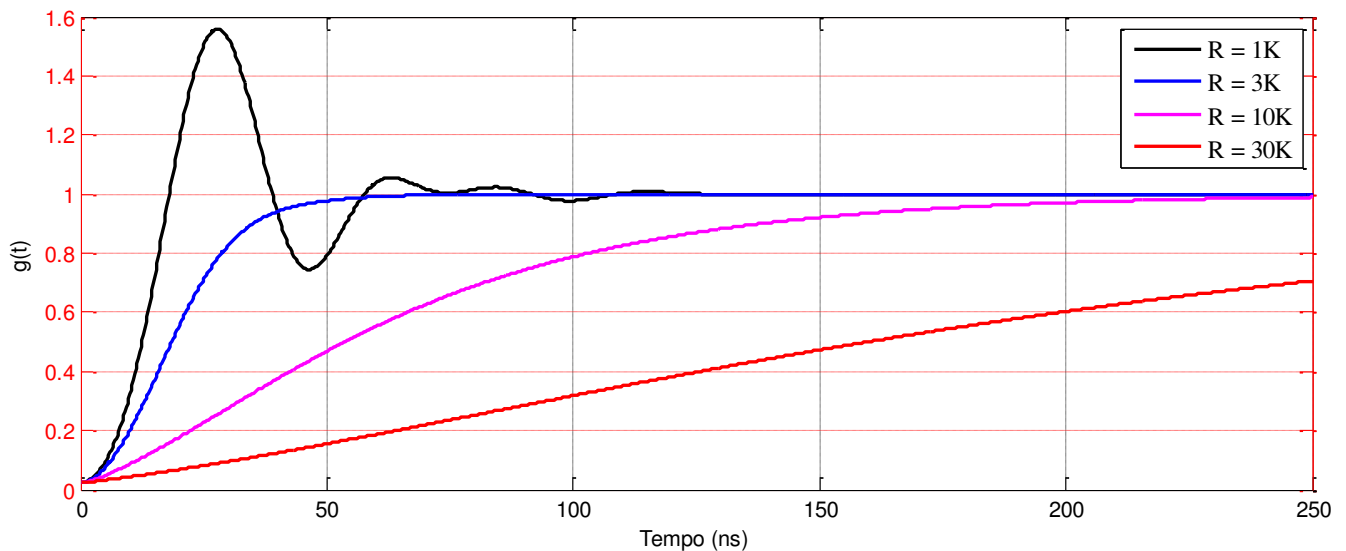
$$k = 1, 2, 3, 4 \dots$$

A partir função de transferência frente a um degrau de tensão para o divisor resistivo mostrada em (4), e utilizando como plataforma de estudo o *software* MATLAB, é possível simular e obter a resposta do divisor para diferentes variações de seus parâmetros. Os resultados são mostrados na Figura 3.

Nota-se nas simulações que para diferentes valores de resistência a resposta é modificada consideravelmente. O comportamento das curvas varia desde um desempenho com oscilação e tempo de regime mais curto, até situações em que apresenta um elevado grau de amortecimento, porém com tempo de regime muito longo. Para R igual a 1K tem-se uma resposta com uma oscilação inicial, já para R igual a 3K obteve-se um tempo de regime curto sem a ocorrência de oscilação. As curvas referentes a R igual a 10k e 30k evidenciam o elevado tempo de regime.

É importante ressaltar que a presença de oscilações para os valores mais baixos de resistência deve-se à influência dos parâmetros intrínsecos e parasitas do circuito. Por outro lado, a ausência de oscilações para as maiores resistências é atribuída ao fato de que para estes valores o circuito torna-se suficientemente amortecido, proporcionando, assim, uma resposta mais estável (RIVERA, 1997).

Figura 3 – Resposta do divisor de tensão resistivo frente a um degrau de tensão



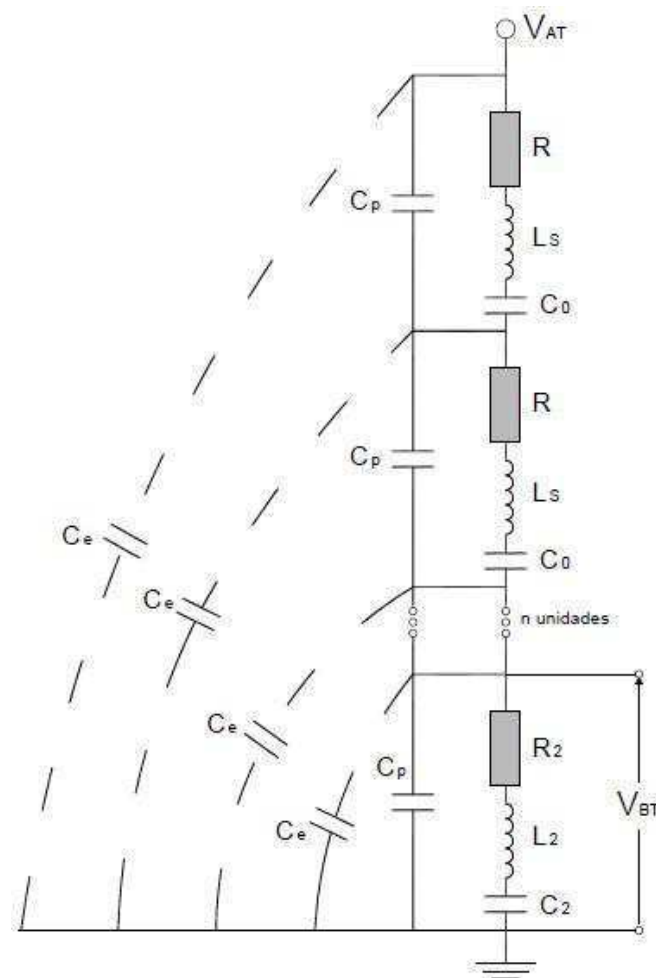
Fonte: o próprio autor

2.3. DIVISOR DE TENSÃO CAPACITIVO

A configuração do divisor de tensão capacitivo segue a mesma estrutura padrão apresentada na Figura 1. No entanto, a nova configuração é caracterizada pelas capacitâncias próprias C_0 e C_2 , pelas capacitâncias parasitas para a Terra C_e , pelas capacitâncias intrínsecas ao circuito C_p e pelas componentes indutivas e resistivas do divisor L_S e R , respectivamente.

Na Figura 4 encontra-se a representação do divisor de tensão capacitivo revelando a disposição de seus componentes em sua estrutura. Vale salientar que a presença das componentes resistivas deve-se à própria resistência dos condutores bem como dos elementos constituintes do circuito.

Figura 4 – Circuito equivalente de um divisor de tensão capacitivo



Fonte: o próprio autor

Um ponto de suma importância que deve ser destacado são os tipos de capacitores utilizados para esse tipo de finalidade. As perdas dielétricas constituem-se como o grande desafio no índice de qualidade dos capacitores. Essas são caracterizadas normalmente por sobreaquecimento nos componentes, de tal forma que o material perca parcial ou totalmente suas propriedades dielétricas.

Em detrimento dos efeitos indutivos presentes no terminal de baixa tensão do divisor, algumas literaturas sugerem a utilização de um divisor de corrente capacitivo nesse terminal. Essa configuração nada mais é do que uma associação de capacitores em paralelo funcionando como filtros capacitivos.

2.3.1. RESPOSTA AO DEGRAU DO DIVISOR DE TENSÃO CAPACITIVO

Para preferir análises do divisor de tensão capacitivo frente a tensões impulsivas, torna-se evidente a necessidade de expressar sua função de transferência para a situação em questão. Dessa forma, de acordo com Kuffel (2000):

$$g_t(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C + C_p)} + 2 \exp(-at) \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{AB}. \quad (4)$$

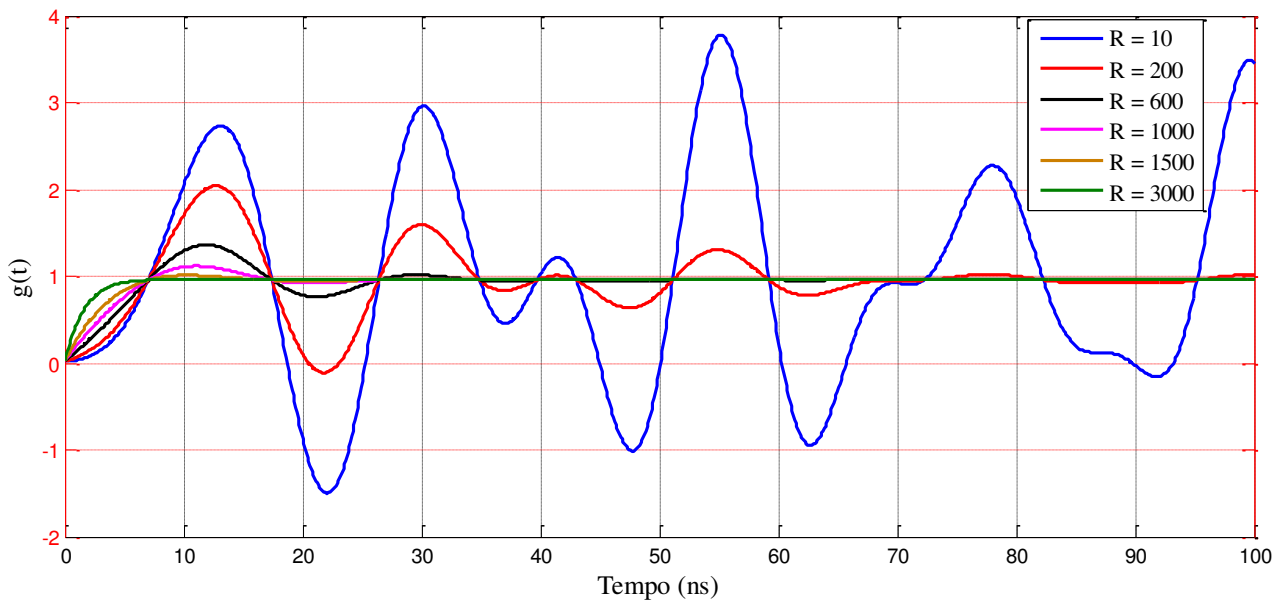
Onde:

$$A = \left(1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{CK^2\pi^2} \right), \quad a = \frac{R}{2L}.$$

$$B = \left(1 + \frac{C_p K^2 \pi^2}{C_e} \right), \quad b_k = \sqrt{\frac{K^2 \pi^2 A}{LC_e B}}.$$

Assim, tomando a expressão apresentada em (4) e utilizando o *software* MATLAB como plataforma de estudo, foram simuladas algumas curvas para a avaliação da resposta do divisor de tensão capacitivo frente a um degrau de tensão. O parâmetro tomado como foco principal no que diz respeito ao comportamento das curvas foi a resistência de amortecimento do divisor. A ideia foi basicamente realizar a variação do valor desse componente a fim de averiguar dois pontos fundamentais: o tempo de regime permanente e a oscilação da resposta. Os resultados podem ser vistos na Figura 5.

Figura 5 – Resposta do divisor de tensão capacitivo frente a um degrau de tensão

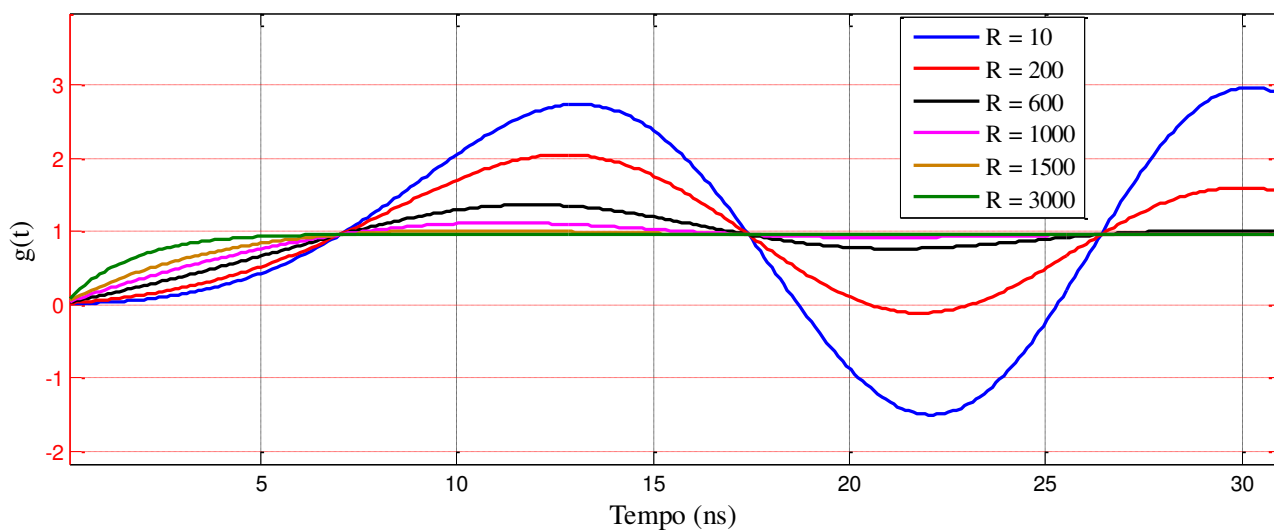


Fonte: o próprio autor

Tomando como referência o circuito da Figura 4 e fazendo sua análise considerando o valor da resistência R como sendo nulo, obtém-se um circuito ressonante LC série, que por sua vez motivará uma resposta oscilatória do divisor. Essa situação pode ser comparada com a curva para R igual a 10, onde foi considerado apenas as resistências inerentes aos condutores e componentes do circuito. Nota-se, nesse caso, que além de apresentar um comportamento bastante oscilatório, para o tempo de simulação adotado a resposta não atingiu o valor de regime. Isso torna evidente que o divisor de tensão puramente capacitivo não é indicado para medições de tensões impulsivas ou fenômenos altamente transitórios (Kuffel, 2000). Para os outros valores de R , pode-se observar que a avaliação das curvas de acordo com o crescimento da resistência de amortecimento mostra a passagem gradativa do comportamento subamortecido para o superamortecido da resposta do divisor de tensão.

Considerando os mesmos resultados obtidos na Figura 5 até um período de tempo em torno de 30ns, o desempenho das curvas pode ser analisado com mais detalhe na Figura 6. Sendo assim, nota-se que o grau de oscilação da resposta, juntamente com o tempo de regime, possuem uma estreita relação com o valor do resistor a ser inserido no circuito. Logo, fazendo uma análise mais precisa em relação à variação dos parâmetros, pode-se notar que quanto maior o valor de R , mais amortecida será a resposta fornecida pelo instrumento. Analogamente, à medida que R vai diminuindo, mais oscilatórias serão as curvas obtidas.

Figura 6 – Detalhe da resposta do divisor de tensão capacitivo frente a um degrau de tensão



Fonte: o próprio autor

No que diz respeito ao tempo de regime, este não necessariamente irá garantir a estabilidade da resposta em curto período se ao circuito do divisor for atribuída uma resistência de alto valor ôhmico. Uma elevação bastante considerável da resistência pode resultar em uma resposta com um auto grau de amortecimento. Do ponto de vista transitório, o resultado é aceitável. No entanto, seu tempo de regime também se elevará, podendo não estar de acordo com as condições de interesse do projetista. Nesse sentido, é importante notificar que o valor do resistor a ser inserido no circuito depende das especificações a serem atendidas.

No intuito de otimizar o processo de tentativa e erro até que um valor apropriado de resistência seja encontrado, a expressão proposta por Kuffel (2000), mostrada em (5), atribui uma estimativa bastante segura na determinação desse parâmetro. Isso significa que o valor determinado fornece uma resposta com amortecimento satisfatório, ou seja, pouca oscilação e um tempo de regime curto.

$$R \approx 4 \sqrt{\frac{L}{C_e}} \quad (5)$$

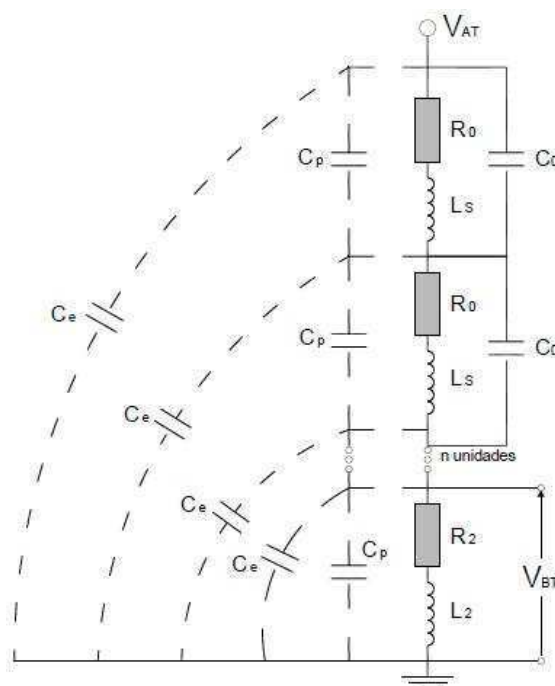
Caracterizar a resistência determinada por (5) como sendo um valor ótimo não é uma afirmativa totalmente segura. O que se pode afirmar é que o circuito apresentará uma resposta satisfatória do ponto de vista transitório. No entanto, a depender da especificidade do projeto, o tempo de regime pode não ser o desejado, podendo ser um

valor menor ou maior do que o esperado. Dessa forma, tornaria necessário um ajuste no valor do resistor.

2.4. DIVISOR DE TENSÃO MISTO

O divisor de tensão misto, composto por associações de capacitores e resistores, na verdade é um modelo compensado do divisor resistivo. Seguindo o mesmo padrão adotado nas outras configurações, esta possui as capacitâncias parasitas C_p e C_e , componentes indutivas L_s e L_2 e os componentes próprios R_0 , R_2 e C_0 . A compensação é realizada de tal forma a conectar capacitores em paralelo com os resistores, no intuito de se obter uma distribuição de potencial uniforme nos elementos. Esse método é adotado devido à não linearidade de distribuição de potencial em situações de impulso de tensão, depender da relação entre as capacitâncias parasitas para a Terra e as capacitâncias intrínsecas do circuito. A dependência entre esses dois parâmetros é tal que quanto maior for este segundo em relação ao primeiro, melhor será a distribuição de potencial nos elementos resistivos. Tal fato ameniza os esforços exigidos dos resistores bem como a quantidade de calor dissipada. O circuito característico do divisor de tensão misto é apresentado na figura abaixo.

Figura 7 – Circuito equivalente do divisor de tensão misto



Fonte: o próprio autor

3. GERAÇÃO DE FORMAS DE ONDA IMPULSIVAS

A presença de formas de onda impulsivas nos sistemas elétricos é proveniente principalmente de descargas atmosféricas e surtos de manobra. Os sistemas de proteção utilizados para tentar evitar a propagação desses surtos e consequentemente os danos aos equipamentos afetados, constitui-se basicamente de cabos guarda, supressores de surto (para raios de Z_nO), disjuntores, chaves, relés, entre outros.

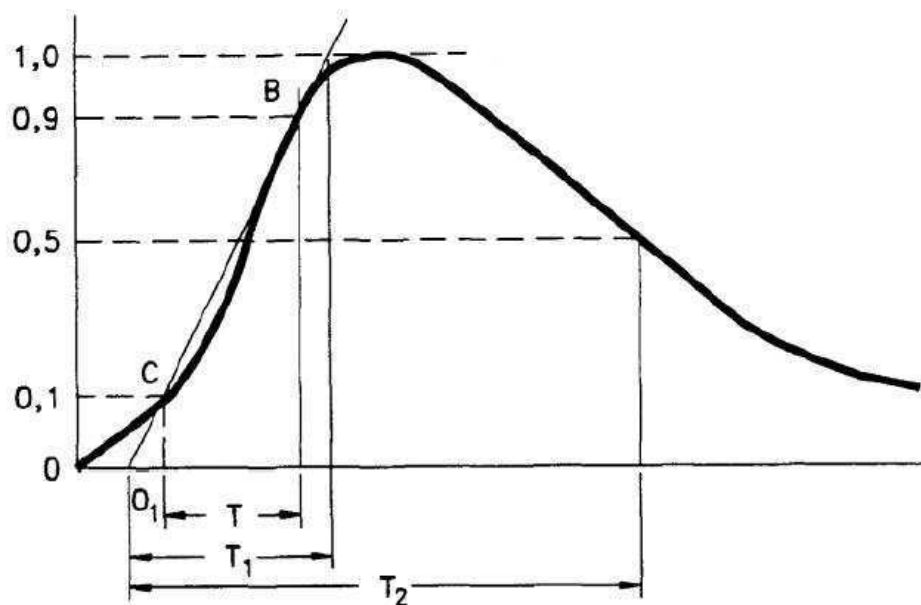
Em vista dos riscos que esses fenômenos possam vir a causar, muitos estudos foram realizados no intuito de se obter formas de onda que reproduzissem o comportamento típico dos surtos de tensão e de corrente presentes nas linhas de transmissão. Para fins experimentais, dois sistemas de geração de ondas impulsivas podem ser destacados: o gerador de impulso de corrente e o gerador de impulso de tensão.

3.1. GERADOR DE IMPULSO DE CORRENTE

A forma de onda da corrente impulsiva possui uma duração da ordem de microssegundos, com padrão estabelecido por norma de $8/20 \mu s$. Este parâmetro é a principal especificação do comportamento da curva, onde o primeiro valor diz respeito ao tempo necessário para a onda atingir sua amplitude máxima, denominado de tempo de frente, e o segundo refere-se ao tempo que a onda demora para atingir metade de seu valor de pico, conhecido como tempo de meia cauda.

É importante notar, a partir da Figura 8, como o tempo de frente T_1 e o de meia cauda T_2 são determinados. Devido ser um ensaio de duração extremamente rápida e sujeito à ruídos, há de certa forma uma grande dificuldade de definir o instante exato que a onda começa. Assim, é traçada uma reta entre o ponto onde o impulso atinge 10% e 90% de seu valor máximo. Logo, o cruzamento dessa reta com o eixo horizontal é definido como a origem virtual.

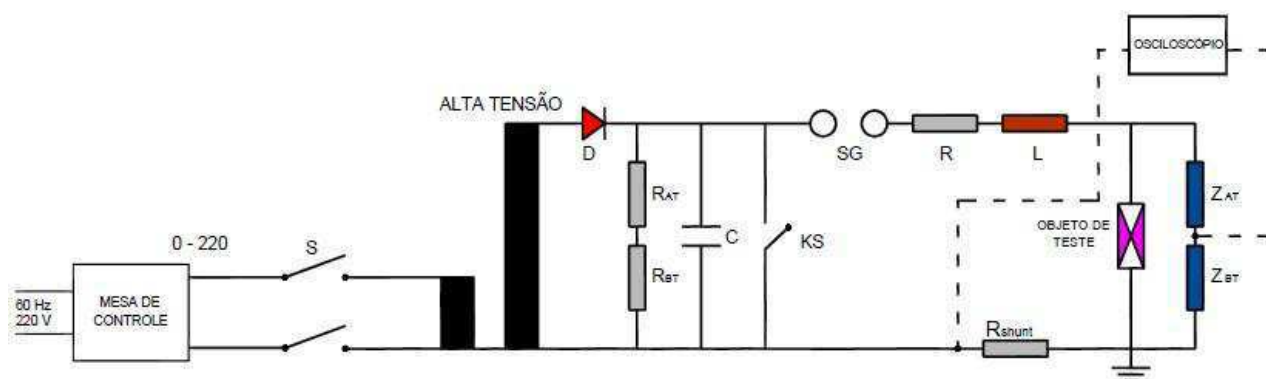
Figura 8 – Forma de onda típica de um impulso de corrente



Fonte: (Kuffel, 2000; adaptado)

Os circuitos mais comumente utilizados para a geração de impulsos de corrente têm como princípio fundamental a descarga da energia armazenada em capacitores. Associados a esses elementos, outros componentes, como resistores e indutores, são essenciais para a obtenção do formato de onda desejado.

Figura 9 – Circuito básico de um gerador de impulso de corrente



Fonte: (KIND, 1999; adaptado)

Como pode ser observado na Figura 9, o carregamento do capacitor C é realizado por meio de uma mesa de controle que regula a tensão a ser retificada no diodo D. O valor da tensão armazenada nos capacitores é medida pelo divisor de tensão situado na entrada do circuito. A partir do sistema que controla o distanciamento das esferas (SG), estas são

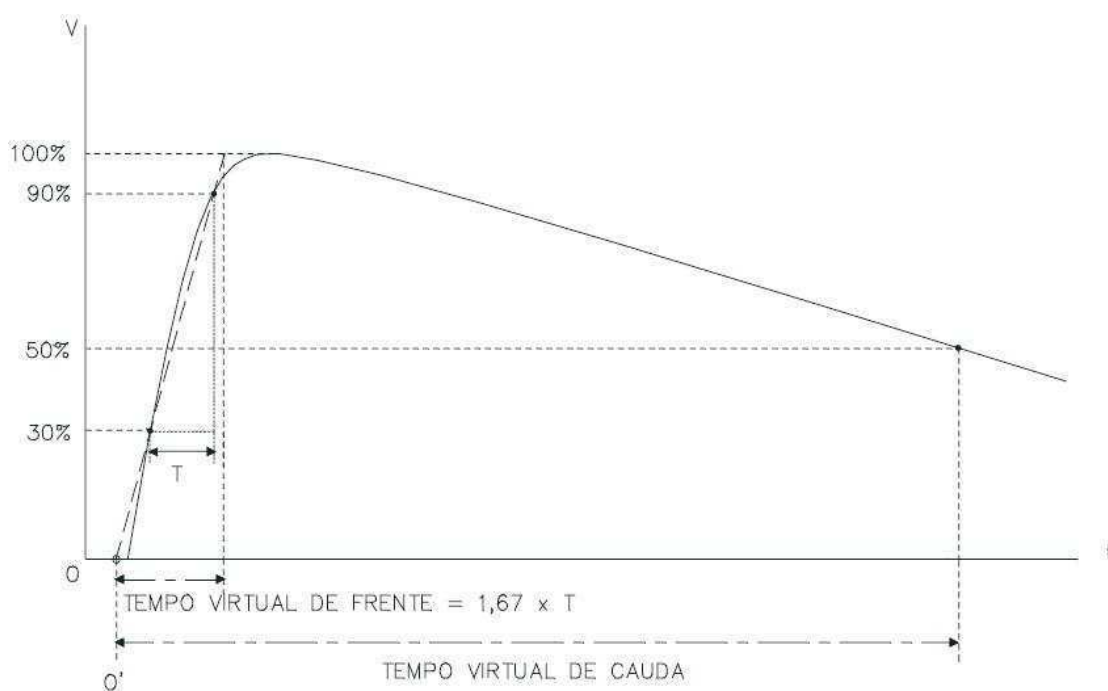
aproximadas de tal sorte que o dielétrico presente entre elas seja rompido, acarretando assim na descarga da energia dos capacitores no objeto de teste. No entanto, a depender das características deste último, como também dos parâmetros do circuito, possa ser que mesmo após a descarga ainda fique alguma parcela de energia nos capacitores. Assim, a chave KS funciona como um sistema de proteção drenando para a terra essa energia.

É importante notar, no circuito do gerador de impulso de corrente, que o sistema de medição da tensão aplicada no objeto de teste é proporcionado por um divisor de tensão na saída. Como o osciloscópio não realiza de forma direta a medição de corrente, torna-se fundamental a presença de um resistor de valor conhecido (R_{shunt}). Portanto, em conjunto com o valor de tensão aplicado no objeto de teste, é possível determinar a corrente que circula no mesmo.

3.2. GERADOR DE IMPULSO DE TENSÃO

Como pode ser visto na Figura 10, as formas de onda geradas através de impulsos de tensão se assemelham as produzidas por geradores de impulsos de corrente. A principal diferença, além do circuito utilizado para cada ensaio em específico, diz respeito ao tempo de frente e ao de meia cauda, que para este caso é padronizado em $1,2/50 \mu s$.

Figura 10 – Forma de onda típica de um impulso de tensão

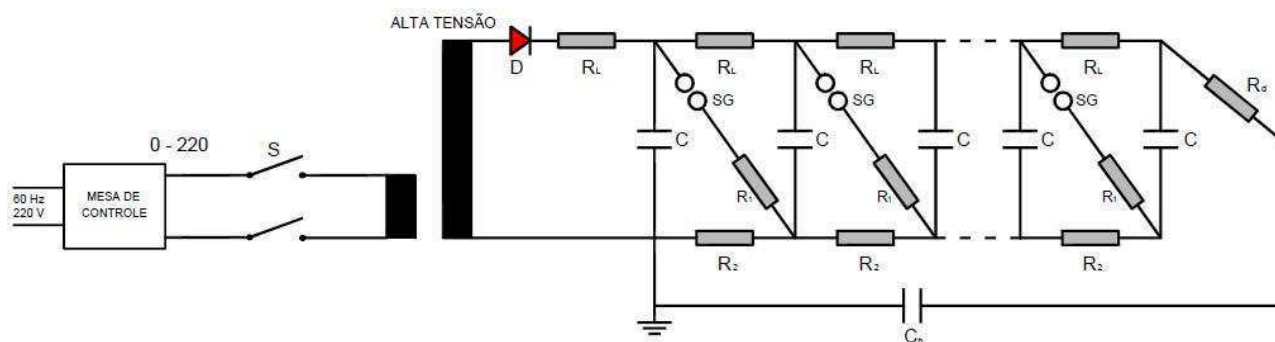


Fonte: (SCHAEFER, Ensaios de Impulso Atmosférico e de Manobra)

A técnica mais prática e eficiente para produzir impulsos de tensão utiliza um circuito específico denominado de cascata de Marx. Nessa configuração, os capacitores são carregados em paralelo de tal forma que após a ruptura do dielétrico presente entre as esferas, os mesmos são descarregados em série.

De acordo com a Figura 11, é possível observar que a partir da tensão retificada pelo diodo D, os capacitores de carga C são carregados por meio do resistor de carregamento R_L . Assim, após a ruptura do gap SG, esses capacitores são conectados em série dando início ao descarregamento de sua energia armazenada. Nesse momento, o capacitor de frente C_b é carregado.

Figura 11 – Circuito básico de um gerador de impulso de corrente

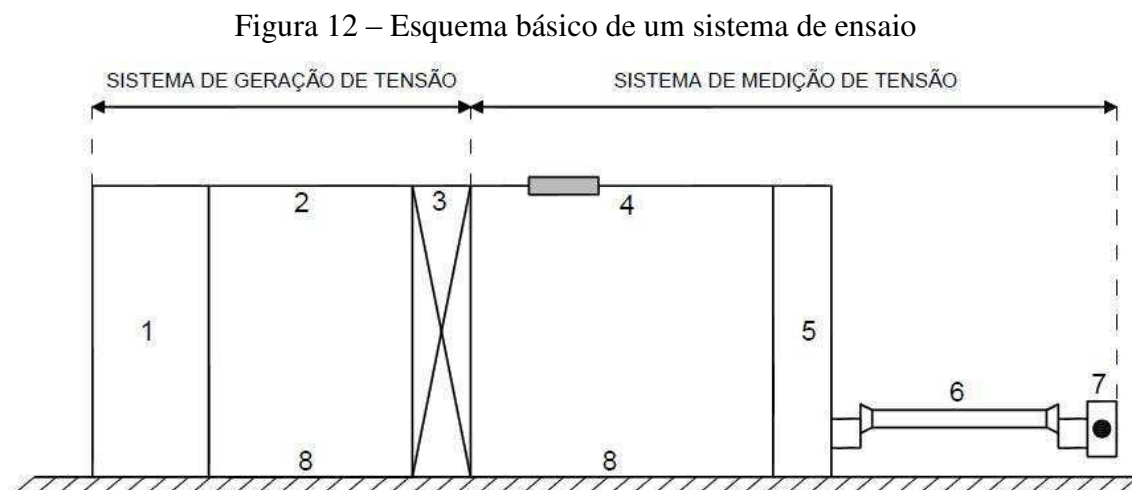


Fonte: Fonte: (KIND, 1999; adaptado)

4. SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA TENSÕES IMPULSIVAS

O sistema responsável por realizar as medições em situações onde o comportamento do sinal é impulsivo, seja ele proveniente de descargas atmosféricas ou de surtos de manobras, não é necessariamente complexo, no entanto possui algumas especificidades para esse tipo de caso. Em geral, o sistema de medição é composto por um divisor de tensão, conexões de alta tensão, sistema de transmissão e por equipamentos usados para se obter as formas de onda geradas.

Na Figura 12 pode-se notar que o sistema de ensaio para alta tensão possui os seguintes componentes em sua estrutura básica: o gerador de tensão (1), os condutores de ligação (2) até o corpo de teste (3), os condutores (4) até o divisor (5), o sistema de transmissão do sinal a ser medido (6), o instrumento de medição (7) e o retorno de terra (8).



Fonte:(Kuffel, 2000)

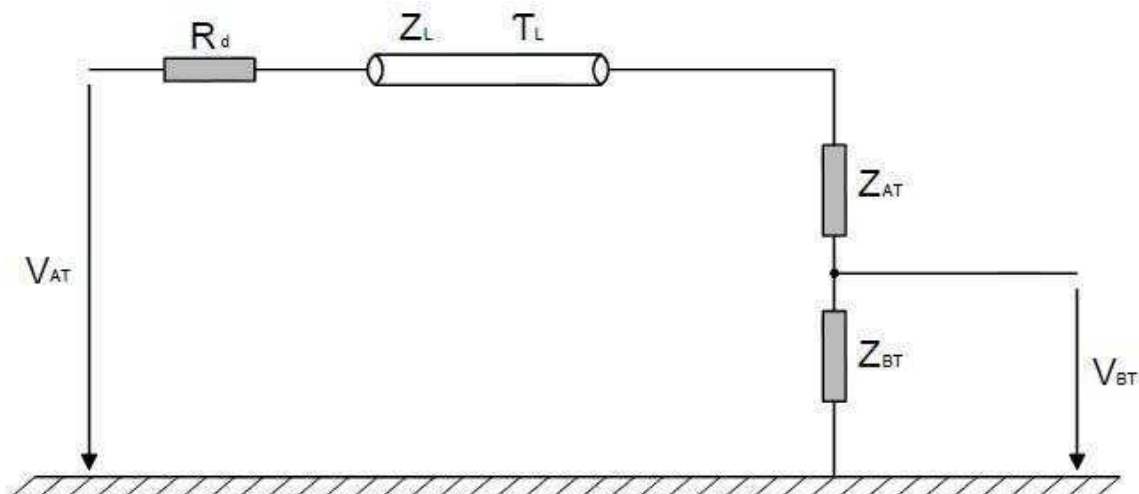
4.1. INTERAÇÃO ENTRE O DIVISOR DE TENSÃO E O GERADOR

Devido ao fenômeno de impulso estar submetido à altas frequências, a veracidade dos dados coletados pode ser comprometida pela presença de ondas viajantes que circulam nos cabos. Nesse sentido, é de suma importância ficar atento as conexões entre a fonte e o terminal de alta tensão do divisor, assim como, a ligação do terminal de baixa tensão aos equipamentos de medição.

As oscilações presentes nas respostas dos divisores de tensão, quando submetidos a um degrau de tensão, mostraram-se solucionadas quando um resistor de amortecimento era inserido no circuito. De forma semelhante, para amenizar a interferência de altas frequências e conseqüentemente o trânsito de ondas viajantes no circuito, um resistor é conectado em série com o cabo de alta tensão. O valor da resistência R_d deve ser equivalente à impedância característica do cabo Z_L , pois quando a onda viajante atingir a extremidade deste último, ela enxergará o cabo como uma linha de transmissão infinita, evitando assim a reflexão do sinal. O esquema de ligação pode ser observado na Figura 13.

Como foi abordado anteriormente, o cabo pode ser representado por uma linha de transmissão. Sendo assim, os parâmetros típicos da linha, como sua impedância característica e o tempo de trânsito, também são levados em consideração na representação desse modelo.

Figura 13 – Configuração do sistema de medição no terminal de alta tensão



Fonte: (Kuffel, 1997; adaptado)

4.2. INTERAÇÃO ENTRE O SISTEMA DE MEDIÇÃO E O TERMINAL DE BAIXA TENSÃO DO DIVISOR

As elevadas frequências presentes no circuito também afetam a região de baixa tensão do divisor. Da mesma forma que no caso anterior, isso pode acarretar no surgimento de ondas viajantes e possivelmente no prejuízo da característica de transferência do sinal de medição.

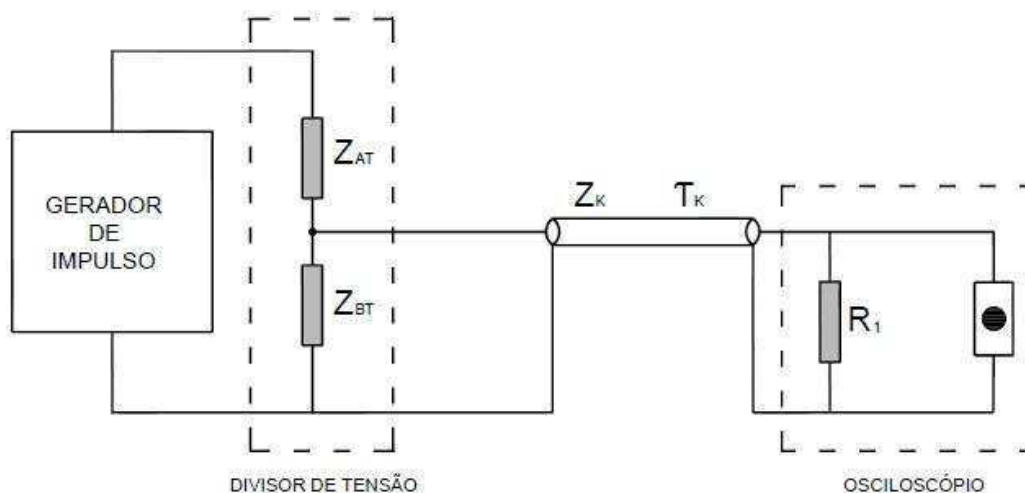
Semelhante à solução encontrada para amenizar os efeitos distorcivos causados por ondas viajantes no ramo de alta tensão, resistores também são utilizados para amortecer esses sinais no ramo de baixa tensão. Assim, a depender do tipo do divisor, existem três principais arranjos empregados para medições no ramo de baixa tensão. A diferença básica entre eles resume-se ao posicionamento do resistor, que pode ser no terminal receptor, em série com o cabo ou em ambas as posições.

Para um divisor resistivo puro, o casamento de impedâncias é feito de tal forma a se ter o valor de R_1 igual à impedância de surto do cabo R_k mostrada em (6), onde L_K e C_K são a indutância e capacitância equivalente, respectivamente, por unidade de comprimento do cabo. Esta última, por sua vez, é independente da frequência e é dada por:

$$R_K = \sqrt{\frac{L_K}{C_K}} \quad (6)$$

A partir da Figura 14 é possível notar que a resistência de casamento R_1 está conectada em paralelo à impedância do ramo de baixa tensão do divisor. Isso evidencia que R_1 pode ser considerado como parte integrante desse ramo.

Figura 14 – Circuito de medição para o divisor de tensão resistivo puro

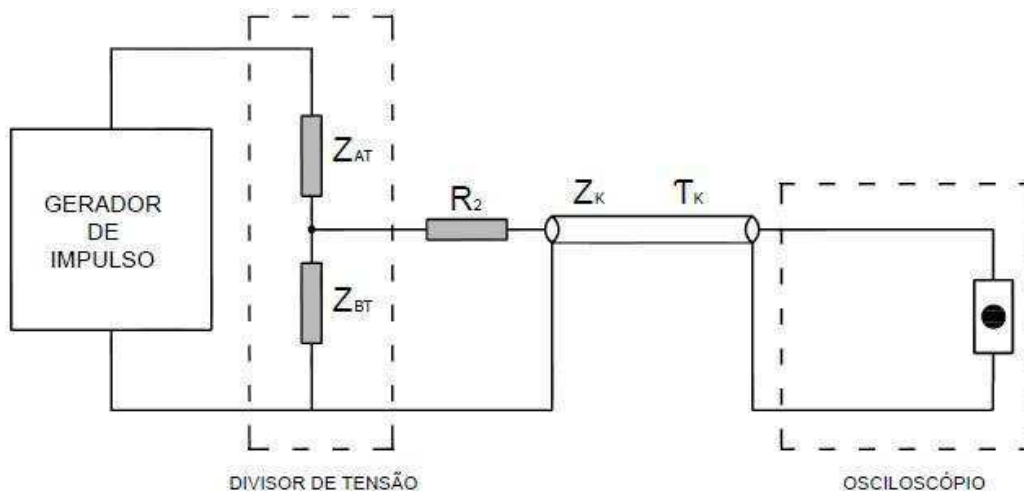


Fonte: (Rivera, 1997)

No caso de se ter, no ramo de baixa tensão do divisor, apenas capacitores (puramente capacitivo) ou uma combinação destes com resistores (misto), ocorrerão oscilações provenientes do carregamento e descarregamento dos capacitores. Este problema é solucionado inserindo-se um resistor (R_2) em série com a impedância do cabo

(Z_k), tendo como objetivo amortecer as variações do sinal. A configuração do circuito de medição para essa situação é mostrada na Figura 15.

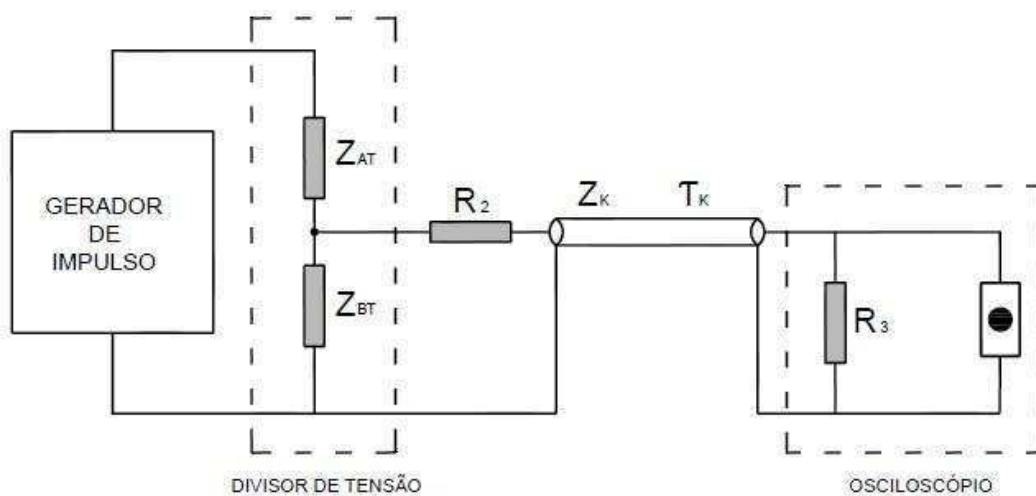
Figura 15 – Circuito de medição para divisores puramente capacitivos ou mistos



Fonte: (Rivera, 1997)

No entanto, quando se utiliza formas de onda impulsivas em divisores de tensão mistos ou puramente capacitivos, o sistema de medição mais confiável apresenta tanto uma resistência de amortecimento conectada em série com a impedância do cabo, como também uma resistência de casamento em paralelo com o ramo de baixa tensão do divisor. Essa configuração é mostrada na Figura 16.

Figura 16 - Circuito de medição para divisores puramente capacitivos ou mistos



Fonte: (Rivera, 1997)

5. CONSTRUÇÃO DO DIVISOR DE TENSÃO RESISTIVO PROPOSTO

O projeto constitui-se da modelagem de um divisor de tensão resistivo para medição de tensões impulsivas de até 50 kV. No caso em questão, toda a estrutura do equipamento foi projetada utilizando-se a interface 3D do *software* AUTOCAD. Nesse sentido, o trabalho mostrará a estrutura padrão de um divisor de tensão resistivo para alta tensão que comumente é encontrado em sistemas de ensaios em laboratório ou referenciado em publicações como ressaltado por Chagas (1995).

A essência do projeto de um divisor de tensão está concentrada principalmente no arranjo e nas especificações dos resistores utilizados. Em vista da amplitude de tensão à qual vai estar submetido, o equipamento deve ser projetado para amenizar o máximo possível fatores que venham a comprometer seu funcionamento, como por exemplo a influência de capacitâncias parasitas, efeitos indutivos, aquecimento dos componentes, ou até a própria soldagem dos resistores.

Devido não haver uma boa distribuição de potencial em seus componentes, além de ser bastante influenciado por capacitâncias parasitas, a conexão série dos resistores no sentido puramente vertical não é o arranjo mais eficaz para esse tipo de caso. Outras configurações, como em zigue zague e a helicoidal, são mais utilizadas.

No que diz respeito às especificações dos resistores, no intuito de amenizar os efeitos indutivos, na prática são utilizados resistores de fios não indutivos. Seu dimensionamento é um fator de grande relevância ligado principalmente à questões de aquecimento. O uso de resistores de grande valor ôhmico tem a vantagem de reduzir a quantidade de componentes e conseqüentemente o número de conexões, evitando assim as chances de haver mau funcionamento por conta de soldagens inadequadas. No entanto, cada unidade resistiva estará submetida a uma maior diferença de potencial, acarretando em maiores perdas por aquecimento, podendo até colocar em risco, a depender do estresse elétrico aplicado, a operação do instrumento.

5.1. COMPONENTES DO DIVISOR

Os componentes básicos utilizados para o projeto do divisor de tensão foram resistores para os braços de alta e de baixa tensão, eletrodos para a conexão e fixação do equipamento, hastes isolantes para dispor os resistores, pinos condutores e o invólucro isolante para a proteção e isolação da estrutura.

5.1.1. RESISTORES

Os resistores foram dimensionados de tal forma a garantir que cada unidade concentrasse uma diferença de potencial relativamente baixa em comparação com a tensão total aplicada no terminal superior. Assim, para o braço de alta tensão foram utilizados 50 resistores de $1M\Omega$ cada, e para o de baixa tensão um resistor de $100k\Omega$, obtendo, portanto, um fator de escala em torno de 500:1.

Figura 17 – Resistor utilizado no divisor de tensão



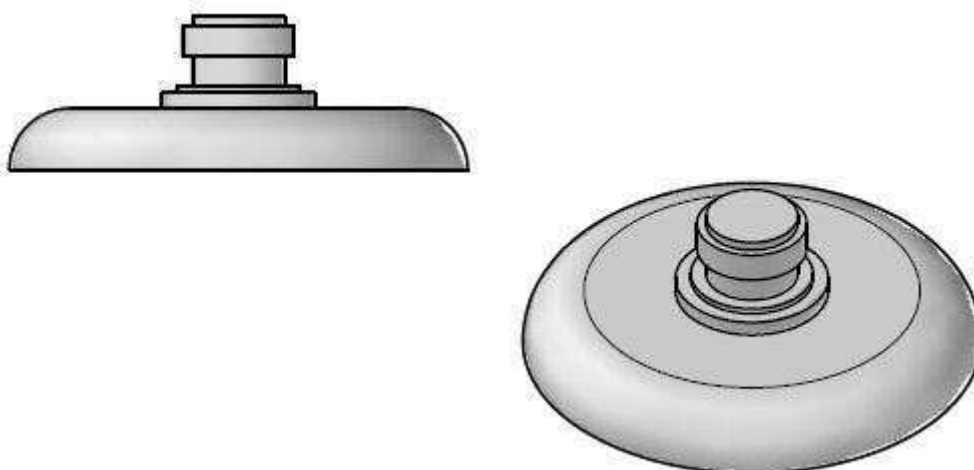
Fonte: o próprio autor

5.1.2. ELETRODOS

Os eletrodos de fixação, presentes nas partes superior e inferior do divisor, são normalmente fabricados em alumínio. Essa é uma característica importante, pois além de ser um bom condutor, o material é bastante leve, facilitando o manuseio do equipamento.

O *design* do eletrodo normalmente leva em conta a base de suporte à qual o mesmo vai ser encaixado. Outro aspecto relevante que deve ser considerado em sua estrutura é o formato das bordas. É aconselhável que estas sejam de formato arredondado, pois isso dificulta o surgimento de alguns efeitos, como o corona, causados por concentração de campo elétrico.

Figura 18 – Vista frontal e vista em perspectiva do eletrodo



Fonte: o próprio autor

5.1.3. HASTES ISOLANTES

As hastes são usadas para erguer ou sustentar os resistores ao longo do divisor. Os principais materiais empregados são o acrílico e o nylon, pois constituem-se de bons isolantes além de ser práticos para a atividade.

Figura 19 – Haste isolante



Fonte: o próprio autor

5.1.4. PINOS / CONECTORES

Os pinos funcionam como pontos de material condutor fixados nas hastes, com a função de realizar a ligação de um resistor para outro.

Figura 20 – Pinos/conectores

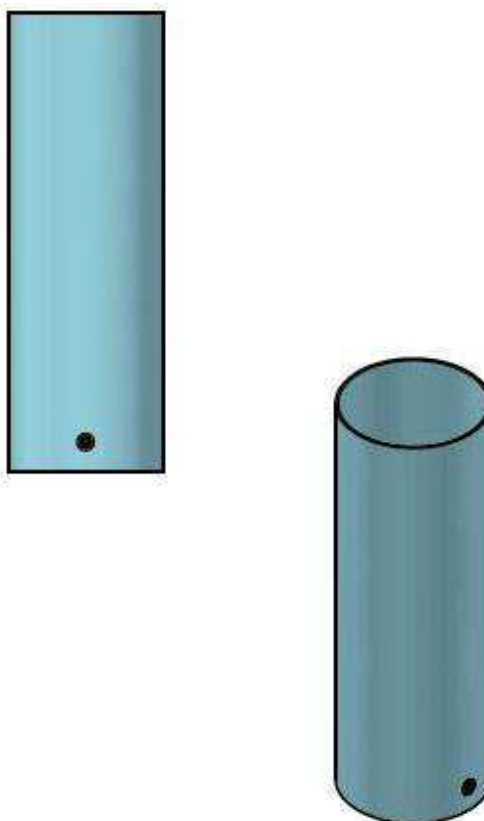


Fonte: o próprio autor

5.1.5. INVÓLUCRO ISOLANTE

O invólucro serve para isolar a estrutura como um todo e conseqüentemente proteger os componentes. Normalmente o material empregado é o epóxi ou PVC.

Figura 21 – Invólucro externo do divisor de tensão

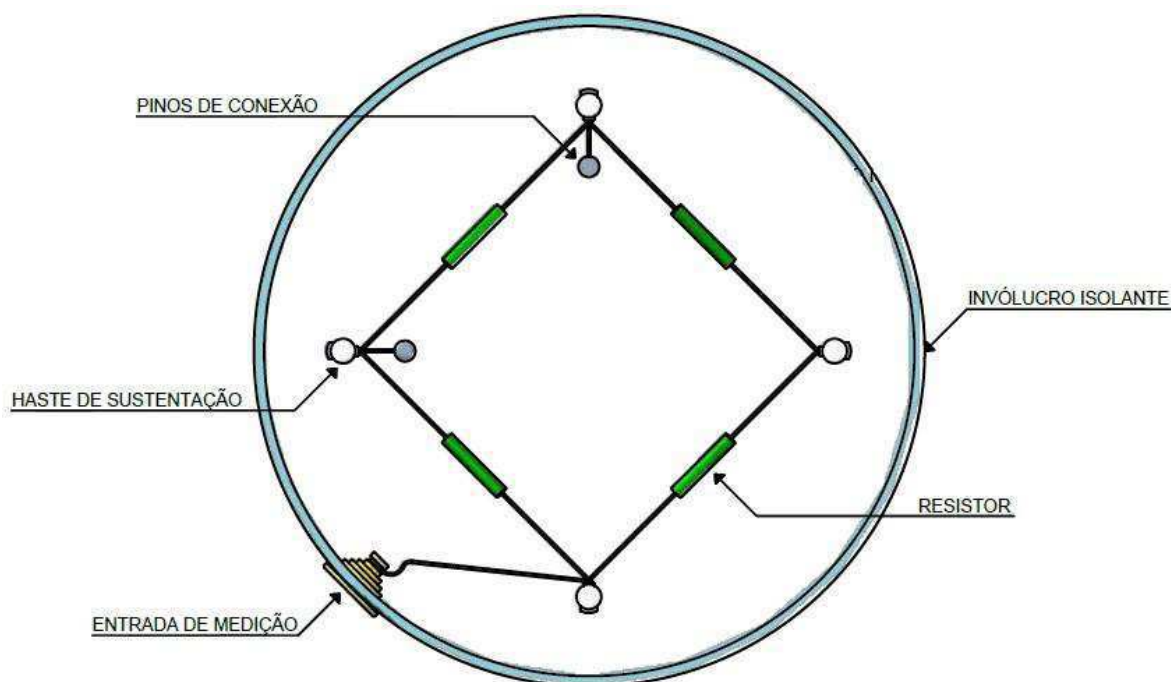


Fonte: o próprio autor

5.2. MONTAGEM DO DIVISOR DE TENSÃO

O modelo geral ao qual o trabalho foi baseado é proposto por Kind (1999). Assim, o arranjo escolhido para dispor os resistores ao longo das quatro hastes utilizadas constitui-se de uma configuração na qual estes percorrem toda a estrutura do equipamento em forma de zigue zague. O distanciamento entre um e outro é tal que um ângulo de 90° é formado entre eles.

Figura 22 – Vista superior do divisor de tensão resistivo



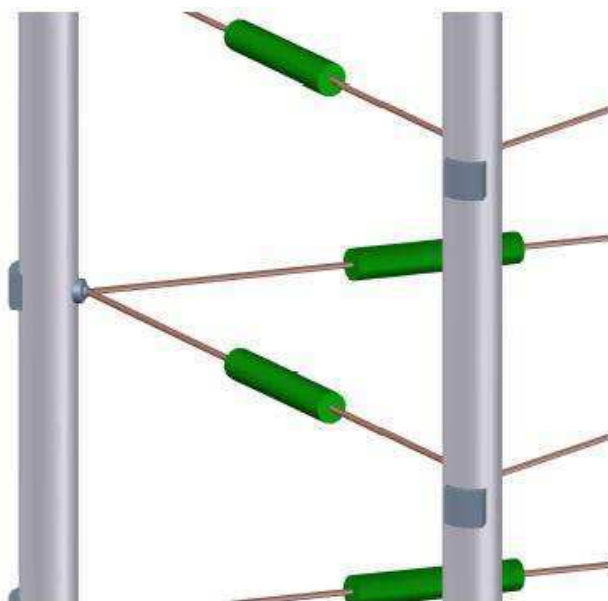
Fonte: o próprio autor

Na Figura 22 observa-se toda a disposição dos componentes envolvidos pelo invólucro. A depender do nível de tensão que será aplicado no divisor, o volume compreendido pelo invólucro pode ser preenchido por algum dielétrico, como óleo isolante. Essa é uma prática muito usada para aprimorar a isolação interna como também evitar possíveis descargas parciais ao longo do equipamento. Existem configurações em que se utilizam mais de uma camada de invólucro como é mostrada por Phoaphan (2013).

Um detalhe importante na peça é a conexão, por meio de um processo de soldagem, entre o pino e o fio condutor. Como foi dito anteriormente, uma ligação mal feita pode comprometer por completo o funcionamento adequado do divisor. Logo, pode-

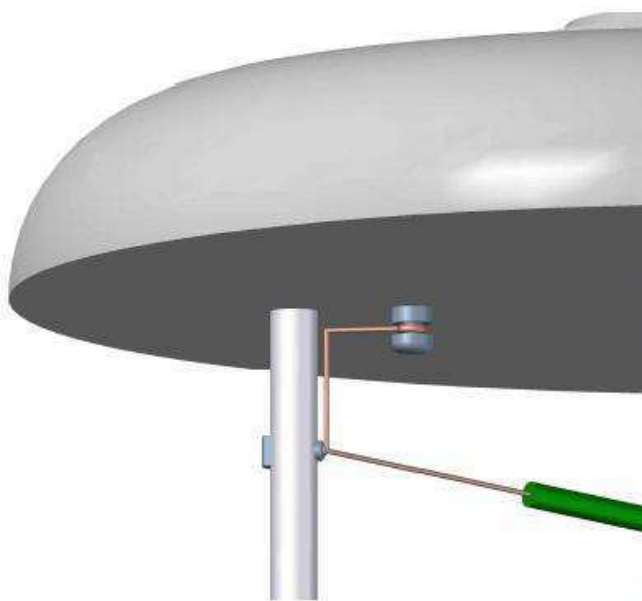
se dizer que esse procedimento é o mais minucioso a ser realizado na confecção do equipamento. A seguir encontram-se as ligações entre um pino encaixado na haste e um resistor (Figura 23), e de um pino fixado no eletrodo com um pino na haste (Figura 24). Esta última ligação permite que a tensão aplicada no eletrodo chegue ao resistores.

Figura 23 – Conexão entre resistores



Fonte: o próprio autor

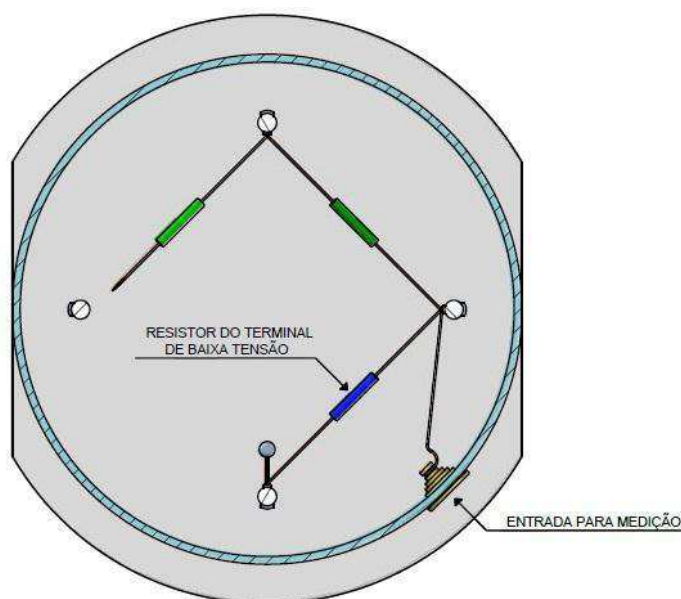
Figura 24 – Conexão entre o eletrodo e o resistor



Fonte: o próprio autor

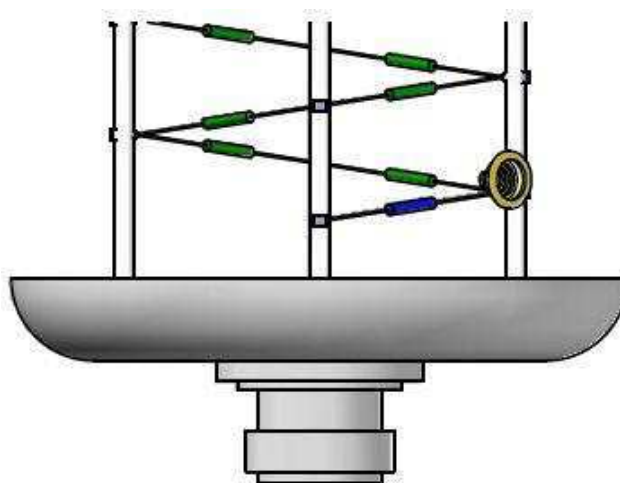
Como o divisor de tensão tem a função de reduzir a amplitude do sinal de tensão à valores típicos de operação de instrumentos de medição, faz-se necessário a presença de um terminal que ligue o ramo de baixa tensão do divisor ao sistema responsável por adquirir as informações de interesse. Os cortes mostrados nas Figuras 25 e 26 especificam o posicionamento do terminal de conexão.

Figura 25 – Corte transversal exibindo a conexão do ramo de baixa de tensão com o terminal de entrada para medição



Fonte: o próprio autor

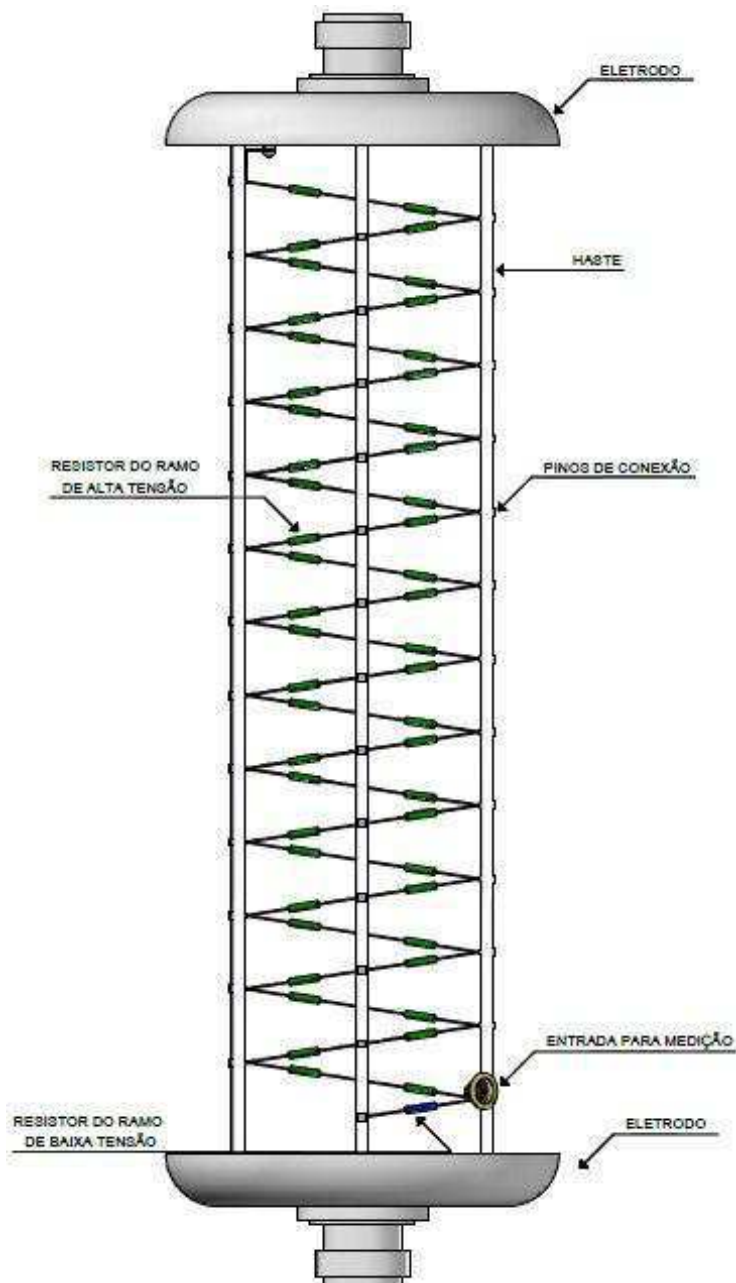
Figura 26 – Vista interna do divisor de tensão com destaque para o ramo de baixa tensão



Fonte: o próprio autor

Assim, tendo em vista todas as estruturas apresentadas anteriormente, o divisor de tensão resistivo pode ser representado por completo na Figura 27.

Figura 27 – Estrutura interna do divisor de tensão resistivo

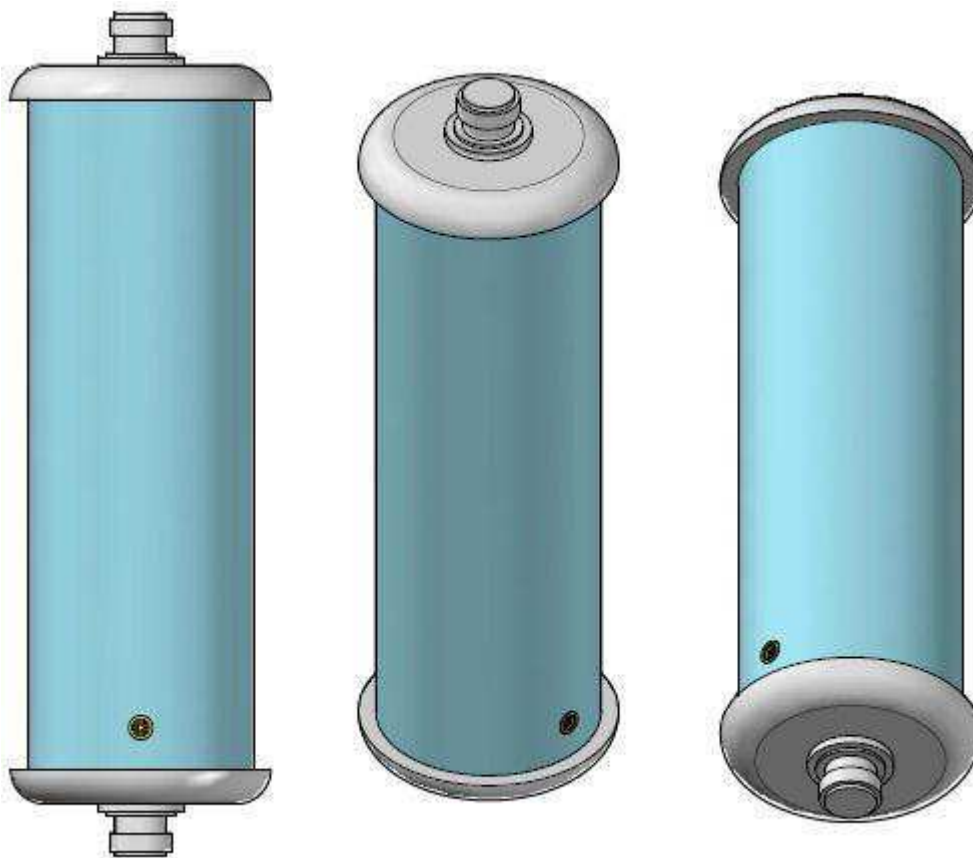


Fonte: o próprio autor

Na Figura 27 pode ser observada toda a estrutura interna (sem invólucro) do divisor. Um detalhe a ser destacado é o fato de que apesar dos resistores terem um espaçamento angular de 90° visto de cima, a visão frontal do equipamento mostra que

todos eles percorrem a estrutura em zigue zague. A seguir, na Figura 28, encontra-se o divisor em sua estrutura completa (com invólucro).

Figura 28 – Visão geral do divisor de tensão



Fonte: o próprio autor

Embora o próprio arranjo dos resistores melhore as condições de operação do divisor com a redução de efeitos parasitas e uma melhor distribuição de campo elétrico, em termos práticos outras medidas são constantemente utilizadas, como é o caso de anéis equalizadores ou a imersão da estrutura interna do divisor em óleo isolante.

6. CONCLUSÃO

Devido à demanda de energia elétrica estar sempre de forma ascendente e as cargas exigirem cada vez mais de um serviço de qualidade, o setor elétrico precisa acompanhar essa necessidade realizando grandes investimentos nos setores de geração, transmissão e distribuição de energia. Ligados a estes setores, pode-se destacar os sistemas de proteção e de medição. Nesse sentido, projetos de equipamentos que desenvolvam sua função de forma efetiva sem comprometer demais componentes é uma tendência a ser tomada nos dias de hoje.

Projetar um equipamento que suporte grandes estresses elétricos é uma tarefa um tanto quanto complicada, pois o surgimento de efeitos colaterais, como a dissipação de calor nos componentes e os campos elétricos gerados, podem comprometer toda a estrutura. Isso não é diferente para os divisores de tensão empregados em ensaios de alta tensão, onde a severidade das condições impostas a esse equipamento obriga que o mesmo seja qualificado e robusto o bastante para operar de forma satisfatória.

Assim, foi proposta a construção/modelagem de um divisor de tensão típico utilizado em ensaios de alta tensão, na qual foram mostrados todos os componentes utilizados na montagem, assim como as suas principais ligações.

O principal veículo que proporcionou toda a arquitetura do projeto mostrado nesse trabalho foi o *software* AUTOCAD. A modelagem 3D foi feita de tal maneira a representar de forma realística o equipamento como ele de fato é encontrado em laboratório. As vistas em perspectiva mostradas no trabalho reforçam a idéia proporcionando uma visualização tecnicamente completa da peça.

Portanto, em termos gerais, o trabalho mostrou-se como um guia de montagem de um divisor de tensão resistivo, exaltando principalmente o arranjo tomado e as principais considerações a serem adotadas.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como continuação do trabalho realizado, propõe-se:

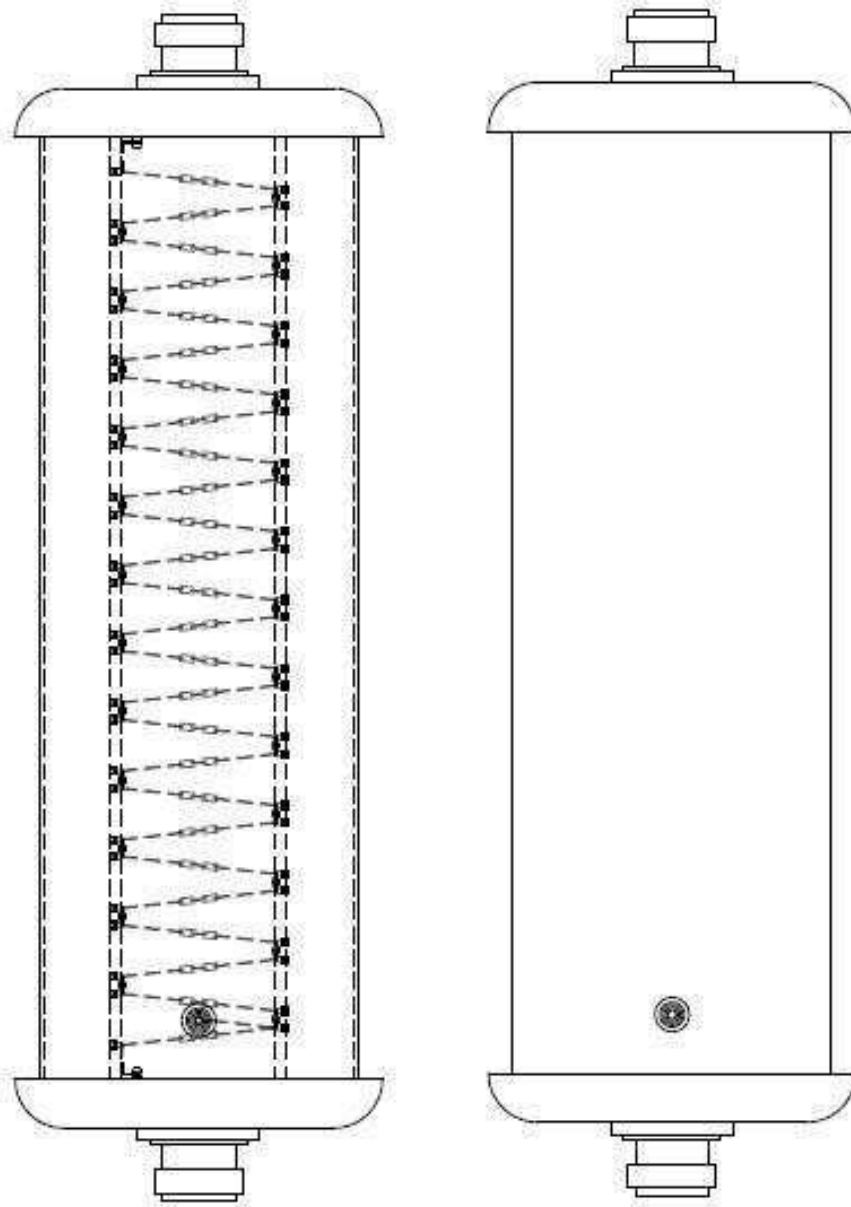
- Simular o funcionamento do divisor quando submetido a impulsos de tensão, analisando características como a dissipação de calor nos componentes, distribuição de campo ao longo da estrutura, etc.
- Colocar em prática a montagem do modelo;
- A partir do equipamento montado, aplicar impulsos de tensão e analisar a resposta do divisor;
- Utilizar a termovisão para analisar a distribuição de calor no divisor e posteriormente fazer um comparativo com as simulações feitas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering: fundamentals**. 2. ed. Newnes, 2000. 539 p.
- KING, D.; FESER, K. **High-Voltage Test Techniques**. 2.ed. New Delhi: Shankar's Book Agency, 1999. 308 p.
- DUARTE-RAMOS, H. **Divisores de alta tensão**. *Electricidade* 122. 1977. p. 471 - 479.
- RIVERA, P. A. R. **Estudo de um Sistema de Medição de Alta Tensão Impulsiva**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.
- LIU, Y.; LIN, F.; HU, G.; ZHANG, M. **Design and Performance of a Resistive-Divider System for Measuring Fast HV Impulse**. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 3, 2011.
- PAN, Y.; LAI, L.; SHAO, H.; ZHOU, L. R.; ZHAN, G. Z. **Numerical Simulation of the Influence of Shield Ring on the Unit Step Response of a 300 kV Standard Impulse Resistive Divider**. IEEE, 2012.
- CHAGAS, F. A.; OLIVEIRA, O. B.; CERQUEIRA, W. R.; ALVARENGA, E. **A 500 kV Reference Resistive Divider for HV Impulse Voltage Measurements**. Ninthe International Symposium on High Voltage Engineering. Austria, 1995.
- PHOAPHAN, B.; POTIVEJKUL, S.; CHAISIRI, P.; YUTTHAGOWITH, P. **Design and Construction of a Prototype Saline Solution Resistive Voltage Voltage Divider**. IEEE, 2013.
- BOGGS, S. A.; FITZPATRICK, G. J.; KUANG, J. **Transient Errors in a Precision Resistive Divider**. *Electrical Insulation, IEEE International Symposium*, 1996.
- NAPOLI, A. di.; MAZZETTI, C. **Eletrostatic and Electromagnetic Field Computation for the H.V. Resistive Divider Design**. *Power Apparatur ad Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-98, no. 1, 1979.

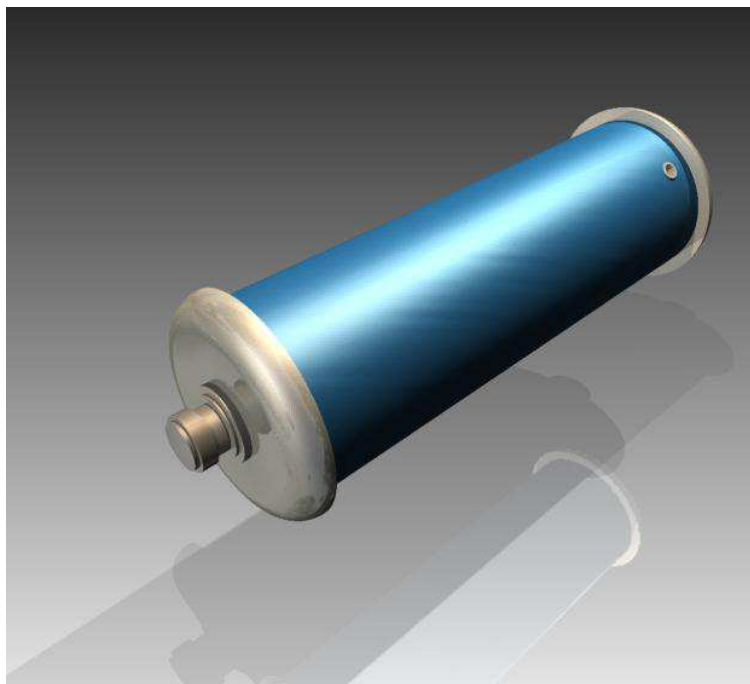
ANEXO A – VISTAS AUXILIARES

Figura 29 – Vista interna x externa



Fonte: o próprio autor

Figura 30 – Vista externa do divisor com aplicação de material



Fonte: o próprio autor

Figura 31 – Vista interna do divisor com aplicação de material



Fonte: o próprio autor