

A importância da Resistividade do Solo nas Instalações do SPDA.

Jonathan Carlyson Raposo

Estudante de Engenharia elétrica, Jabotão dos Guararapes, Brasil, jcrjcraposo@gmail.com

Josildo de Lira Silva

Estudante de Engenharia elétrica, Jabotão dos Guararapes, Brasil, josildollira@gmail.com

Silvio Jose da Silva

Estudante de Engenharia elétrica, Jabotão dos Guararapes, Brasil, silviosweet7@gmail.com

Sidney Rodrigues Cunha

Professor do Curso de Engenharia elétrica, UniFG, Jabotão dos Guararapes, Brasil, Sidney.aulas@gmail.com

RESUMO: De acordo com o grupo de eletricidade atmosférica (ELAT), com o passar do tempo as mudanças climáticas têm contribuído para um desordenamento das quantidades de chuva no Brasil, onde isso é reflexo do aquecimento global e que de fato alerta de grande quantidade de chuva e descargas elétricas tem causado diversos prejuízos materiais e até a morte de pessoas. Nesse trabalho você encontrará uma análise dos fatores que influenciam em um sistema de proteção contra descargas atmosférica, com ênfase na resistência de aterramento que de fato será de fundamental importância que a mesma esteja a menor possível para minimizar os efeitos dessa grande quantidade de energia. Além disso, o SPDA precisa estar em perfeitas condições de funcionamento de acordo com a norma brasileira regulamentadora 5419. Através de uma modelagem simplificada foi obtido os resultados que em condições de baixa frequência a resistência de aterramento é primordial para o funcionamento correto do sistema.

PALAVRAS-CHAVES: descargas atmosférica, resistência de aterramento, sistema de proteção contra descargas atmosféricas, aterramento.

ABSTRACT: According to the atmospheric electricity group (ELAT), over time, climate change has contributed to a disorder in the amounts of rain in Brazil, where this is a reflection of global warming and which in fact warns of large amounts of rain and electrical discharges have caused several material damages and even the death of people. In this work you will find an analysis of the factors that influence a lightning protection system, with emphasis on the grounding resistance, which in fact will be of fundamental importance that it is as small as possible to minimize the effects of this large amount of energy. In addition, the SPDA must be in perfect working condition according to the Brazilian regulatory standard 5419. Through a simplified modeling, the results were obtained that in low frequency conditions the grounding resistance is essential for the correct functioning of the system.

KEYWORDS: lightning, earthing resistance, lightning protection system, earthing.

1 1 Introdução

Segundo dados estatísticos do grupo de Eletricidade Atmosférica ELAT - INPE realizado entre os anos de 2000 a 2019 cerca de 78 milhões de raios caem no solo brasileiro todos os anos e a cada morte causada por descarga atmosférica no mundo 1(uma) ocorre no Brasil, o ELAT evidencia ainda que das mortes proveniente das descargas atmosféricas no Brasil durante este período de análise 26% ocorreram na área rural, 21% dentro de residências, 9% na água e/ou em sua proximidade, 9% sob árvores, 8% em área coberta, 7% em área descampada, 6% utilizando meios de transporte, 4% em rodovias estradas ou ruas, 4% próximas a cercas varais ou similares, 6% em outras situações, totalizando 2194 vítimas, destes acidentes a maioria 43% ocorreram durante a estação do verão, 33% na primavera, 16% no outono e 8% no inverno. De acordo com o Diário do Nordeste do Estado do Ceará, apenas em 2019 houve 8 acidentes fatais por incidência de raios no estado e nos dois primeiros meses de 2020 as descargas atmosféricas incidentes no estado já superaram o ano anterior.

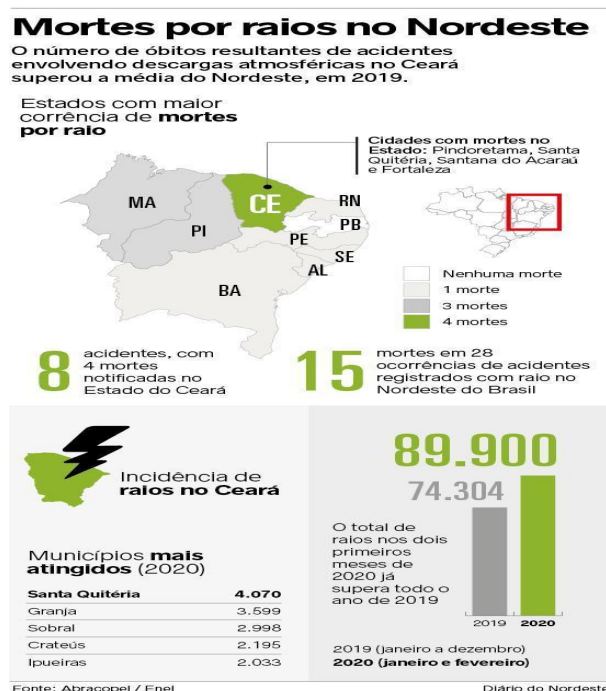


Figura 1: Dados do Diário do Nordeste no estado do Ceará - Fonte: Adaptado (Diário do Nordeste, 2020)

O ELAT revela que a urbanização contribui para a formação de tempestades pois os centros urbanos formam ilhas de calor causadas pela falta de vegetação e solos artificiais como os pisos de concreto e o asfalto, a construção de edificações elevada contribuem com a ocorrência dos raios ascendentes (que partem do solo em direção às nuvens) o sistema de transporte aéreo também é afetado pelas descargas atmosféricas os quais necessitam ser construídos com materiais específicos que venham a facilitar o escoamento das cargas pela fuselagem das aeronaves (geralmente a descarga entra pelo “nariz” e sai pela cauda da aeronave) outro setor bastante atingido por incidências de raios são os sistemas de transmissão e distribuição, 70% dos desligamentos da rede de transmissão e 40% da rede de distribuição são decorrentes das descargas atmosféricas e uma quantidade considerável de transformadores são danificados gerando prejuízos anuais da ordem de 1 bilhão de reais.

A temperatura global exerce grande influência sobre o clima e o surgimento de tempestades, A ONU através dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), tem buscado diversos engajamentos de forma a desenvolver empresas na área de preservação do meio ambiente e com isso obter uma harmonia entre o desenvolvimento e a inovação alinhada com a sustentabilidade. Com isso a ODS-09 tem por objetivo promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação, e através dessa iniciativa as indústrias poderão contribuir com o meio ambiente na redução de gases de efeito estufa e consequentemente evitando tempestades e assim reduzindo o número de descargas atmosféricas para a terra .

Descargas atmosféricas são grandes quantidades de energia que se deslocam de um local para outro na atmosfera, são causadas por acúmulos de cargas elétricas opostas entre pontos na atmosfera nos quais o campo elétrico atinge valores altos o suficiente para romper a rigidez dielétrica do meio existente entre os pontos em questão, uma vez superada a rigidez dielétrica (do ar 3 MV/m) dá-se início a um intenso fluxo de corrente elétrica em um breve intervalo de tempo, as intensidades dessas correntes ultrapassam facilmente os kA e frequências na faixa dos megahertz. Estas descargas podem ocorrer da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, da nuvem para pontos específicos ou entre nuvens (denominadas descargas no ar) sendo esta última a mais comum e representam cerca de 70% do total de descargas ocorridas segundo o site do Instituto Nacional de Pesquisas (INPE), ainda segundo este site os índices de descargas atmosféricas aumentam de acordo com a latitude geográfica, quanto mais próximo à linha do equador maior o índice, esse fenômeno traz consigo um grande potencial destrutivo principalmente quando ocorre nas grandes cidades onde a densidade demográfica é bem maior, com o intuito de evitar ou no mínimo amenizar os danos potenciais das descargas atmosféricas foi desenvolvido dispositivos de captação das mesmas chamados popularmente de “para-raios” ou mais tecnicamente, sistema de proteção contra descargas atmosféricas SPDA. este sistema é interligado física e eletricamente ao sistema de aterramento, a eficácia deste último (e consequentemente de todos os outros) depende 100% da resistividade do solo, parâmetro este que pretendemos demonstrar a sua importância.

2. Referencial Teórico

2.1 As Nuvens de tempestade

De acordo com a dissertação de Marcio Severino da Silva submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia elétrica da Universidade Federal de Pernambuco para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia elétrica, sob o título de: Análise de desempenho de redes de distribuição monofilares com retorno pela terra (MRT) frente a descargas atmosféricas, o fenômeno da eletrificação no interior da nuvem não é algo totalmente claro para a ciência, situação esta que resulta em várias hipóteses sobre o assunto, no entanto há um consenso no meio acadêmico de que as cargas opostas que surgem no interior de uma nuvem de tempestade é decorrente das correntes de ar ascendentes e descendentes que são mecanismos dinâmicos denominados de forçantes de acordo com o INPE. Como exemplo de forçantes podemos citar as brisas marítimas, as frentes de ar, as ilhas de calor e os ventos que incidem sobre cadeias de montanhas e são desviados verticalmente. Ainda de acordo com o Grupo de Eletricidade Atmosférica, ELAT - INPE uma nuvem de tempestade é composta de aproximadamente meio milhão de toneladas de gotículas e pequenos fragmentos de gelo de diversas dimensões e deste montante apenas 20% chega até a superfície terrestre em forma de chuvas, no interior da nuvem estas partículas são elevadas por correntes de ar ascendentes com velocidades que varia desde alguns km/h a aproximadamente 100 km/h, em contrapartida devido a ação da gravidade essas partículas tendem a cair, conforme ilustra a imagem abaixo:

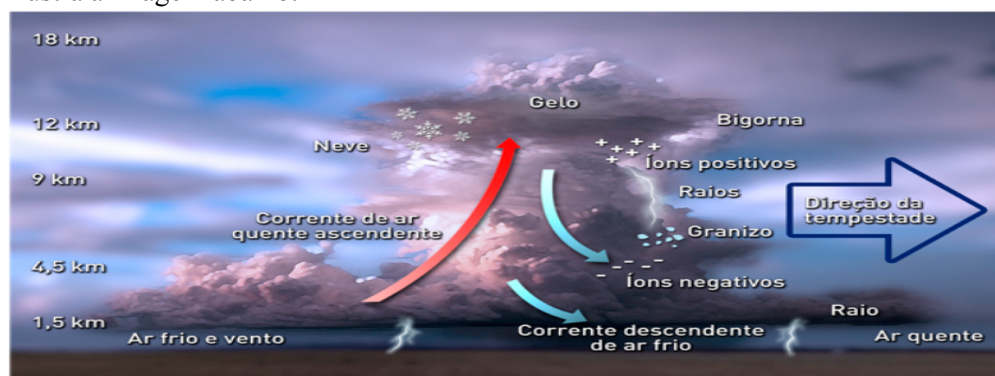


Figura 2: Formação de nuvem de tempestade - Fonte: Adaptado (INPE,s/d)

Basicamente três fatores influenciam no processo de formação de nuvem de tempestade, são eles: a umidade do ar, as forçantes e o grau de instabilidade atmosférica, este últimos está relacionado com a variação da temperatura da atmosfera à medida que a altura aumenta, ela determina a capacidade pela qual a atmosfera permite a ascensão de uma massa de ar verticalmente por intermedio de uma forçante, à medida em que o ar úmido atinge camadas mais elevadas da atmosfera a temperatura reduz-se drasticamente congelando muitas gotículas de água, porém devido a condensação ainda ser reduzida muitas partículas de água super-resfriada permanece a subir atingindo alturas em que a temperatura encontra-se em torno de -40°C fazendo com que estas gotículas super-resfriadas se solidifiquem instantaneamente, este processo no interior da nuvem é o responsável por gerar as cargas no interior das mesmas, geralmente as nuvens apresentam cargas positivas em seu topo enquanto que em sua base as cargas predominantes são as negativas, estas cargas fazem surgir por indução cargas positivas no solo logo abaixo da nuvem e quando o campo elétrico entre a nuvem e o solo se torna superior a rigidez dielétrica do ar entre estes dois pólos ocorre a descarga elétrica.

2.2 Formação das descargas elétricas na atmosfera

Segundo o ELAT as descargas elétricas atmosféricas são descargas de grande extensão cuja condução de corrente elétrica varia entre centenas de ampères até os milhares de ampères, essa descarga ocorre quando o campo elétrico entre pontos da atmosfera supera a rigidez dielétrica do ar, algo em torno dos 30 kV/cm , a descarga é conduzida por um canal de alguns centímetros de diâmetro e sua temperatura atinge facilmente dezenas de milhares de graus Celsius gerando uma pressão de dezenas de atmosferas, esses fenômenos resultam no clarão visto durante uma descarga atmosférica ou seja o raio, e a elevada pressão resulta no trovão, o raio é estabelecido através de múltiplas descargas, denominadas por descargas de retorno, embora a olho nú o relâmpago se apresente de forma contínua.

2.3 Raios de polaridade negativa

Estabelecido por diversas etapas o raio de polaridade negativa tem início na região negativa da nuvem dirigindo-se ao solo e possui uma duração de aproximadamente 10 ms o qual é chamado de quebra de rigidez preliminar no final deste período inicia-se uma descarga luminosa no espectro invisível ao olho humano denominado de líder escalonado que se propaga a aproximadamente 40.000 km/h através do canal do relâmpago, pelo fato de o líder escalonado transportar cargas negativas o mesmo é chamado de líder escalonado negativo.

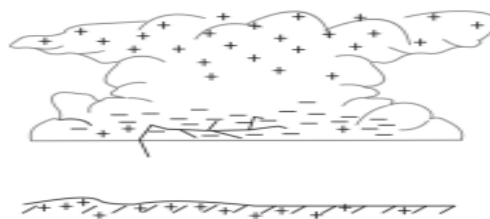


Figura 3: Formação da descarga atmosférica - Fonte: Adaptado (Visacro Filho, 2005)

2.4 O líder escalonado

O líder escalonado percorre um caminho tortuoso que varia entre 30 a 100 m durando aproximadamente 1 ms , essa tortuosidade é decorrente da busca pelo caminho mais curto para a formação do canal do relâmpago, a corrente do líder escalonado varia entre centenas de Ampères a quiloampères e embora ele se ramifique em diversos “braços” geralmente apenas um completa o circuito até o solo, porém antes de atingir o solo o líder escalonado provoca um campo elétrico tão intenso que faz surgir um líder escalonado ascendente positivo partindo de várias partes do solo em

direção ao líder escalonado negativo descendente inicial, a estes líderes escalonados ascendentes positivos dá-se o nome de líderes conectantes.

2.5 Descarga de retorno

A conexão entre o líder escalonado e o líder conectante faz com que um grande fluxo de corrente elétrica ocorra no canal em direção ao solo a uma velocidade de aproximadamente 40.000 km/h com a duração de aproximadamente 100 μ s, a essa junção dá-se o nome de descarga de retorno cujos picos de corrente varia entre 30 kA a 280 kA, porém valores superiores a 200 kA correspondem a menos de 0,1% das descargas. A descarga de retorno atinge o valor máximo em aproximadamente 10 μ s e reduz-se em 50% do valor máximo entre aproximadamente 200 a 400 μ s, antes do encontro entre o líder escalonado e o líder conectante verificamos uma lenta variação no fluxo de cargas passando a apresentar maior variação pouco antes de atingir o pico e reduz-se novamente após o pico, isto se deve ao fato de que teremos menos cargas no topo do canal, a carga transferida ao solo é de aproximadamente 10 coulombs. Ao fim da primeira descarga de retorno se não ocorre nova descarga o raio é denominado de raio simples e apenas 20% das descargas são de raios simples, no entanto para que surjam novas descargas é necessário que no interior da nuvem novas cargas (cargas k) se movam até o ponto de origem do líder escalonado a essas novas descargas são dadas o nome de descargas subsequentes.

2.6 Líder contínuo

Quando novas cargas são transportadas para o local de origem do líder escalonado dá-se o nome de líder contínuo que estabelecerá a descarga de retorno subsequente, embora possua o nome de contínuo ele se propaga como um segmento de 10 a 10 m ao longo do canal anteriormente ionizado possui duração de aproximadamente 1 ms a uma velocidade de 40.000 km/h sua corrente fica em torno de 1 kA e a carga transportada em torno de 1 coulomb. O líder escalonado contínuo pode desviar-se do canal devido ao decaimento do canal já estabelecido ou devido aos fortes ventos comportando-se como um líder escalonado e por isso denominado de líder contínuo- escalonado e um novo canal será estabelecido com um novo líder conectante, dando origem aos denominados raios bifurcados cuja a predominância é em torno de 30 a 50% dos raios.

2.7 Raios múltiplos

Os raios múltiplos são raios com várias descargas de retorno subsequentes, seus picos de corrente tendem a ser menores que a descarga de retorno inicial chegando em torno de 10 kA, atinge valores de pico mais rapidamente e em torno de 1 μ s.

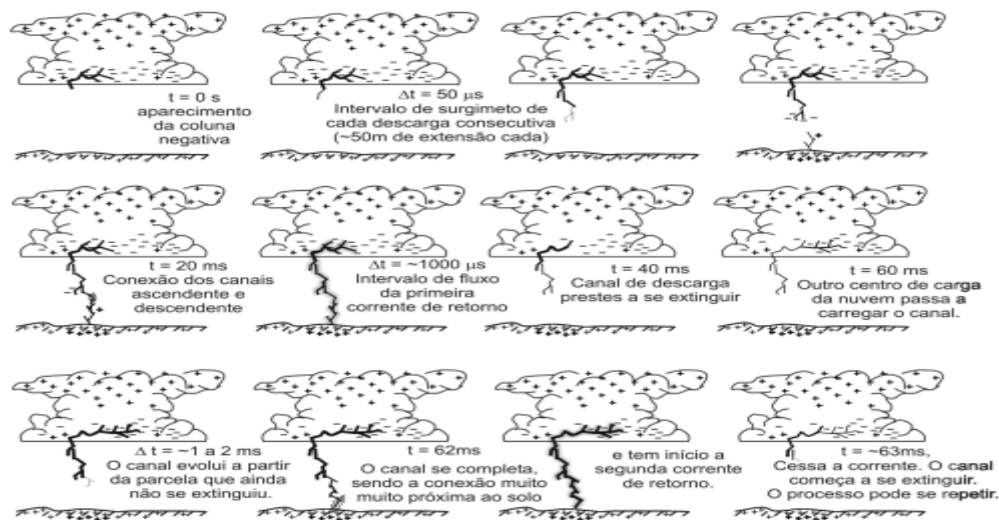


Figura 4: Raios Múltiplos até uma evolução subsequente - Fonte: Adaptado (Visacro Filho, 2005)

2.8 Raios de polaridade positiva

São originados de uma região de cargas positivas dentro da nuvem, apresentam luminosidade contínua e periódica geralmente apresentam apenas uma descarga de retorno cuja intensidade é um pouco superior a descarga dos raios negativos.

2.9 Danos gerados por descargas atmosféricas

Segundo Silvério Visacro Filho a impedância do corpo humano apresenta-se em torno de 300 a 600Ω e a energia média transferida em uma descarga negativa é de $5 \times 10^4 A^2 s$, se considerarmos uma pessoa cuja impedância fosse de 500Ω a corrente de descarga seria capaz de transferir à pessoa e $2,5 \times 10^4 kJ$ se considerarmos o tempo de duração dessa descarga como sendo de 0,5s a potência média dissipada seria de 50.000kW, potência suficiente para carbonizar os tecidos. As estruturas de edificações também são afetadas por descargas atmosféricas que chegam destacar partes de alvenarias, as ondas de choque geradas nas proximidades dos raios causam a quebra de janelas, fissuras nas paredes e a incidência direta dos raios causam incêndios em florestas e residências de madeira além dos danos causados às linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, em virtude desses riscos faz-se necessária medidas de proteção que venham garantir a segurança das pessoas e dos animais tanto quanto a integridade e confiabilidade das estruturas e sistemas necessários à sociedade.

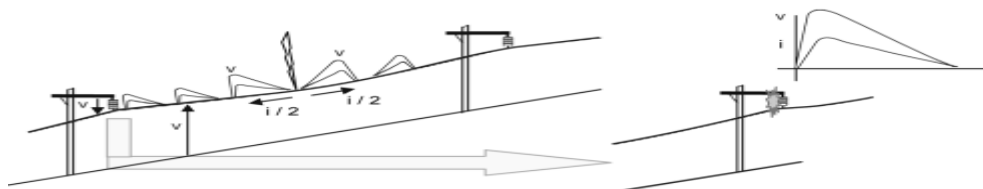


Figura 5: Sobretensão no sistema elétrico devido descarga atmosférica - Fonte: Adaptado (Visacro Filho, 2005)

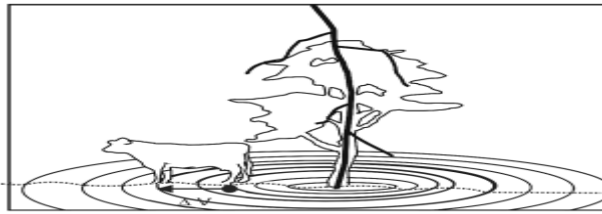


Figura 6: Animal submetido à diferença de potencial devido à incidência de uma descarga próxima -
Fonte: Adaptado (Visacro Filho, 2005)

2.10 Sistema de proteção contra descargas atmosférica - SPDA

De acordo com a NBR-5419 de 2015 não existem dispositivos capazes de eliminar descargas atmosféricas e que essas descargas tem um alto potencial de causar danos às estruturas como também à vida como ilustrada na figura seguinte e que dessa forma foi feito todo um estudo com o intuito de minimizar esses impactos.



Figura 7: Descargas Atmosféricas - Fonte: Adaptado (INPE,s/d)

Um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) tem por objetivo principal evitar a incidência direta de raios na estrutura a ser protegida além de captar a descarga atmosférica, deve direcionar o fluxo da corrente associada diretamente para o solo, segundo percursos definidos, constituído pelos condutores do sistema de proteção.

Uma inspeção visual do SPDA deve ser efetuada anualmente, já as inspeções completas devem ser efetuadas periodicamente, sendo 5 anos, para estruturas destinadas a fins residenciais, comerciais, administrativos, agrícolas ou industriais, excetuando-se áreas classificadas com risco de incêndio ou explosão; 3 anos, para estruturas destinadas a grandes concentrações públicas (por exemplo: hospitais, escolas, teatros, cinemas, estádios de esporte, centros comerciais e pavilhões), indústrias contendo áreas com risco de explosão, conforme a NBR 9518, e depósitos de material inflamável e 1 ano, para estruturas contendo munição ou explosivos, ou em locais expostos à corrosão atmosférica severa (regiões litorâneas, ambientes industriais com atmosfera agressiva etc.).

O SPDA é dividido em três partes que são os captadores, que estão recebendo as descargas na cobertura das edificações, os condutores de descida, que conduzem a descarga em direção ao solo, e a malha de aterramento, que é responsável por dissipar toda essa descarga para o solo.

Abaixo tem-se os três tipos de sistemas mais utilizados:

No método Gaiola de Faraday, o campo elétrico na parte interna de uma gaiola é nulo, mesmo levando em consideração a passagem de uma corrente elevada de uma descarga. Mas para que isso aconteça é necessário que a corrente seja distribuída de maneira uniforme. Nesse sistema usa-se captadores e terminais aéreos

distribuídos de forma a proteger toda a edificação. Esses terminais são interligados e vão em direção ao aterramento.

No Método Franklin, o raio se forma naturalmente e o pára-raios apenas recebe e conduz a descarga elétrica para o aterramento. De forma cônica a, onde o captor atrai a descarga atmosférica fica no vértice e conduzida através dos cabos de descida. O raio de atuação varia de acordo com a altura de instalação sendo, altura máxima de 45 metros ou 15 andares, com uma flecha de proteção de 25°. Por isso, o SPDA com Ponta Franklin só é utilizado em edifícios de porte menor.

Com o método modelo eletrogeométrico, é feito uma simulação com uma esfera cujo raio é determinado pelo nível de proteção desejado. Neste modelo a esfera se movimenta por toda a área externa da edificação e os locais mais dispostos a uma descarga e instalado terminal aéreo.

De acordo com (SOUZA 2020), os sistemas elétricos são cada vez mais complexos e com isso a confiabilidade e eficiência desses dispositivos dependem do sistema de proteção contra descargas atmosféricas-SPDA. A função desse dispositivo é proteger as edificações e instalações elétricas e de telefonia dessas descargas e além disso evitar desligamentos e surtos nos equipamentos.

Segundo o grupo de eletricidade atmosférica ELAT que pertence ao INPE, todos os anos são cerca de 78 milhões de descargas e que a cada 50 mortes no mundo 1 acontece no Brasil, e que do ano 2000 a 2019 foram 2194 mortes e que dessas mortes cerca de 33% foram em áreas rurais (Figura 8) e que 43% acontecem no verão por conta das altas temperaturas e consequentemente evaporação das águas, e com isso percebemos que essas áreas não existem dispositivos de segurança como o SPDA- com isso as pessoas perdem suas vidas como também animais nas suas fazendas pela falta de algo que possa minimizar esses danos.

2.11 Sistema de aterramento

O intuito do sistema de aterramento tem a finalidade de fornecer um caminho seguro, sob controle e baixa impedância para a proteção de pessoas e animais da exposição ao potencial de risco. Sobretudo tal sistema refere-se a prevenção de danos à edificações e imposição de propriedade ocasionado por correntes destrutivas causadas por imprecisões no isolamento ou ligações acidentais impróprias. (PINHEIRO, 2013).

O sistema de aterramento é, de fato, a interface entre o sistema de aterramento e toda a terra, e é em consequência dessa interface que ocorre o contato elétrico entre os dois (sistema de aterramento e "terra").

Em inúmeras situações, a falta de técnicas para efetivar um aterramento eficaz, ocasiona a queima de equipamentos, ou pior, o choque elétrico no operador desses equipamentos.

Consequente, não é necessário que os sistemas elétricos tornem-se respaldados ao aterramento para trabalharem, todavia o desenvolvimento histórico dos sistemas elétricos transmitiu as soluções de proteção desses sistemas para a categoria de que as tensões foram referenciadas a terra. (PINHEIRO, 2013). Um bom sistema de aterramento além de permitir o escoamento de cargas por motivos de falta, como curto-circuito e descargas atmosféricas, deve prover condições para que a diferença de potencial no solo gerada por impulsos eletromagnéticos não atinjam valores perigosos aos seres vivos. O aterramento também é utilizado como retorno e consequentemente o fechamento do circuito elétrico em sistema MRT(monofásicos com retorno pela terra)usualmente empregado na área rural, quando se aterrar o neutro de uma instalação a protege de sobretensões que podem surgir no sistema essas são algumas das aplicações e vantagens que o aterramento fornece ao sistema elétrico.

De acordo com a NBR 5410 existem três tipos de esquemas de aterramento a saber: TN, TT e o IT, sendo que o esquema TN possui três variantes conforme as imagens a seguir.

Com o modelo TN o aterramento possui apenas um ponto onde os equipamentos são conectados e através de um condutor proteção ou de proteção mais o neutro possuindo suas variantes.

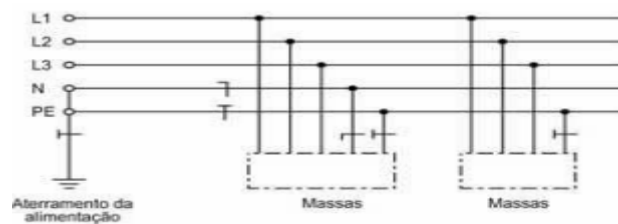


Figura 8 - esquema TN-S – Fonte: (NBR 5410, 2008)

No TN-S o condutor do neutro e o condutor de proteção são diferentes.

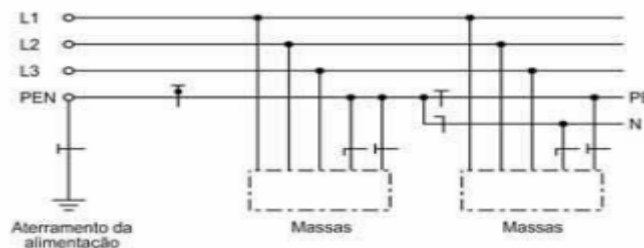


Figura 9 - esquema TN-C-S – Fonte: (NBR 5410, 2008)

No TN-C-S o condutor do neutro e o condutor de proteção são separados em uma parte do sistema.

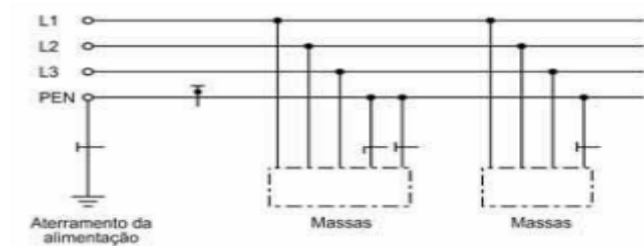


Figura 10 - esquema TN-C – Fonte: (NBR 5410, 2008)

No TN-C o cabeamento elétrico do neutro e o de proteção são únicos em todo o circuito.

De acordo com a NBR 5410 o modelo TT o aterramento é conectado de forma distinta ao da alimentação, conforme a figura abaixo:

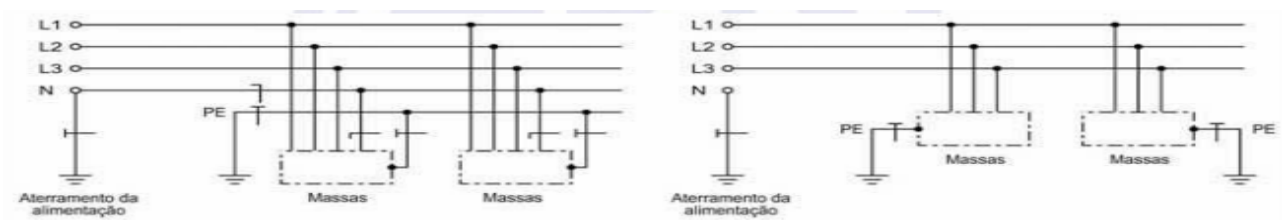


Figura 11 - esquema TT – Fonte: (NBR 5410, 2008)

No modelo IT as massas são conectadas à terra por meio de uma impedância.

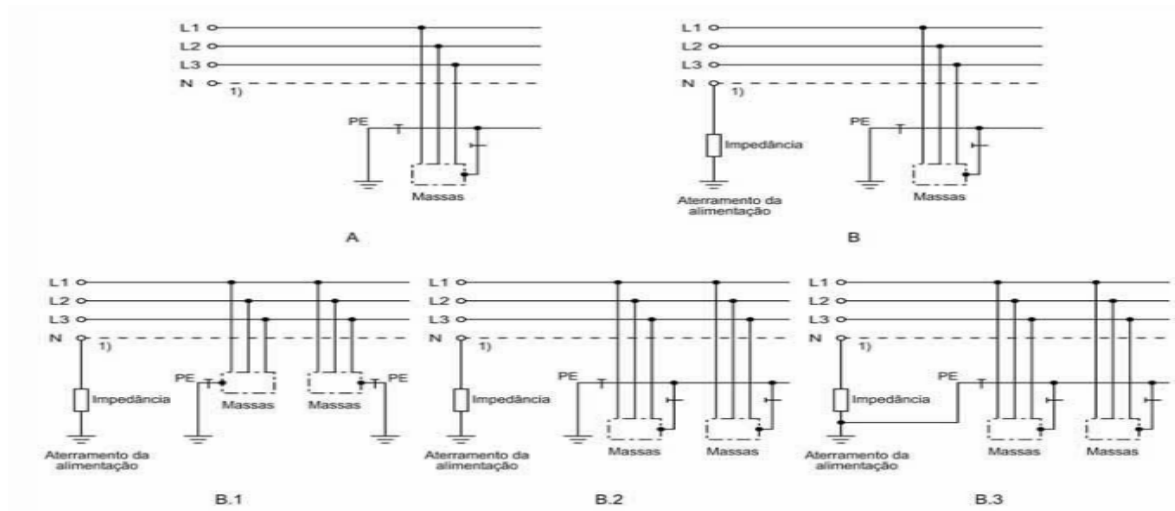


Figura 12 - esquema IT – Fonte: (NBR 5410, 2008)

Porém para que o sistema de aterramento desempenhe perfeitamente a sua função a resistividade do solo necessita prover as condições mínimas para o escoamento das cargas.

2.12 A resistividade do solo

Informações a respeito da resistividade do solo são imprescindíveis para a elaboração de um bom sistema de aterramento. A resistividade do solo nos informa o quanto um solo resiste à passagem de uma corrente elétrica por ele, segundo Silvério Visacro Filho, a resistividade do solo é a resistência elétrica medida em um cubo de 1 unidade de aresta e isotrópico (corpo cujas propriedades físicas são constantes em todas as direções) e que possui composição homogênea, na prática a resistividade do solo depende de vários fatores como formação geológica, pressão, umidade, profundidade, composição química, concentração de sais dissolvidos, tamanho e disposição da partícula do material que o compõe. Caso o solo fosse composto por um material homogêneo a corrente elétrica se dissiparia de forma radial, porém como na realidade isso não ocorre encontram uma variação enorme da resistividade do solo em uma mesma localidade, devido a essa grande variação a medição da resistividade do solo se faz indispensável para a elaboração do sistema de aterramento que garantirá o perfeito funcionamento dos dispositivos de proteção, permitirá o escoamento de cargas provenientes do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, fornecerá um caminho direto à terra para cargas eletrostáticas e para correntes de falta, é com os valores da resistividade do solo que o dimensionamento, os materiais e o formato do sistema de aterramento será definido e um sistema de aterramento só será considerado adequado quando obtida a menor resistência possível. Porém a modelagem da resistividade do solo apresenta-se de forma diferente para baixas e altas frequências, pois a conexão do sistema elétrico com a terra apresenta resistência, capacitância e indutância que para as baixas frequências como as de um curto-circuito e resistividade do solo relativamente baixa pode ser considerado apenas o efeito resistivo.

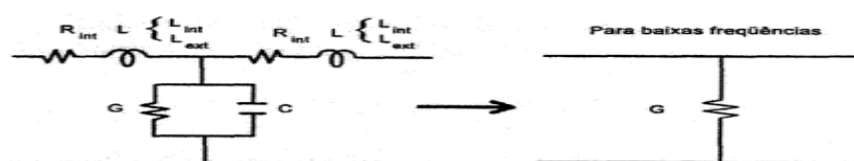


Figura 13 – Modelagem de um eletrodo em contato com o solo para baixas frequências, simplificação.–
Fonte: Adaptado (Visacro Filho, 2005)

já para impulsos eletromagnéticos como as descargas atmosféricas os efeitos capacitivos, indutivos e resistivos devem ser considerados.

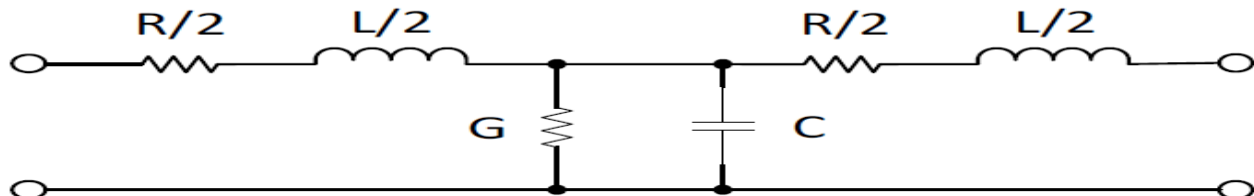


Figura 14 - Modelagem de um eletrodo em contato com o solo para altas frequências– Fonte:Adaptado (Visacro Filho, 2005)

Segundo Miguel de Brito Guimarães Neto em sua dissertação de mestrado de número 791 intitulada como: Investigação da resposta de malhas de aterramentos frente a correntes de descargas atmosféricas, com o aumento da frequência o módulo da impedância reduz de valor, fato este que indica predominância do efeito capacitivo porém esta redução se dá até certos valores de frequência, além desses valores o módulo da impedância passa a aumentar e pode atingir valores superiores ao da resistência de aterramento em baixas frequências, ainda segundo o mesmo autor o desempenho de um sistema de aterramento é usualmente atribuído a apenas a resistência de aterramento que para baixas frequências torna se razoável, porém para frequências elevadas o efeito capacitivo deve ser levado em consideração pois a relação entre a corrente de condução e a corrente capacitiva do solo podem chegar a 1 unidade de ordem de grandeza dada por $\sigma/\omega\epsilon$, onde σ refere-se a condutividade do solo, ϵ refere-se à permissividade do solo e ω a frequência considerada, além disso deve ser considerado os efeitos mútuos dos eletrodos cravados no solo decorrentes do arranjo adotado para os mesmos.

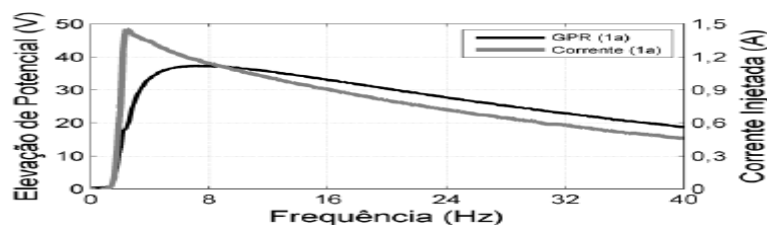


Figura 15 - Efeito capacitivo na malha de aterramento representado pela não simultaneidade nos picos das ondas de corrente e de elevação de potencial – Fonte:Adaptado (Visacro Filho, 2005)

2.13 Métodos de medição da resistividade do solo

Devido ao fato do solo não apresentar-se homogêneo o mesmo possui variação quanto a sua resistividade a profundidades diferentes sendo geralmente composto por camadas horizontais paralelas à superfície do solo em decorrência deste fato a corrente elétrica não se dispersa uniformemente, sendo portanto necessária a sua medida a qual se dá por meio de sondagem elétrica vertical, amostragem do solo, método da variação da profundidade, método dos dois pontos e método dos quatro eletrodos, dentre estes o método dos quatro eletrodos é um dos mais difundidos, os quais apresentam alguns arranjos, como o modelo arranjo do eletrodo central, arranjo de lee, arranjo de wenner e arranjo de schlumberger-palmer.

Dentre estes arranjos focaremos no arranjo de Wenner o qual determina que quatro eletrodos devem ser cravados no solo alinhados entre si e com igual espaçamento sendo que a parte encravada não deve ultrapassar 10% do espaçamento entre os eletrodos, este método considera que 58% da corrente elétrica que flui entre os eletrodos mais externos C1 e C2 ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre os eletrodos, neste arranjo os eletrodos internos P1 e P2 são eletrodos de potencial, conforme ilustra a figura a seguir.

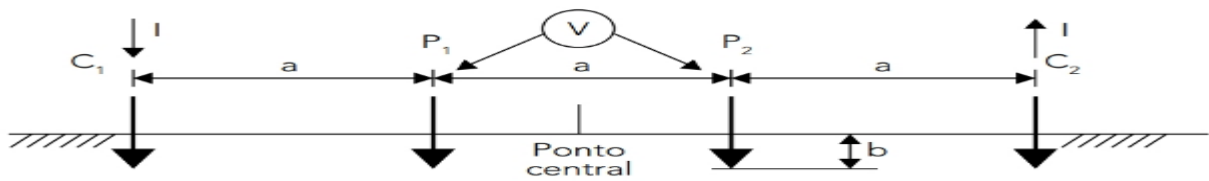


Figura 16. Método/arranjo de Wenner - Fonte: Adaptado (SOUZA-RODRIGUES- BORELLI-BARROS, 2020)

Os eletrodos C1 e C2 são responsáveis por injetar uma corrente elétrica no circuito de medição e os eletrodos P1 e P2, como dito anteriormente, são os responsáveis por realizar a leitura da queda de potencial, o aparelho então (terrômetro) fará a divisão do valor lido da tensão pela intensidade da corrente elétrica injetada fornecendo como resultado um valor de resistência a qual deverá ser tabelada juntamente com as medições neste mesmo ponto porém com espaçamento entre as hastes para os valores 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 metros a figura seguinte mostra o esquema simplificado do circuito do terrômetro e a representação das resistências dos eletrodos (R_1 , R_2 , R_3 e R_4), assim como a resistência do solo (R_i).

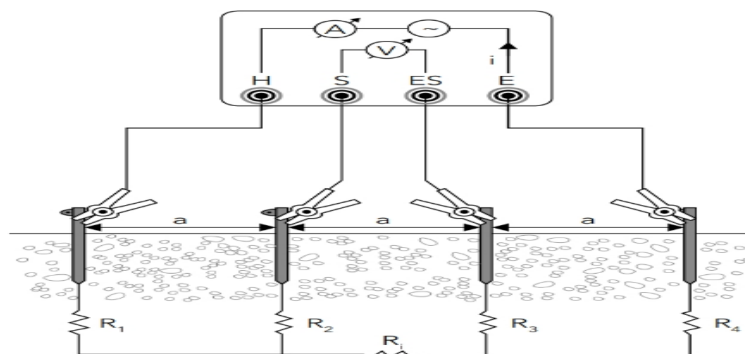


Figura 17. Circuito de um terrômetro e esquema das resistências dos eletrodos e do solo - Fonte: Adaptado (SOUZA-RODRIGUES- BORELLI-BARROS, 2020)

Os locais das medições e os espaçamentos dependem das dimensões do terreno e das condições do local porém a NBR 7117 estabelece que os mesmos sejam padronizados e que o maior espaçamento seja no mínimo correspondente a diagonal do terreno considerado, as figuras seguintes exemplificam o exposto:

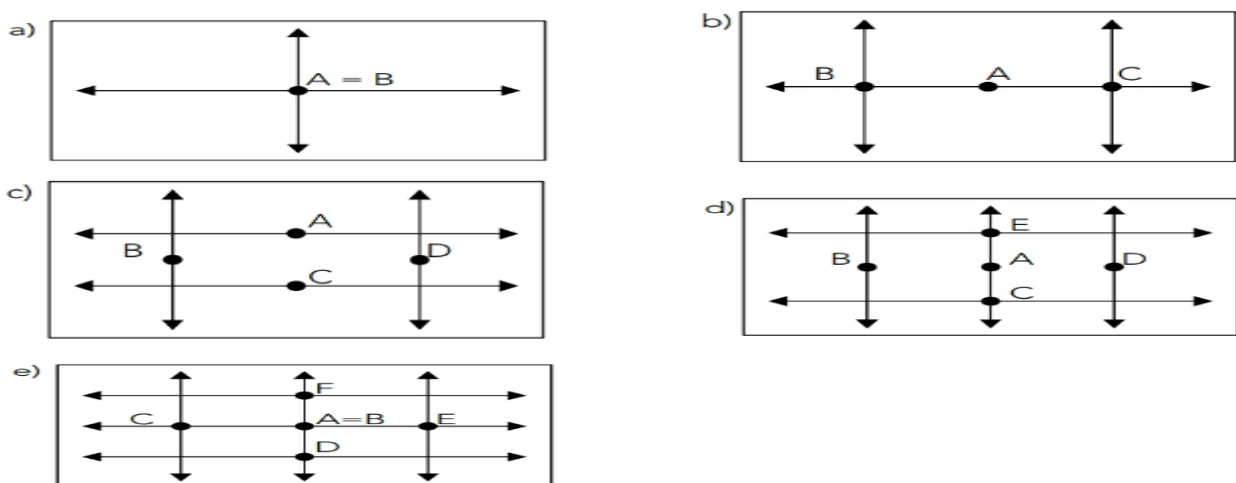


Figura 18. Pontos e direções (a- para área <1000m²), (b- entre 1000 e 2000m²), (c- entre 2000 e 5000m²), (d- entre 5000 e 10000m²), (e- entre 10000 e 20000m²) - Fonte: Adaptado (SOUZA-RODRIGUES- BORELLI-BARROS, 2020)

Após a definição da quantidade de pontos e das direções a ser realizada essas medições, os resultados devem ser inseridos em uma planilha para poder ser avaliado e descartados alguns valores conforme sequência descrita logo abaixo:

- Para cada espaçamento, calcular a média aritmética da resistência.
- calcular a diferença entre o valor da resistência de cada espaçamento e a média anteriormente calculada.
- Desconsiderar todas as resistências cuja a diferença entre o valor de resistência e a sua média seja superior a 50%, os valores inferiores serão considerados.
- Se houver uma grande quantidade de valores superior a 50% em relação à média então devemos proceder com novas medições e se mesmo assim essa divergência permanecer essa área deverá ser considerada à parte.
- Com a remoção dos valores das resistências que excederam os 50% em relação à média, uma nova média deverá ser calculada com valores menores que 50%.
- de posse dos valores da resistência média de cada espaçamento já dispomos das bases para traçarmos a curva ($\rho \times a$) necessária para iniciarmos a estratificação do solo em camadas de resistividade.

Sendo “ ρ ” a resistividade encontrada e “ a ” a distância em metros.

2.14 Estratificação do solo em duas camadas simplificada

A estratificação do solo é a divisão do solo em diversas camadas horizontais e paralelas à superfície com suas respectivas profundidades, conforme exemplifica a figura seguinte:

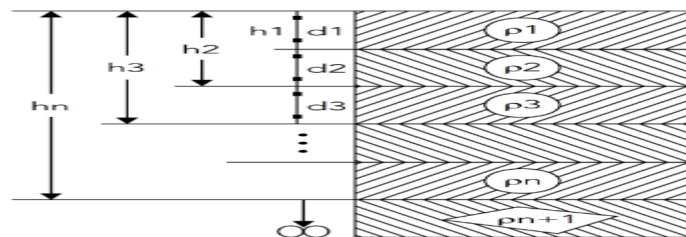


Figura 19. Exemplo de estratificação do solo - Fonte: Adaptado (SOUZA-RODRIGUES-BORELLI-BARROS, 2020)

Se tomarmos como referência a tabela apresentada a seguir, na qual constam as medições da resistividade do solo nas direções A, B, C e D em função das distâncias 1, 2, 4, 8, 16 e 32 e cuja a média e a variação percentual estão calculadas podemos estratificar o solo em duas camadas.

Distância	Resistividade medida				Resistividade média	Variação percentual			
m	A	B	C	D					
2	1015,00	1149,00	927,00	845,00	984,00	3,15%	16,77%	5,79%	14,13%
4	986,00	924,00	959,00	951,00	955,00	3,25%	3,25%	0,42%	0,42%
6	913,00	847,00	885,00	783,00	857,00	6,53%	1,17%	3,27%	8,63%
8	847,00	745,00	627,00	565,00	696,00	21,70%	7,04%	9,91%	18,82%
10	595,00	560,00	535,00	474,00	541,00	9,98%	3,51%	1,11%	12,38%
12	456,00	345,00	383,00	288,00	368,00	23,91%	6,25%	4,08%	21,74%
16	371,00	244,00	292,00	201,00	277,00	33,94%	11,91%	5,42%	27,44%
22	273,00	305,00	203,00	139,00	230,00	18,70%	32,61%	11,74%	39,57%
32	211,00	241,00	280,00	108,00	210,00	0,48%	14,76%	33,33%	48,57%

Tabela 1. Exemplo de valores e cálculos para a estratificação do solo - Fonte: Adaptado (SOUZA-RODRIGUES-BORELLI-BARROS, 2020)

após a exclusão dos valores cuja a média ficou acima dos 50% conforme mencionado anteriormente, plotamos o gráfico da resistividade pela distância conforme figura abaixo:

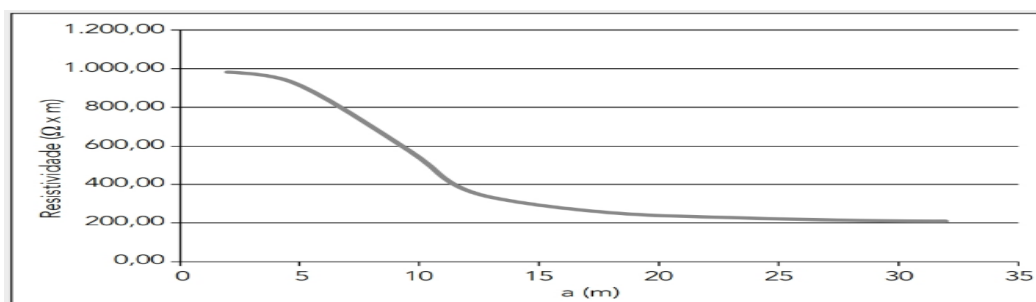


Figura 20. valores plotados - Fonte: Adaptado (SOUZA-RODRIGUES- BORELLI-BARROS, 2020)

A partir da curva traçada prolongamos a parte superior do mesmo até interceptar o eixo das ordenadas, obtendo assim o valor da resistividade apresentada pela primeira camada a qual chamaremos de ρ_1 da mesma forma prolongamos a assíntota da parte inferior até interceptar o eixo das ordenadas, obtendo assim o valor da resistividade apresentada pela segunda camada a qual chamaremos de ρ_2 , como exemplificado na figura seguinte.

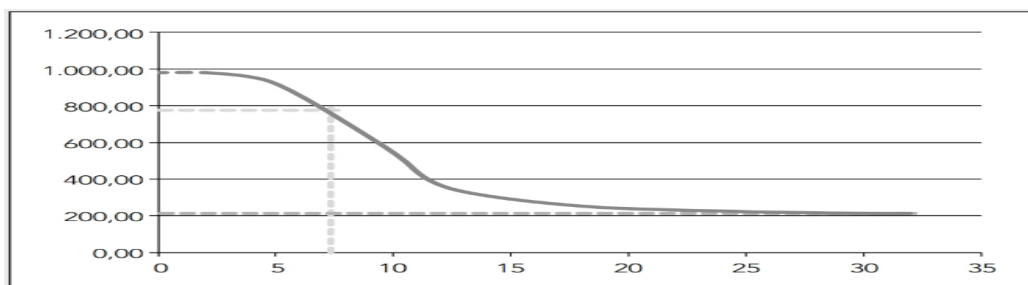


Figura 21. determinando a resistividade da primeira e da segunda camada - Fonte: Adaptado (SOUZA-RODRIGUES- BORELLI-BARROS, 2020)

De acordo com a figura acima obtemos para a primeira camada a resistividade de $\rho_1 = 990 \Omega \cdot m$ e a segunda camada $\rho_2 = 210 \Omega \cdot m$ e de posse de ρ_1 e ρ_2 obtemos a relação ρ_2/ρ_1 ou seja $210/990 = 0,21$ e consultando a tabela da NBR 7117 obteremos o valor de $M_0 = 0,7821$ que é adimensional. Para determinarmos o valor da resistividade média ρ_m será $\rho_m = M_0 \times \rho_1$ ou seja $\rho_m = 0,7821 \times 990 = 774,28 \Omega \cdot m$ ao encontrar a abscissa correspondente à este valor de ordenada encontraremos dessa forma a profundidade da camada ρ_1 conforme pode ser visto no gráfico acima entre o valor 5 e 10 no eixo X

3 Objetivos

3.1 Geral

- Analisar a importância da resistividade do solo para os sistemas de proteção, sistema de aterramento e SPDA

3.2 Específicos

- Analisar os parâmetros que influenciam na resistividade do solo em baixas e altas frequências.

4 Metodologia

Através de pesquisas bibliográficas procuraremos evidenciar como a resistividade do solo se comporta frente a solicitações em baixas e em altas frequências

4.1.1 A interface sistema de aterramento – solo

Como visto no referencial teórico os fenômenos transitórios causados por descargas elétricas atmosféricas exige que o sistema de aterramento seja eficiente e eficaz quanto a condução das cargas ao solo e a eliminação ou quando não possível a redução das diferenças de potenciais de risco no sistema elétrico, segundo silvério Visacro Filho o sistema de aterramento é constituído de três partes a saber: o conector(que interliga o sistema ao eletrodo), o eletrodo(qualquer corpo metálico inserido na terra) e a própria terra que envolve o eletrodo, estes componentes quando vistos por uma descarga atmosférica comportam-se como uma impedância a qual considerando o método eletromagnético híbrido, fundamentado nas leis do eletromagnetismo e nas teorias de circuitos nos permite construir um modelo a partir de um “eletrodo fundamental” conforme podemos ver na imagem abaixo:

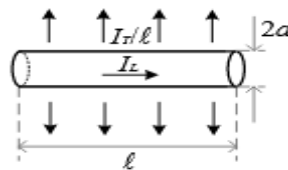


Figura 22 - eletrodo fundamental - Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

Para este eletrodo fundamental considera-se que o mesmo possui raio muito menor do que l e com o comprimento é muito maior do que o raio e que I_T/l é a densidade da corrente transversal e I_L é a corrente filamental constante que flui no sentido longitudinal do eletrodo.

Estes eletrodos elementares interagem entre si através de acoplamentos eletromagnéticos, ao eletrodo pelo o qual passa uma corrente e este gera um campo eletromagnético é dado o nome de eletrodo “emissor” e representado pelo índice j enquanto que ao eletrodo que está sob influência deste campo é dado o nome de receptor e representado pelo índice i . Entre os dois eletrodos elementares existem duas interações eletromagnéticas, uma transversal devida a corrente elétrica transversal ($I_{Tj}l_j$) e outra longitudinal devido a corrente elétrica longitudinal (I_L) que percorre o eletrodo elementar, entre o eletrodo emissor e o receptor transversal existe uma impedância (Z_{Tij}) a qual é definida pelo quociente entre a tensão escalar média (V_{ij}) no receptor pela corrente (I_{Tj}) do emissor, a diferença de potencial (V_{ij}) surge devido a densidade de corrente elétrica transversal proveniente do eletrodo emissor j , a impedância transversal (Z_{Tij}) representa eletricamente os acoplamentos capacitivos e indutivos entre os eletrodos j e i , quando $i=j$ teremos a impedância transversal própria e se $i \neq j$ teremos a transversal mútua. Da mesma forma teremos entre o eletrodo elementar emissor e o eletrodo elementar receptor uma diferença de potencial (V_{ij}) devido ao campo elétrico senoidal E_A vetorial produzido pelo eletrodo emissor j devido a corrente longitudinal (I_{Lj}) e entre os eletrodos haverá uma impedância longitudinal indutiva que representa eletricamente o acoplamento entre os eletrodos elementares e da mesma forma a impedância própria se dará quando $i=j$ e a impedância mútua se dará quando $i \neq j$, de posse dos valores do potencial escalar médio e do potencial vetor magnético os valores das impedâncias serão calculados adotando-se um ponto P próximo ao eletrodo elementar, conforme imagem seguinte:

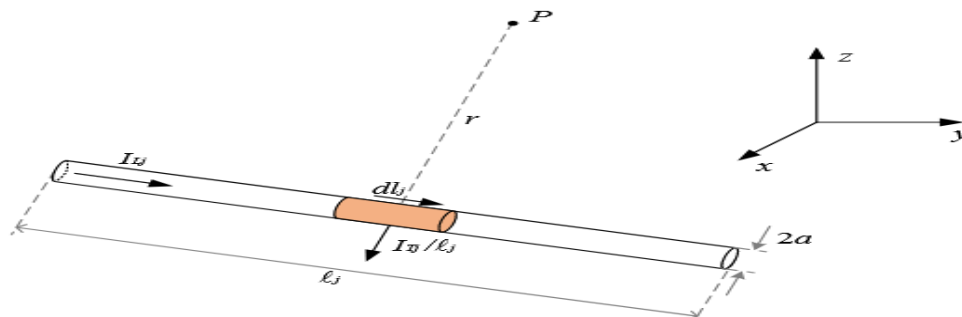


Figura 23. representação do eletrodo elementar emissor e do ponto P situado a uma distância r - Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

De acordo com (Salari Filho, 2006) a corrente infinitesimal (dI_j) é definida pela expressão: $dI_j = I_j dl_j$ a corrente elétrica I_j no domínio do tempo pode ser expressa da seguinte forma $I_j = I_{je} j\omega t$ desta forma podemos obter a tensão escalar V e o campo vetorial a partir de somatórios de fontes de tensões infinitesimais:

Equação 1 - Tensão escalar e Campo elétrico senoidal

$$V = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \int_{\ell_j} \frac{I_{rj} e^{-\gamma r}}{r} dl_j,$$

$$\vec{E}_v = -\vec{\nabla} V = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \int_{\ell_j} \frac{I_{rj} (1 + \gamma r)}{r^2} e^{-\gamma r} \vec{a}_r$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

onde :

$\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da forma de onda injetada cuja a frequência é f

μ = Permeabilidade magnética

σ = condutividade elétrica que varia conforme ω

ϵ = permissividade elétrica que varia conforme ω

dl_j = comprimento diferencial na direção coaxial do eletrodo emissor j

r = é a distância entre cada elemento diferencial do eletrodo emissor e o ponto P

γ = é o coeficiente de propagação

Equação 2 - contribuição do potencial vetor magnético A e campo elétrico E no ponto P

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{\ell_j} \frac{I_{Lj} e^{-\gamma r}}{r} d\vec{l}_j$$

$$\vec{E}_A = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{\ell_j} \frac{I_{Lj} e^{-\gamma r}}{r} d\vec{l}_j$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

O campo elétrico total E, que é um vetor, no ponto P é dado por:

Equação 3 - campo elétrico total no ponto P -

$$\vec{E} = \vec{E}_v + \vec{E}_A$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

A partir de agora definimos que no ponto P há um eletrodo receptor i com o qual estabeleceremos as equações seguintes, conforme imagem a seguir.

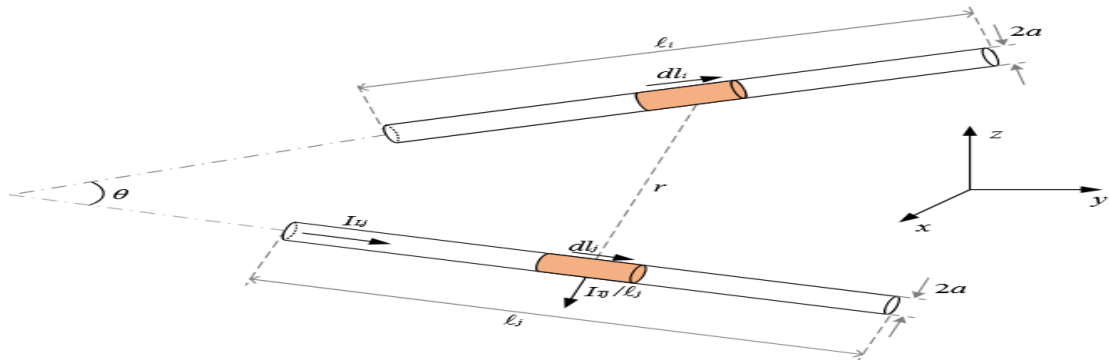


Figura 24 - Ponto P substituído por um eletrodo elementar receptor i - Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

A diferença de potencial V_{ij} que é a tensão que surge entre o eletrodo elementar receptor por influência do emissor devido a corrente elétrica transversal é obtida por :

Equação 4 - queda de tensão em i devido a corrente elétrica transversal em j

$$V_{ij} = \frac{1}{\ell_i} \int_{\ell_i} V_j dl_i \rightarrow V_{ij} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon) \ell_j \ell_i} \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} I_{Tj} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

já a corrente elétrica longitudinal que percorre o eletrodo emissor irá produzir uma ddp no eletrodo receptor a qual é definida pela integração do campo elétrico vetorial $\vec{E}_A$:

Equação 5 - queda de tensão em i devido a corrente elétrica longitudinal em j

$$\Delta V_{ij} = - \int_{\ell_i} \vec{E}_A \cdot d\vec{l}_i \rightarrow \Delta V_{ij} = j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} I_{Lj} \frac{e^{-\gamma r}}{r} d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

ao se resolver o produto escalar $d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i$ ambos vetoriais, resulta na seguinte expressão:

Equação 6 - resolução do produto escalar $d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i$

$$\Delta V_{ij} = j\omega \frac{\mu \cos \theta}{4\pi} \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} I_{Lj} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

o ângulo θ é o ângulo entre os eletrodos elementares i e j.

No entanto para resolvermos a equação anterior é necessário conhecer a interdependência entre as correntes elétricas transversal I_{Tj} e a longitudinal I_{Lj} em relação ao comprimento do eletrodo elementar l_j , essa interdependência será evidenciada através do método dos momentos que irá discretizar o comprimento do eletrodo em segmentos correspondentes aos eletrodos elementares através de mento equações algébricas lineares, nessa discretização algumas premissas devem ser atendidas como por exemplo o raio do eletrodo deve ser muito menor do que o comprimento l do segmento e esse comprimento l deve ser o menor possível de forma que se possa considerar as corrente elétricas transversal e longitudinal como constantes e o

segmento como sendo um filamento, um detalhe a se observar é que a precisão dos cálculos está relacionada diretamente com a quantidade de segmentação do eletrodo.

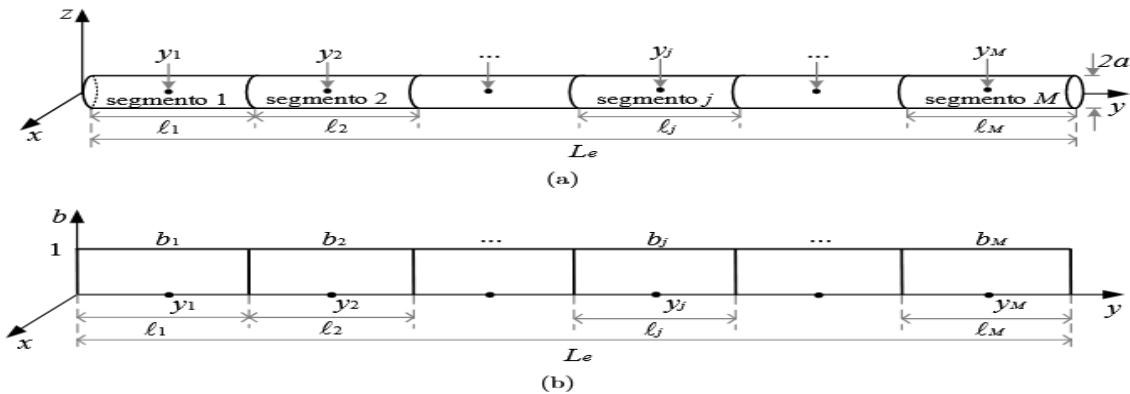


Figura 25 - representação da distribuição da corrente elétrica uniforme em a) representação da segmentação do eletrodo em b) - Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

a equação seguinte nos permite calcular a corrente elétrica transversal $I_T(l)$ que passa no eletrodo L_e (este eletrodo não é mais o eletrodo elementar discutido anteriormente, trata-se do eletrodo real)

Equação 7 - corrente transversal no eletrodo real

$$I_T(\ell) = \sum_{j=1}^M c_{Tj}(\ell) b_{Tj}(\ell)$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

a autora Bárbara Pereira Silva chama a atenção para as premissas exigidas no tocante ao comprimento do eletrodo pois a mesma plotou o valor da corrente elétrica real que passava pelo eletrodo de comprimento L_e juntamente com a corrente elétrica calculada pelo método dos momentos as quais mostramos logo abaixo:

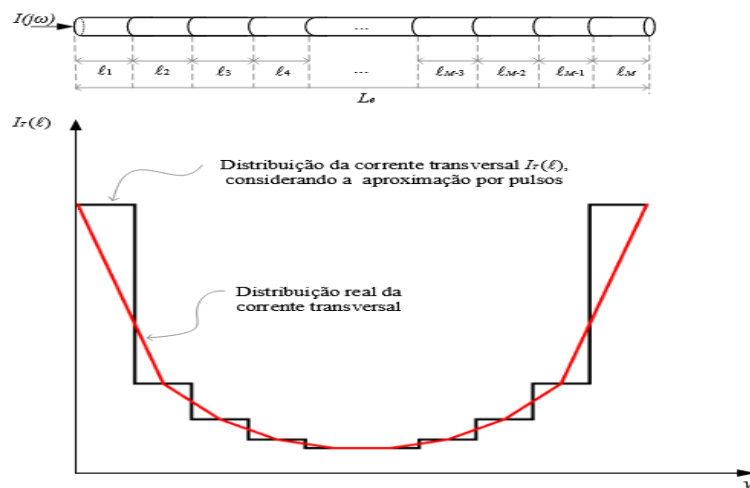


Figura 26 - comparação entre a corrente transversal real e a aproximação por pulsos - Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

e o potencial escalar médio no segmento i após a aplicação do método dos momentos é dado por :

Equação 8 - potencial escalar médio no segmento do receptor

$$V_i = Z_{i1} I_{T1} + Z_{i2} I_{T2} + \dots + Z_{ij} I_{Tj} + \dots + Z_{iM} I_{TM}$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

Na equação acima faz-se necessário que a variação de i de a a M, que é a quantidade dos segmentos, o que pode ser feito por meio de integração, conforme abaixo

Equação 9 - simplificação através do método dos momentos -

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)\ell_1\ell_1} I_{T1} \int_{\ell_1} \int_{\ell_1} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_1 dl_1 + \dots + \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)\ell_M\ell_1} I_{TM} \int_{\ell_1} \int_{\ell_M} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_M dl_1 \\ &\vdots \\ V_M &= \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)\ell_1\ell_M} I_{T1} \int_{\ell_M} \int_{\ell_1} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_1 dl_M + \dots + \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)\ell_M\ell_M} I_{TM} \int_{\ell_M} \int_{\ell_M} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_M dl_M \end{aligned}$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

Este sistema pode ser representado por um sistema matricial conforme abaixo:

Equação 10 - potencial escalar médio por sistema matricial -

$$[V] = [Z_T] \cdot [I_T]$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

O vetor $[V]$ e o vetor $[I_T]$ possuem dimensões M por 1 e o vetor $[Z_T]$ é a matriz impedância transversal de dimensões M por M e M é a quantidade de segmento do eletrodo. Para isolar o vetor $[I_T]$ faz-se necessário multiplicar os dois lados da equação pela transversa da matriz admitância $[Y_T]$

Equação 11 - matriz admitância

$$[Y_T] = [Z_T]^{-1}$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

Isolando $[I_T]$ temos:

Equação 12 - definição da corrente transversal no eletrodo pelo sistema matricial

$$[I_T] = [Y_T] \cdot [V]$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

Equação 13 - determinação do potencial escalar médio V_{ij} no segmento receptor i

$$V_{ij} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)\ell_j\ell_i} I_{Tj} \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

A matriz impedância transversal entre i e j $[Z_{tij}]$ é composta das impedâncias mútuas que são os elementos fora da diagonal principal e das impedâncias próprias que são os termos da diagonal principal onde $i = j$, essa matriz impedância obtida pela divisão do potencial escalar médio em cada segmento pela corrente transversal $[I_{tj}]$ em cada segmento do eletrodo j .

Equação 14 - determinação da impedância transversal entre i e j

$$Z_{Tij} = \frac{V_{ij}}{I_{Tj}} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)\ell_j\ell_i} \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Como a impedância transversal própria é a impedância transversal mútua de dois segmentos distanciados pelo raio a do eletrodo, isso impede que a divisão seja feita por zero.

A determinação de $[Z_{Tij}]$ foi determinado considerando que o meio(solo) é infinito, porém para que os modelos matemáticos correspondam o mais próximo possível da realidade devemos considerar o meio como sendo semi-infinito ou seja o eletrodo não está imerso na terra em todas as direções pois haverá uma região do mesmo que estará em contato com o solo e o solo com o ar e é nesse contexto que os próximos modelos abordarão.

4.1.2 A interface sistema de aterramento – solo – ar

Para considerarmos o efeito da interface solo-ar definimos um eletrodo j' que será a imagem de J separada por uma interface imaginária e simétrica a J em relação a este plano, da mesma forma que o segmento J possui uma fonte de corrente transversal o segmento j' também possui uma fonte de corrente transversal $\frac{I_{Tj'}}{\ell_j'}$ e uma fonte de corrente longitudinal $I_{Lj'}$, os pontos P_j , P_j' e P_i são as coordenadas dos pontos médios dos segmentos dos eletrodos emissor, eletrodo imagem e eletrodo receptor e as correntes transversais e longitudinais do eletrodo emissor e imagem são iguais $\frac{I_{Tj}}{\ell_j} = \frac{I_{Tj'}}{\ell_j'}$

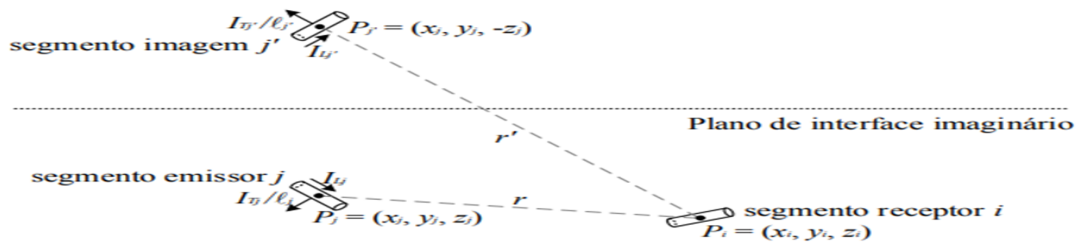


Figura 27- representação do sistema-Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

A onda eletromagnética emitida pela corrente transversal do segmento emissor ao encontrar a interface entre os dois meios terá uma parcela transmitida para o outro meio e uma parcela refletida no meio de origem, essa reflexão depende das características dos meios considerados, a parcela refletida é a que nos importa e poderá ser definida pelo coeficiente de reflexão Γ_r o qual servirá para encontrarmos o valor da impedância transversal entre o receptor i e o emissor j.

Equação 15 - coeficiente de reflexão, que depende das características dos meios, solo - ar

$$\Gamma_r = \frac{(\sigma_s + j\omega\epsilon_s) - (\sigma_a + j\omega\epsilon_a)}{(\sigma_s + j\omega\epsilon_s) + (\sigma_a + j\omega\epsilon_a)}$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Onde:

σ_s e ϵ_s são a condutividade e a permissividade elétrica do solo e variam com a frequência.

σ_a e ϵ_s são a condutividade e a permissividade elétrica do ar.

4.1.3 A Impedância Transversal considerando o meio semi - infinito

A nova expressão da impedância transversal entre i e j agora é:

Equação 16 - impedância transversal considerando o coeficiente de reflexão

$$Z_{Tij} = \frac{1}{4\pi (\sigma_s + j\omega\epsilon_s) l_j l_i} \left(\int_{l_i} \int_{l_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i + \int_{l_i} \int_{l_j'} \Gamma_r \frac{e^{-\gamma r'}}{r'} dl_{j'} dl_i \right)$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Onde:

l_j , l_j e l_i são os comprimentos dos segmentos do emissor imagem, do emissor e do receptor respectivamente.

Enquanto r' é a distância entre o emissor imagem j' e o receptor respectivamente i.

Portanto a geometria do sistema de aterramento, a frequência de excitação e os parâmetros do solo é que influenciarão no impedância Z_{Tij} . Portanto, a geometria do sistema de aterramento, a frequência de excitação e os parâmetros do solo é que influenciarão na impedância.

4.1.4 A Impedância Longitudinal

A corrente longitudinal é a expansão de M funções de base $b_{lj}(l)$ conhecidas que possui coeficiente $c_{lj}(l)$ desconhecido, sendo a mesma definida por(Silva,2016):

Equação 17 - definição da corrente longitudinal

$$I_L(l) = \sum_{j=1}^M c_{Lj}(l) b_{Lj}(l)$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Onde as funções de base $b_{lj}(l)$ são pulsos:

$$b_{Lj}(l) = \begin{cases} 1, & \text{no segmento } j \\ 0, & \text{para os demais,} \end{cases}$$

E os coeficientes desconhecidos $c_{lj}(l)$ a serem determinados correspondem a:

$$c_{Lj}(l) = \begin{cases} I_{Lj}, & \text{no segmento } j \\ 0, & \text{para os demais} \end{cases}$$

A figura seguinte representa a corrente longitudinal real em comparação com a corrente longitudinal por pulsos distribuída ao longo dos M segmentos do eletrodo:

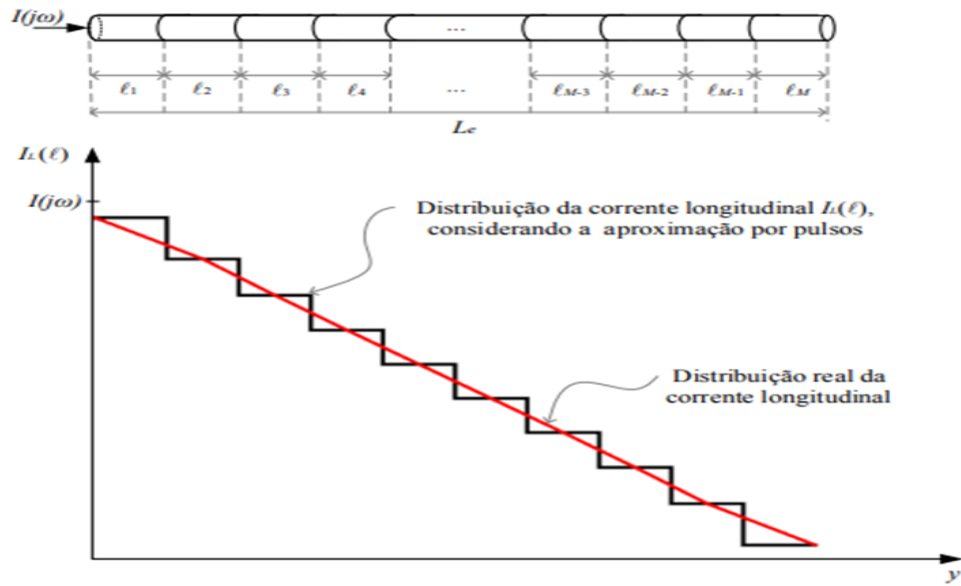


Figura 22 - representação da corrente longitudinal real e da longitudinal pulsante nos M segmentos

Vemos através desta comparação que o resultado é satisfatório, porém para que essa satisfação ocorra se faz necessário que escolher bem o comprimento l fazendo-o muito maior que o raio do segmento. Ao se aplicar o método dos momentos (método este não abordado neste trabalho) podemos determinar a queda de tensão ΔV_i que é o somatório das quedas de tensão em cada segmento.

A partir da equação:

Equação 18 - determinando a queda de tensão V_{ij}

$$\Delta V_{ij} = j\omega \frac{\mu \cos \theta}{4\pi} \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} I_{Lj} \frac{e^{-\gamma r}}{r} d\ell_j d\ell_i$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

Considerando $c_{lj}(l) = I_{lj}$ obteremos:

$$\Delta V_i = j\omega \frac{\mu \cos \theta}{4\pi} \int_{\ell_i} \sum_{j=1}^M \left[\int_{\ell_j} I_{Lj} b_{Lj}(\ell) \frac{e^{-\gamma r}}{r} d\ell_j \right] d\ell_i$$

O valor da corrente longitudinal do segmento é tida como constante por toda a extensão do segmento, no entanto este valor muda de segmento para segmento e devido a este fato ela pode sair do integrando.

O resultado deste somatório nos dá M incógnitas, as quais serão as M correntes longitudinais que passam pelo segmento, devido a este fato precisaremos de M equações lineares independentes nas quais teremos que

várias o índice i de 1 a M e que podem ser determinadas por uma equação matricial conforme visto anteriormente:

Equação 19 - equação matricial

$$[\Delta V] = [Z_L] \cdot [I_L]$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Onde:

M é a quantidade de segmentos do eletrodo

O vetor $[\Delta V]$ é uma matriz de dimensões M por 1 que representa a tensão induzida em cada segmento do receptor

$[I_L]$ é a matriz de dimensões M por 1 que representa a corrente em cada segmento

$[Z_L]$ é a matriz impedância longitudinal de dimensões M por M que contém as impedâncias longitudinais próprias que fazem parte da diagonal principal e as impedâncias longitudinais mútuas que estão fora da diagonal principal.

Para isolarmos o vetor devemos multiplicar a equação anterior pela matriz admitância inversa

Equação 20 - vetor admitância inversa

$$[Y_L] = [Z_L]^{-1}$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Equação 21 - vetor corrente longitudinal isolado

$$[I_L] = [Y_L] \cdot [\Delta V]$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Dessa forma surge no segmento i do receptor uma tensão induzida ΔV_{ij} devido a corrente longitudinal I_L :

Equação 22 - queda de tensão induzida em i gerada pela corrente longitudinal I_L

$$\Delta V_{ij} = j\omega \frac{\mu \cos \theta}{4\pi} I_{Lj} \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Da equação anterior podemos calcular a impedância longitudinal $[Z_{lij}]$ que é dada pela divisão entre a queda de tensão induzida ΔV_{ij} no segmento i pela corrente longitudinal no segmento j:

Equação 23 - impedância longitudinal

$$Z_{Lij} = \frac{\Delta V_{ij}}{I_{Lj}} = j\omega \frac{\mu \cos \theta}{4\pi} \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i$$

Fonte: Adaptado (Silva, 2016)

4.1.5 A impedância Longitudinal considerando o meio semi - infinito

Assim como foi feito para a impedância transversal iremos considerar agora o meio semi-infinito visto que o eletrodo encontra-se entre os meio solo – ar, pois como visto anteriormente o solo possui uma condutividade elétrica uma permissividade elétrica ϵ_s e uma permeabilidade magnética μ_s consideramos neste trabalho que a permeabilidade magnética do solo é igual a permeabilidade magnética do vácuo μ_0 . As considerações que foram feitas em relação a impedância transversal no tocante às correntes no segmento emissor imagem j' no segmento emissor j e no segmento receptor i são válidas para a determinação da impedância longitudinal num meio semi – infinito com a exceção de que não consideramos o processo da reflexão isto porque a corrente longitudinal se propaga ao longo do eletrodo, em virtude disso em nossa conhecida expressão da impedância é adicionada uma parcela relacionada a imagem do segmento emissor identificada com apóstrofo

Equação 24 - impedância longitudinal

$$Z_{Lij} = j\omega \frac{\mu_s \cos \theta}{4\pi} \left(\int_{\ell_i} \int_{\ell_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i + \int_{\ell_i} \int_{\ell_{j'}} \frac{e^{-\gamma r'}}{r'} dl_{j'} dl_i \right)$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

No entanto para que a impedância longitudinal própria(quando i = j) possa ser determinada precisamos inserir na equação acima uma componente associada ao fluxo magnético interno do condutor a qual denominamos de Z_{int} impedância interna que é definida para um condutor composto por um único material(sem alma de aço por exemplo) pela seguinte fórmula(Silva,2016):

Equação 25 fórmula de Zint

$$Z_{int} = \ell_j \left[\frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{j\omega \mu_1}{\sigma_1}} \frac{I_0(\rho_1)}{I_1(\rho_1)} \right]$$

Fonte: Adaptado(Silva, 2016)

Onde :

μ_1 é a permeabilidade magnética do condutor

σ_1 é a condutividade elétrica do condutor

$$\rho_1 = a\sqrt{jw \cdot \mu_1 \cdot \sigma_1}$$

$I_0(\rho_1)$ e $I_1(\rho_1)$ são funções de Bessel modificadas de primeira espécie de ordem 0 e 1, respectivamente avaliada em ρ_1 . Novamente a equação da impedância nos mostra que seu valor depende da geometria do sistema de aterramento, das características eletromagnéticas do meio e da frequência da corrente de excitação essa impedância traduz o efeito físico do acoplamento eletromagnético indutivo entre os segmentos

4.1.6 Parâmetros do Solo X Frequência

Ao analisar as condições de um sistema de aterramento, existe a necessidade de uma modelagem que garanta os parâmetros de dissipação de energia adequada. Nas condições em que os fenômenos sejam não lineares o solo deve atuar com comportamento linear, onde os parâmetros que atuam no momento de um fenômeno e que garante um bom funcionamento de uma sistema são a condutividade elétrica (σ_s), a permissividade elétrica (ϵ_s) e permeabilidade magnética (μ_s) através da passagem de uma corrente causando uma propagação eletromagnética. Valores elevados desse campo magnético ocasionam ionização do solo como também com rápida variação causam a famosa histerese.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como evidenciado neste trabalho, as condições climáticas do planeta estão em constante mudança, e que essas divergências ocasionam várias catástrofes e de fato existe a necessidade de proteção e levando em consideração a quantidade de mortes por descargas atmosféricas e danos materiais não resta dúvida que o sistema de SPDA torna-se imprescindível nas edificações e que se este sistema deve dispor de condições básicas para o correto funcionamento. Dentre as condições citadas acima vale ressaltar a resistência do solo, onde a modelagem correta do solo é imprescindível para que se realize uma boa análise do sistema de aterramento visto que o solo possui parâmetros como a condutividade elétrica σ_s , a permissividade elétrica ϵ_s e a permeabilidade magnética μ_s que estão associados à propagação do campo eletromagnético em função da corrente elétrica injetada e portanto o mesmo possui comportamento diferente quando submetido a correntes elétricas com baixas e com altas frequências, em baixas frequências o comportamento do solo é praticamente resistivo ou seja $\omega\epsilon_s$ é desprezível se comparada com a condutividade σ_s , porém em altas frequências o parâmetro ϵ_s torna-se importante e o solo apresenta efeitos capacitivos, indutivos e condutivos que se não observados podem comprometer a integridade e a segurança do sistema elétrico bem como acidentes. Estes parâmetros tornam-se mais acentuados quando a qualidade dos materiais aplicados não são confiáveis.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pela oportunidade de aprendizado com este trabalho de conclusão de curso, a nossa família pelo apoio e também a professora Bethânia e o professor Felipe Tenório pela ministração das disciplinas TCC1 e TCC2 que nos abriu um leque de possibilidades e preparação para apresentação do nosso trabalho, além disso agradecemos ao nosso professor Sidney Cunha que nos apresentou esse tema e que nos apoiou durante todo o processo, a professora Lytienne Rodrigues da Cunha que participou da nossa banca examinadora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419/2015**: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. 1 ed. São Paulo, 2015. 400 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410/2008**: Instalações elétricas de baixa tensão. 2 ed. São Paulo, 2008. 273 p.

ARCANJO, Marcelo Augusto Sousa. **Modelo computacional para simulação da formação do canal de descargas atmosféricas: desenvolvimento e aplicação para monitoramento da evolução das grandezas elétricas envolvidas**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-B3FKFT/1/dissertacao_marceloarcujo.pdf. Acesso em: 10 fev. 2022.

SOUZA, André Nunes de; RODRIGUES, José Eduardo; BORELLI, Reinaldo; BARROS, Benjamim Ferreira de. **SPDA-Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas: teoria, prática e legislação**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2020. 216 p.

DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. Inpe, 2019. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/rindat/menu/desc.atm/>. Acesso em: 19 de novembro de 2021.

SILVA, Bárbara Pereira. **Modelagem e Solução de Aterramentos Sujeitos a Surtos de Corrente: Respostas nos Domínios da Frequência e do Tempo**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: <file:///C:/Users/Jonathan/Downloads/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20B%C3%A1rbara%20Pereira%20Silva%20-%202016%20-%20parte%201.pdf>. Acesso em: 09 maio 2022.

VISACRO FILHO, Silvério. **Descargas Atmosféricas uma abordagem de engenharia**. Minas Gerais: Artliber, 2005. 268 p.

CEARÁ FOI O ESTADO DO NORDESTE COM MAIS MORTES POR RAIOS EM 2019. Diário do Nordeste, 2020. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/ceara-foi-o-estado-do-nordeste-com-mais-mortes-por-raios-em-2019-1.2218803>. Acesso em: 25 de novembro de 2021.

SEVERINO DA SILVA, Márcio. **Análise de desempenho de redes de distribuição monofilares com retorno pela terra (MRT) frente a descargas atmosféricas**. UFPE, 2015. Disponível em: https://www.ufpe.br/documents/39830/1359036/269_MarcioSilva/2ac79085-0d82-40cf-a291-3ebe415458e7. Acesso em: 18 de novembro de 2021.

CONCEITOS METEOROLÓGICOS. Inpe, 2019. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/conceitos.meteorologicos.php#:~:text=As%20nuvens%20se%20formam%20a,se%20tornar%20part%C3%ADculas%20de%20gelo,>>. Acesso em: 19 de novembro de 2021.

