

**CENTRO UNIVERSITARIO DE BELO HORIZONTE
INSTITUTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA - IET**

**LUIZ GUILHERME FERREIRA DA CUNHA DOS ANJOS
NATANNIE LIMA DOS SANTOS**

**MÉTODO UTILIZADO PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA DE
ATERRAMENTO DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

**BELO HORIZONTE
DEZEMBRO – 2013**

LUIZ GUILHERME FERREIRA DA CUNHA DOS ANJOS
NATANNIE LIMA DOS SANTOS

MÉTODO UTILIZADO PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO
DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

Projeto de Pesquisa apresentado ao Instituto de Engenharia e Tecnologia do Centro Universitário de Belo Horizonte, como requisito para a aprovação na disciplina Trabalho Final de Curso I: Projeto de Pesquisa em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema de Aterramento

Orientadora: Prof^a. Ms. Joana D'arque da Silva Corrêa

Co-Orientador: Prof. Ms. Claudenir Janderlino Souza

Co-Orientadora: Prof^a. Ms. Janaina Guernica Silva

BELO HORIZONTE
DEZEMBRO - 2013



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BELO HORIZONTE

Instituto de Engenharia e Tecnologia - IET

Campi Estoril

Trabalho Final de Conclusão de Curso intitulado *Sistema de Aterramento de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica: Método utilizado para melhoria da Resistência de Aterramento das Linhas de Transmissão*, de autoria do(s) aluno(s) **Luiz Guilherme Ferreira da Cunha dos Anjos, Natannie Lima dos Santos**, aprovado pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Ms. Joana D'arque da Silva Corrêa
Orientador

Prof. Ms. Janaina Guernica Silva
Co-orientadora

Prof. Ms/Dr/PhD. (nome do membro da banca)

Belo Horizonte, 07 de dezembro de 2013.

Dedicamos este trabalho aos nossos pais e mestres que contribuíram de maneira sem igual para formação do nosso caráter e nos capacitaram para que pudéssemos ter condições de realizar este projeto.

AGRADECIMENTOS - LUIZ GUILHERME

Agradecemos em especial ao nosso co-orientador externo, Claudenir Janderlino, que nos norteou durante a pesquisa sobre o tema, pela paciência e dedicação ao repassar o conhecimento.

Agradecemos também em comum à nossa orientadora que nos apoiou no decorrer do trabalho.

Agradeço em particular e especial ao meu pai (Guinha), que esteve sempre ao meu lado apoiando cada decisão e sempre indicando o melhor caminho para essa conquista e à minha mãe (Ritinha) pelo carinho e amor. Ao meu irmão Lauro Ferreira, que apoiou nas horas mais difíceis e com conselhos que fizeram a diferença para o alcance do objetivo.

Agradeço em particular e especial ao Lauro (Tio Júnior) e Tia Célia, pela força, carinho, atenção e o grande apoio. Pelos momentos de papo cabeça e orientação. Sempre presentes e acompanhando cada passo dado. Conselheiro(a) e amigo(a) para todas as horas. Duas peças chave na minha vida.

Agradeço em particular toda a equipe da RS Engenharia, Roberto, Mauricio, Claudia, Ana Paula, Leonardo, Camila, André, Washington, Marliane, Filipe Santos, Filipe Moreira, Thiago, pela força e conhecimento e que acompanharam parte dessa fase da minha vida.

AGRADECIMENTOS – NATANNIE LIMA

Agradeço primeiramente a Deus, por ter criado as oportunidades necessárias para que este sonho pudesse se realizar. Ele é a minha rocha e fortaleza, n'Ele posso confiar.

Ao meu pai, Antonio Ivo dos Santos, serei eternamente grata pela educação e formação. Seus conselhos e exemplo me fizeram ser uma pessoa melhor. Todos os esforços possibilitaram que eu tivesse condições para completar a graduação e por isso, hoje, dedico mais esta etapa a ele.

A minha mãe, Raimunda de Fátima Lima dos Santos, pelo cuidado e dedicação em todos estes anos. Grande incentivadora, esteve sempre apoiando e ajudando para que este nosso sonho se concretizasse.

Agradeço ao meu noivo e futuro esposo, Fábio Henrique P. Silva, pela paciência durante estes longos anos, pela amizade e por todos os esforços realizados. Sempre disposto a me levar e buscar na faculdade, sua presença em minha vida tornou esta jornada um pouco mais leve.

Agradeço aos meus familiares e amigos, em especial ao meu sogro Carlos Silva e minha sogra Marlene Maria P. Silva que estiveram sempre torcendo por mim. A minha prima Sheila, por ter ajudado com todos os tramites necessários para a aquisição da bolsa. E a minha cidade Cachoeira Dourada – MG que custeou parte dos meus estudos.

A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada. (Albert Einstein)

RESUMO

Os desligamentos não programados que ocorrem em uma linha de transmissão constituem um importante parâmetro na definição de seu desempenho, sendo a descarga atmosférica o principal evento eletromagnético responsável por tais ocorrências. Em regiões de elevados índices de incidência de descargas atmosféricas com aterramentos, os riscos associados às descargas podem ser muito superiores aos obtidos pelos curtos-circuitos à frequência industrial. As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que não podem ser evitados, desta forma, este trabalho propõem-se a apresentar mecanismos que contribuam com a minimização dos danos causados por tal incidência.

Um dos importantes métodos relacionados ao aterramento das linhas de transmissão é a redução das resistências de aterramento das estruturas, sabe-se que este constitui um dos meios efetivos de controlar as sobretensões provocadas pelas descargas atmosféricas e também as correntes de surto do sistema.

Neste trabalho são avaliados os principais aspectos físicos e as metodologias adequadas para se analisar os aterramentos, sendo estudadas mais especificamente as técnicas para reduzir a resistência de aterramento, bem como as rotinas de medição de aterramento e cálculos envolvidos no processo de obtenção de dados.

Palavras Chave: Linha de Transmissão, Descargas Atmosféricas, Aterramento, Resistência de Aterramento.

ABSTRACT

The unplanned shutdowns that occur on a transmission line is an important parameter in defining their performance, and the lightning electromagnetic the main event responsible for such occurrences.

In regions of high incidence of lightning with grounds, the risks associated with discharges can be much higher than obtained by short circuiting power frequency.

The lightning are natural phenomena that can not be avoided in this way, this paper proposes to introduce mechanisms that contribute to the minimization of damage caused by such incidence.

One of the important methods related to ground of the transmission lines is to reduce the resistance of the ground structure, it is known that this is one of effective means of controlling the overvoltages caused by lightning and surge currents also the system.

This paper evaluated the main physical aspects and methodologies appropriate to analyze the grounds, and more specifically studied the techniques to reduce the grounding resistance and the grounding measurement routines and calculations involved in obtaining data.

Key-words:

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Torre de ancoragem isoladores.....	17
Figura 2.	Formação do raio	19
Figura 3.	Exemplo de mapa ceraunico.....	21
Figura 4.	Exemplo de mapa de contadores de densidade obtido por rede instalada em Minas Gerais.....	22
Figura 5.	Exemplo de mapa de densidade de flashes – Método LLS.....	23
Figura 6.	Representação de uma LT sendo iluminada por descargas atmosféricas pelo campo eletromagnético gerado por descargas atmosféricas.....	25
Figura 7.	Linha trifásica sem cabo de blindagem sendo atingida diretamente por uma descarga.....	26
Figura 8.	Linha trifásica sendo atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica.....	28
Figura 9.	Solo estratificado.....	35
Figura 10.	Solo em duas camadas.....	36
Figura 11.	Arranjo de aterramento para estruturas metálicas autoportantes.....	38
Figura 12.	Arranjo de aterramento para estruturas metálicas estaiadas.....	39
Figura 13.	Exemplo típicos de curvas para diversas estratificações do solo...	49
Figura 14.	Solo estratificado em duas camadas.....	54
Figura 15.	Modelo da malha de aterramento – 4 fios contrapeso.....	62
Figura 16.	Fase L – Método de cálculo.....	62
Figura 17.	Fio contrapeso – Vista Perfil.....	62
Figura 18.	Modelo real da malha de aterramento – 6 fios contrapeso.....	63
Figura 19.	Fase L – Método de Cálculo.....	63
Figura 20.	Fio contrapeso – Vista perfil.....	63
Gráfico 1	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.1.....	50
Gráfico 2	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.2.....	50
Gráfico 3	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.3.....	51

Gráfico 4	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.4.....	51
Gráfico 5	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.5.....	51
Gráfico 6	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.6.....	52
Gráfico 7	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.7.....	52
Gráfico 8	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.8.....	52
Gráfico 9	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.9.....	53
Gráfico 10	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.10.....	53
Gráfico 11	Gráfico resistividade do solo x espaçamento entre hastes T.11.....	53
Gráfico 12	Obtenção do parâmetro a.....	58
Gráfico 13	Resistividade aparente para um solo com duas camadas	60
Gráfico 14	Resistividade x espaçamento – Torre 5	66
Quadro 1	Níveis de isolamento por classe de tensão apresentando valores de sobretensão e índices máximos de desligamentos.....	24
Quadro 2	Relação entre tipos de solo e resistência.....	34
Quadro 3	Resistividade do solo modelada a partir de medições em campo...	47
Quadro 4	Obtenção da relação de ρ_2/ρ_1	54
Quadro 5	μ_o em função de ρ_2/ρ_1	56
Quadro 6	Determinação de $\rho(h)$	57
Quadro 7	Obtenção do h.....	59
Quadro 8	Comprimento por fase.....	64
Quadro 9	Dados medidos da Torre 5.....	65
Quadro 10	Dados medidos da Torre 5.....	73
Quadro 11	Quadro comparativo dos valores de resistência em função da configuração.....	76

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

LLS – Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas

LT – Linha de Transmissão

SE – Subestação

CIGRÉ – Equipamento utilizado para contagem de Descargas Atmosféricas

Hz – Unidade de medida da frequência (Hertz)

m – Unidade de medida de distância

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

Z_L – Impedância de onda da Linha de Transmissão

ω – Frequência Angular

J – Unidade complexa

Z_s – Impedância de Surto da LT

Γ – Coeficiente de reflexão

V^+ - Ondas incidentes

V^- - Ondas refletidas

ρ – Resistividade do solo ($\Omega.m$)

ρ_a – Resistividade aparente ($\Omega.m$)

$\rho(h)$ – Resistividade em função da espessura da camada ($\Omega.m$)

Ω - Unidade de medida da resistência (Ohms)

I – Corrente Elétrica medida em Ampères

V_p – Potencial no ponto de medição da resistência do solo

TCE – Teoria de Campos Eletromagnéticos

TC – Teoria de Circuitos

TLT – Teoria de Linhas de Transmissão

L – Comprimento do cabo contrapeso

kV – Unidade de medida do potencial da LT

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1.	OBJETIVO GERAL	13
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3	JUSTIFICATIVA	13
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	HISTÓRICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	15
2.2	ESTRUTURAS ISOLANTES	17
2.2.1	CABOS GUARDA (PÁRA-RAIOS)	18
2.3	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	19
2.3.1	Métodos de obtenção da densidade de descargas	20
2.3.2	Nível Ceráunico	21
2.3.3	Contadores de Descargas	22
2.3.4	Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas (LLS)	23
2.4	MECANISMOS DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	24
2.4.1	Incidência Indireta	25
2.4.2	Incidência direta	27
2.5	ATERRAMENTO	31
2.5.1	Resistividade do solo	33
2.6	MODELAGEM DAS MALHAS DE ATERRAMENTOS UTILIZADAS TIPICAMENTE EM TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	38
2.6.1	Contrapeso	39
2.6.2	Faixa de servidão	41
3	METODOLOGIA	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Análise	44
4.2	ESTUDO DE CASO	44
4.3	CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO ESTUDO DE CASO	45
4.3.1	Características Básicas da LT 230 kV	45
4.3.2	DADOS DO SISTEMA DE ATERRAMENTO A SEREM CONSIDERADOS	46
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
6.	REFERÊNCIAS	80

1. INTRODUÇÃO

A redução da resistência de aterramento das estruturas de uma Linha de Transmissão (LT) constitui um dos meios efetivos de controlar as sobretensões provocadas pelas descargas atmosféricas e também as correntes de surto do sistema. Essa redução deve obedecer a um compromisso econômico entre o custo do sistema de aterramento e a performance desejada das linhas.

Para a região ocupada pela LT, onde se espera, em alguns trechos, a ocorrência de altas resistividades, torna-se necessário um sistema compatível com a taxa de desligamentos da região estudada.

Assim sendo, este parâmetro é um fator que afeta diretamente os sistemas de transmissão e é também imprescindível para o dimensionamento dos sistemas de aterramento das LT's.

Esse trabalho pretende apresentar um estudo dos métodos utilizados para a diminuição da resistência de aterramento nos sistemas de aterramento das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (LT).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O sistema de aterramento é utilizado para dissipar as descargas atmosféricas pelo solo, tanto quanto as correntes de surto do sistema de transmissão. Já a resistência de aterramento é um parâmetro de melhoria que influencia diretamente no dimensionamento desse sistema, encontrado através das medições de resistividade do solo e característicos do fio contrapeso. Então o problema para este trabalho é como diminuir esta resistência ou aproximar do valor de referência (20Ω), para assim, otimizar o escoamento das descargas atmosféricas e correntes de surto, minimizando o dano nas linhas de transmissão.

Baseado no contexto questiona-se: como aperfeiçoar a resistência de aterramento das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Descrever os procedimentos necessários para redução da resistência de aterramento das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a modelagem de cálculo necessária para obtenção da resistência de aterramento, descrevendo os principais parâmetros.
- Apresentar um estudo de caso real de uma LT 230 kV, aplicando o método para diminuição da resistência de aterramento.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os sistemas elétricos são planejados e constituídos com o objetivo de otimizar a operação e fornecer energia dentro de padrões de confiabilidade, continuidade, qualidade e economicidade. O desempenho do sistema de transmissão é medido por meio de índices que expressam a qualidade da energia suprimida às cargas. Tais índices consideram o número e a duração das interrupções de serviço. De acordo com as características da linha, são definidos limites aceitáveis do número de desligamentos por trecho de linha. A fim de garantir que o desempenho da linha se encontre dentro desses limites é importante um bom projeto do sistema de aterramento.

O aterramento elétrico apresenta um papel fundamental para o bom desempenho do sistema elétrico, além de garantir a segurança das pessoas, devendo, portanto, ser projetado para atender a critérios específicos de desempenho de segurança sob as diversas condições operativas. Constitui-se em uma ligação proposital de um condutor a terra, que dispersa corrente de falta para a mesma. Essa corrente pode causar diferenças de potenciais ou tensões induzidas além dos limites permissíveis, colocando em risco equipamentos e a vida dos seres vivos.

A redução das resistências de aterramento das torres constitui um dos meios efetivos para controlar a sobretensão provocada por descargas atmosféricas, sendo que esta redução deve obedecer a um compromisso econômico entre custo do sistema de aterramento e o desempenho desejado para a linha de transmissão. Para regiões onde as torres estão acessíveis a terceiros, as condições de segurança de tensão de passo e toque devem ser avaliadas, ou seja, os potenciais produzidos pelas correntes de falta devem ser mantidos dentro de limites de segurança de modo a não causar, como por exemplo, fibrilação do coração humano.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HISTÓRICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Um sistema de energia elétrica, constituído pela geração, transmissão e distribuição da energia, tem como objetivo o fornecimento de energia de boa qualidade e economicamente acessível aos consumidores finais. Esse fornecimento deve ser feito de forma que se priorize uma minimização dos impactos ecológicos (Camargo,1984).

As linhas de transmissão de energia elétrica tiveram início ainda no século XIX, quando da invenção da lâmpada incandescente por Thomas A. Edison. Para a utilização das lâmpadas, foi necessária a criação de um sistema para levar a energia até elas. O fornecimento era realizado utilizando tensão de 110 V, corrente contínua, abrangendo inicialmente a iluminação pública e residencial, além de poucas aplicações de força motriz (Fuchs, 1992).

Posteriormente, a demanda por energia aumentou. Foram, então, criadas novas centrais elétricas e o fornecimento passou a ser feito com maior intensidade, em corrente alternada. Fato que garantia uma maior flexibilidade do sistema, que podia gerar energia elétrica numa tensão, transmitir em outra e ainda distribuir em outro nível. Esses sistemas eram monofásicos, e em seguida, também foram alterados, visando uma otimização do transporte da energia passando a ser bifásicos e depois trifásicos (Fuchs, 1992).

O frequente crescimento econômico e populacional, as restrições ambientais e o uso crescente da energia levaram à necessidade de mais linhas de transmissão, entretanto, com menos espaço disponível para a construção das mesmas, a solução foi o emprego de níveis de tensão cada vez maiores para a transmissão da energia elétrica. Registram-se (Fuchs, 1992):

- 1886 – uma linha monofásica com 29,5 km e capacidade de transporte de 2.700 HP, para Roma, Itália
- 1888 – uma linha trifásica, 11.000 V, com um comprimento de 180 km na Alemanha
- 1890 – primeira linha em CA, de 20 km, monofásica nos Estados Unidos, operando em 3.300 V
- 1907 – era atingida a tensão de 110 kV
- 1913 – foi construída uma linha em 150 kV
- 1923 – foram construídas linhas em 220 kV
- 1926 – foram construídas linhas em 244 kV
- 1936 – a primeira linha em 287 kV entrou em serviço
- 1950 – entrada em serviço de uma linha de 1.000 km de comprimento, 50 Hz e 400 kV na Suécia
- 1953 – alcançada a tensão de 345 kV nos Estados Unidos
- 1963 – energizada a primeira linha de 500 kV nos Estados Unidos
- 1965 – energizada a primeira linha de 735 kV no Canadá

A transmissão de energia elétrica em diferentes níveis de tensão impôs a necessidade de uma padronização das tensões de operação. Foram adotados padrões de caráter nacional com abrangência também em outros países. A experiência ditava os valores mais convenientes a cada caso.

No Brasil, os níveis padronizados atualmente são 69, 138, 230, 345, 500, 750 e 1000 kV.

Com toda essa evolução das linhas de transmissão, foi necessário um aprimoramento contínuo dos projetos de linhas visando um transporte eficiente, seguro e que não comprometesse o meio ambiente. Foram, assim, criadas normas técnicas específicas para projetos de linhas de transmissão, e metodologias e critérios de projeto a serem obedecidos. Acompanhando esse processo evolutivo, as técnicas utilizadas na execução de projetos eletromecânicos também sofreram alterações, e hoje, são utilizados computadores e softwares especializados.

2.2 ESTRUTURAS ISOLANTES

Os condutores, das linhas de transmissão, devem ser isolados eletricamente de seus suportes e do solo (Fuchs, 1992). Essa isolação é feita basicamente pelo ar que os envolve, auxiliado por elementos de material dielétrico, denominados isoladores.

As solicitações elétricas das estruturas isolantes são de origem interna ou externa aos sistemas elétricos das linhas, e se caracterizam pelas sobretensões que podem ocorrer.

Os isoladores são fixados às torres através das cadeias de isoladores formando assim a estrutura isolante cabo-estrutura.

Além das solicitações elétricas, as estruturas isolantes são solicitadas mecanicamente, devendo apresentar, portanto, resistências mecânicas compatíveis com os esforços máximos esperados.

Na figura 1, é mostrada uma torre de ancoragem para transmissão em 230 kV e sua respectiva estrutura isolante.

Figura 1 – Torre de ancoragem - isoladores



2.2.1 CABOS GUARDA (PÁRA-RAIOS)

A principal função dos cabos pára-raios das linhas aéreas de transmissão, é de interceptar as descargas atmosféricas e evitar que atinjam os condutores, reduzindo assim, as possibilidades de ocorrerem interrupções no fornecimento de energia pelas linhas. Subsidiariamente, podem ser usados como condutores para sistemas de telemedição ou comunicação (FUCHS, 1992).

Esses cabos devem ser dimensionados de forma a suportarem as correntes de falta, que ocorrem em função dos níveis de curto circuito das subestações interligadas pela linha. No dimensionamento são, então, considerados os seguintes itens:

- A corrente de curto-circuito é calculada em função do ponto de falta (na torre em que ela ocorre), das resistências dos aterramentos das torres e das SE's, dos comprimentos dos vãos, das impedâncias próprias e mútuas dos cabos fase e pára-raios e dos equivalentes do sistema elétrico nas SE's terminais (a alimentação pode ser simultânea nas duas SE's terminais);
- Os comprimentos dos vãos são considerados com seus valores reais;
- As resistências de aterramento são simuladas individualmente, com seus valores reais;
- No caso de linhas de circuito duplo, a corrente de falta nos dois circuitos é calculada;
- A distribuição de corrente entre os cabos pára-raios é feita considerando suas impedâncias próprias e as impedâncias mútuas entre si e entre eles e os condutores da fase em falta.

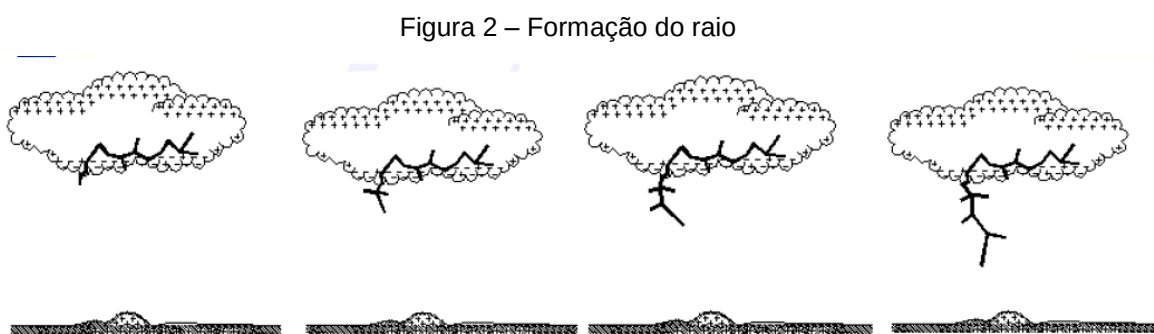
2.3 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

De acordo com Mamede Filho (2010), as descargas atmosféricas podem ser definidas como um fenômeno transitório que ocorre na atmosfera com origem nas nuvens de tempestade, e expressa através de um fluxo de corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração através de um percurso constituído pelo canal de descarga.

A descarga ocorre quando o gradiente do campo elétrico excede a rigidez dielétrica do ar, provocando a sua ruptura. A intensa corrente de fuga ioniza e aquece os gases que constituem a atmosfera, provocando o surgimento de um

trajeto tortuoso e, normalmente, cheio de ramificações, cujo fenômeno é conhecido como descarga piloto.

A ionização do caminho, seguido pela descarga piloto proporciona condições favoráveis de condutibilidade do ar ambiente. Mantendo-se elevado o gradiente de tensão na região entre a nuvem e a terra, surge em função da aproximação do solo de uma das ramificações da descarga piloto, uma descarga ascendente, constituída de cargas elétricas positivas. A formação do raio é acompanhada por um clarão de intensa luminosidade, o relâmpago, e por uma emissão sonora, o trovão (FIG. 2).



Fonte: VISACRO, 2005

Outros centros de carga na base da nuvem podem suprir cargas negativas no canal previamente ionizado, possibilitando a ocorrência da descarga subsequente. As descargas subsequentes podem utilizar integralmente o canal da primeira descarga ou apenas parcialmente. A corrente originada no ponto de conexão entre os canais ascendentes e descendentes se propagam pelo canal, agora um canal único, neutralizando as cargas do canal.

2.3.1 Métodos de obtenção da densidade de descargas

Segundo Visacro Filho (2005), as descargas atmosféricas constituem na principal fonte de desligamentos em linhas de transmissão. Este fenômeno se justifica, pois as grandes extensões das redes de transmissão proporcionam alta probabilidade de incidência direta de descargas atmosféricas. As

descargas podem ocorrer diretamente de duas formas: sobre cabos energizados ou cabos blindados e torres.

O mesmo autor afirma que por se tratar de um fenômeno natural, as descargas atmosféricas não podem ser evitadas. Torna-se, então, necessário conhecer o seu comportamento para poder construir mecanismos de proteção que minimizem os desligamentos e aumente a qualidade no fornecimento de energia elétrica.

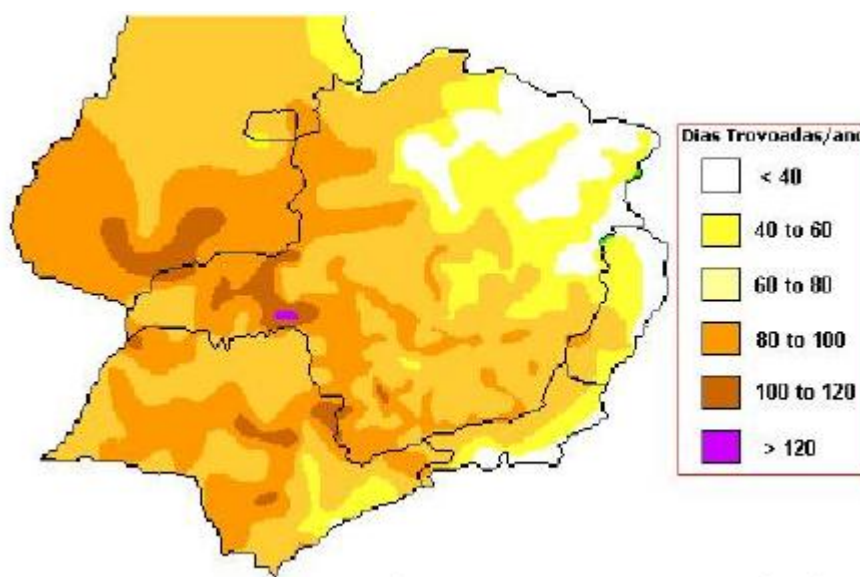
Tradicionalmente são utilizados três métodos para obtenção da densidade de descargas nuvem-solo em uma região: a partir do nível ceráunico; diretamente a partir de uma rede de contadores de descargas e através dos dados providos por LLS. Neste item são descritos brevemente cada um dos métodos.

2.3.2 Nível Ceráunico

O nível ceráunico constitui um bom indicador da atividade elétrica da atmosfera, sendo muito utilizado para a determinação das densidades de descargas, através da aplicação de fórmulas empíricas.

Visacro Filho (2005) define o nível ceráunico como uma contagem dos “dias de trovoadas por ano”, ou seja, são registrados o número de dias no ano em que foi ouvido o trovão de ao menos uma descarga. Este método é utilizado principalmente em regiões onde não se dispõe de outros métodos de análise de incidência de descargas, pois o mesmo é sujeito a erros.

Figura 3: Exemplo de mapa Ceráunico



Fonte: Cemig

2.3.3 Contadores de Descargas

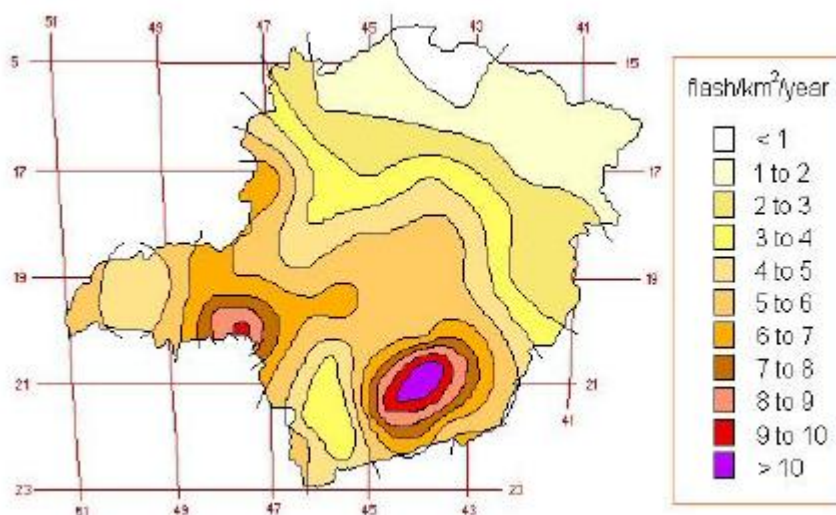
Os contadores de descargas consistem em equipamentos que detectam a variação dos campos elétricos provenientes das descargas. Quando o nível da tensão induzida na antena de campo elétrico do contador, em sua frequência de operação, alcança um determinado limiar, significa a ocorrência de uma descarga num raio determinado (~20 km), sendo acionado um contador eletromecânico.

Os tipos de contadores mais utilizados são os contadores CIGRÉ de 500 Hz e de 10 kHz, sendo que o segundo foi desenvolvido para uma melhor discriminação entre descargas nuvem-solo e descargas de nuvens. É um método de obtenção direta de densidade de descargas plenas para a terra que oferece boa representatividade da atividade atmosférica de uma determinada região, obtida através da interpolação dos dados de incidência registrados por cada contador constituinte da rede de medição.

Para se cobrir uma grande área com boa precisão, são necessários vários contadores. Devido aos custos e problemas de logística de comunicação de

dados para muitas estações, a aplicação dos contadores é tradicionalmente limitada a regiões não muito extensas.

Figura 4: Exemplo de mapa de densidade obtido por rede de contadores instalada em Minas Gerais



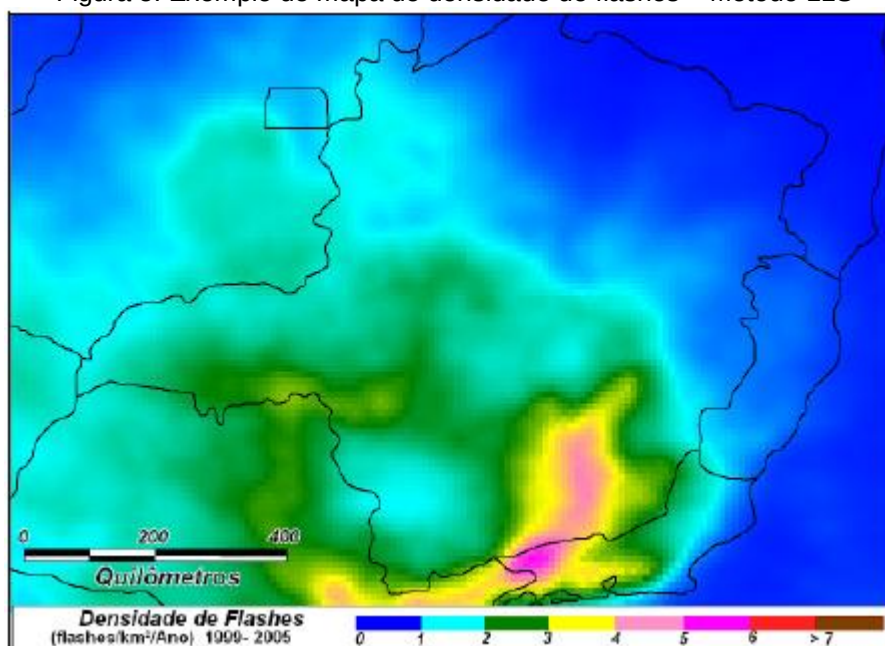
Fonte: Cemig

2.3.4 Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas (LLS)

O Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas consiste em uma rede formada por estações detectoras (sensores) tipicamente distantes entre si de 200 a 400 km. Estes sensores captam o sinal do campo eletromagnético irradiado pela descarga e, utilizando uma ou mais técnicas de localização (tempo de chegada, indicador de direção e técnica interferométrica), indica a localização da descarga (latitude e longitude), tempo de ocorrência e estimativa da amplitude da corrente, entre outros parâmetros. (Cummins, 1998)

Através dos dados de descargas armazenados na central de processamento do LLS e utilizando-se softwares de geoprocessamento, torna-se possível traçar mapas de densidades de descargas, caracterizando-se a densidade de descargas da região que se deseja estudar.

Figura 5: Exemplo de mapa de densidade de flashes – Método LLS



Fonte: Cemig

2.4 MECANISMOS DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A dinâmica que envolve os desligamentos das linhas de transmissão por descargas atmosféricas permite identificar as ações mais eficazes para melhoria do desempenho das linhas de transmissão.

Os índices que expressam o desempenho da linha de transmissão em termos da qualidade de energia entregue as cargas consumidoras levam em conta o tempo de duração e o número de desligamentos de cada linha de transmissão.

Considerando o fato que 70% dos desligamentos não programados são referentes a descargas atmosféricas (CEMIG, 1993), o estudo deste fenômeno se fez necessário para a definição de práticas consistentes, capazes de contribuir na melhoria dos índices de desempenho das linhas de transmissão.

De acordo com classe de tensão e extensão da linha de transmissão, são estabelecidos limites para ocorrência de desligamentos anuais em uma linha de transmissão. Através da tabela 1, pode-se perceber que quanto maior a

tensão de operação da linha menor é o número máximo de desligamentos anuais.

Quadro 1: Níveis de Isolamento por classe de tensão apresentando valores de sobretensão e índices máximos de desligamentos.

Nível de tensão de operação da linha	Valor mínimo da Tensão Suportável ao Impulso TSI(kV)	Valor usual de TSI ou NBI (kV)	Número máximo de desligamentos (d/100 km/ano)
69	380	450	10-15
138	650	850	10
230	975	1200	5
345	1240	1350	2-3
500	1612	1750	1-2

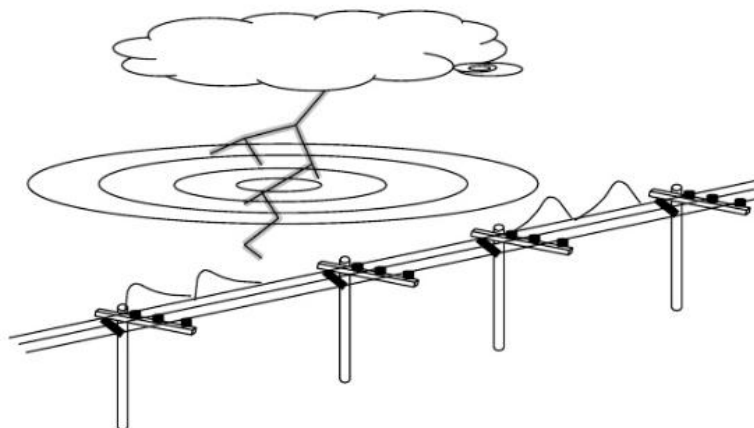
Fonte: (Adaptada de Visacro, 2002)

Atualmente trabalha-se com dois conceitos de incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão: as descargas indiretas e diretas. Neste tópico são estudados tais conceitos.

2.4.1 Incidência Indireta

A sobretensão provocada por incidência indireta, também conhecida como tensão induzida, é provocada pelo campo eletromagnético que ilumina a linha que transmite energia quando uma descarga atmosférica incide nas proximidades do seu percurso. Nestas linhas de transmissão, também associada à onda de tensão induzida, existe uma onda de corrente que trafega pelos condutores da linha. A tensão induzida é, na realidade, a solução do cálculo da integral do campo elétrico entre os condutores e o solo.

Figura 6: Representação de uma LT sendo iluminada pelo campo eletromagnético gerado por descargas atmosféricas.



Fonte: VISACRO, 2005.

Quando o campo gerado pela corrente de retorno ilumina a linha de transmissão estabelece-se nos pontos iluminados uma onda de tensão associada ao campo eletromagnético incidente, que se propaga ao longo da linha com uma corrente associada.

De acordo com Visacro (2005), a onda de tensão induzida por descarga atmosférica possui o tempo de crescimento de sua frente diretamente relacionado ao tempo de crescimento da onda de corrente de retorno da descarga atmosférica, sendo praticamente diretamente proporcional ao valor de pico da corrente e aproximadamente inversamente proporcional ao tempo de frente. Após a passagem pelo valor de pico da corrente de retorno, o valor da tensão induzida decresce rapidamente, se anulando após um curto intervalo de tempo, evidenciando a grande influência do campo eletromagnético gerado durante o intervalo do tempo de frente da corrente. Após o tempo de pico, o valor da variação da corrente decresce substancialmente se comparado com os instantes iniciais da descarga, e a tensão induzida tende a se anular.

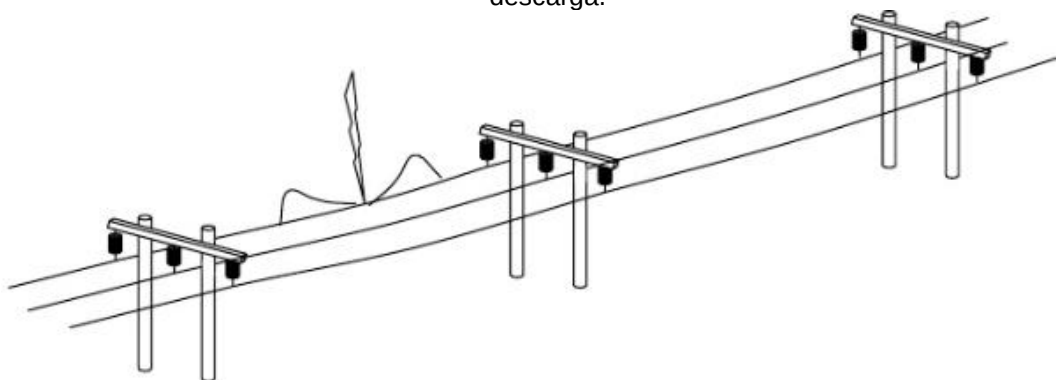
A onda de tensão induzida ao chegar a uma estrutura aterrada (poste concreto ou torre metálica) pode ser capaz de provocar o rompimento dos isoladores e gerar um curto-circuito. Principalmente em linhas de média e baixa tensão onde os níveis de isolamento são menores.

2.4.2 Incidência direta

2.4.2.1 Flashover

Também conhecida como Descarga disruptiva no Isolamento, o Flashover é o mecanismo de falha no isolamento que pode ser associado à incidência de uma descarga atmosférica em um condutor energizado da linha de transmissão. Este tipo de incidência pode ocorrer na situação em que a linha de transmissão não possui cabos de blindagem ou devido à falha no sistema de blindagem.

Figura 7– Linha trifásica, sem cabos de blindagem sendo atingida diretamente por uma descarga.



Fonte: VISACRO, 2005.

Normalmente, a falha do sistema de blindagem ocorre em situações em que a amplitude da corrente de descarga é muito reduzida, sendo esta capaz de penetrar na área protegida e atingir os condutores energizados.

Em uma linha de transmissão, um parâmetro muito importante e necessário para o entendimento deste fenômeno é a impedância de onda. A impedância de onda Z_L pode ser obtida através da equação (1) abaixo:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo, ω o valor da frequência angular e j a unidade complexa. Para situações de propagação de ondas impulsivas rápidas ou de alta frequência em linhas de transmissão, o valor da impedância de onda tende para o valor da impedância de surto da linha, sendo a esta calculada como a raiz quadrada do quociente entre indutância (L) e capacitância (C) da linha ($Z_s = [L/C]^{1/2}$) (VISACRO, 2002).

Na maioria dos casos, o valor de sobretensão ao qual é submetido o isolador é suficiente para causar o rompimento do isolamento da linha de transmissão e para estabelecer um arco elétrico que liga o condutor energizado à estrutura aterrada. Este arco geralmente possui caráter superficial, através do ar circunvizinho ao isolador, e em alguns casos possui caráter volumétrico, danificando o isolador.

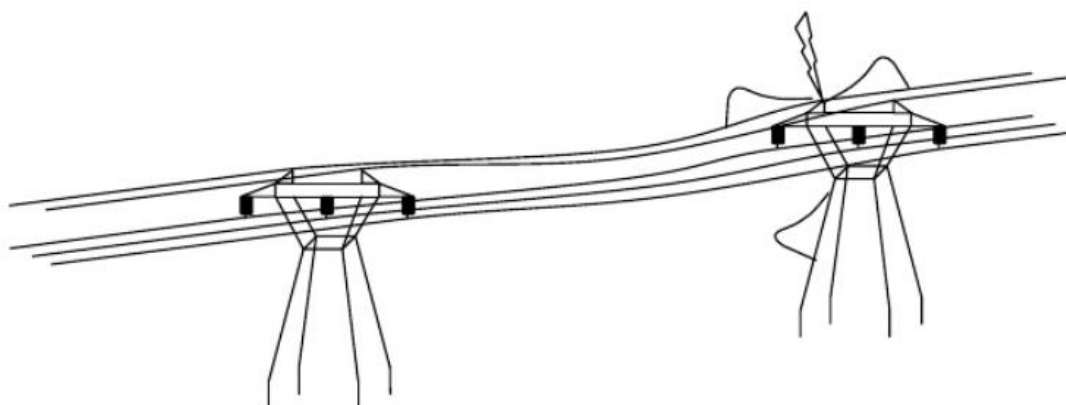
A corrente proveniente da descarga atmosférica flui rapidamente em direção a terra pelo arco elétrico formado entre o condutor energizado e a estrutura aterrada. Em muitos casos o arco pode se manter sustentado pela própria tensão de operação da linha de transmissão, pois, uma vez estabelecido o arco elétrico, não é necessário um valor de tensão elevado para sustentá-lo (VISACRO, 2006).

A sustentação do arco pelo sistema configura um curto-circuito entre os condutores energizados e a terra. Devido à quantidade de potência disponível no sistema tem-se que, uma falta deste tipo, com circulação de corrente de baixa frequência dos condutores energizados para a terra, pode ser muito destrutiva para o sistema. Nesta situação, o sistema de proteção é sensibilizado por este fluxo decorrente, comandando o desligamento da linha de transmissão.

2.4.2.2 Backflashover

Os cabos de blindagem são posicionados estrategicamente sobre os condutores fase visando descargas atmosféricas nos condutores energizados, prevenindo da descarga evitando assim a incidência direta das descarga disruptiva no Isolamento (Flashover). Entretanto, mesmo com esta proteção existe ainda a possibilidade de ocorrer falha no isolamento quando uma descarga atmosférica incide no condutor de blindagem. Este diferente mecanismo é conhecido como descarga disruptiva de retorno, ou Backflashover.

Figura 8– Linha trifásica, sendo atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica



Fonte: VISACRO, 2005.

Ao incidir sobre o condutor de blindagem, sendo no meio de vão ou diretamente na estrutura aterrada (torres metálicas ou postes equipados com condutores de descida) a onda de corrente proveniente da descarga atmosférica propaga-se nos condutores de blindagem, buscando descarregar-se no solo através das diversas estruturas aterradas. Associada a esta corrente propaga também uma onda de tensão cuja amplitude é dada aproximadamente pelo produto entre a amplitude da onda de corrente e impedância de surto da linha.

Adotando-se a simplificação de modelar a torre e o aterramento por suas respectivas impedâncias de surto, e que existe um tempo de trânsito para a propagação desta onda (SOARES Jr, 2005), tem-se que a onda viajante de corrente, ao atingir a primeira estrutura aterrada, dividi-se em duas parcelas, sendo que grande parte da corrente flui pela estrutura aterrada em direção ao solo e o restante continua viajando pelos condutores de blindagem. Em conjunto com a onda de corrente, flui também uma onda de tensão associada pela estrutura aterrada, que em geral possui uma impedância de onda superior à impedância do aterramento. Em ato contínuo, a onda de tensão atinge o aterramento onde sofre uma reflexão, e a amplitude da onda de tensão refletida depende fortemente da relação entre a impedância de onda da torre e do aterramento.

O que define qual parcela da onda continuará a ser transmitida e qual será refletida é o coeficiente de reflexão, dado pela relação entre as impedâncias de surto das duas linhas, onde o índice “1” se refere à linha na qual a onda incidente se propaga:

$$\Gamma = \frac{Z_{S2} - Z_{S1}}{Z_{S2} + Z_{S1}} \quad \text{Equação (2)}$$

Há quatro situações distintas que podem acontecer dependendo do valor assumido pelo coeficiente de reflexão. São elas:

$\Gamma=0$, não há reflexão e a onda de tensão incidente continua se propagando além da descontinuidade, sendo integralmente transmitida ou refratada;

$\Gamma<0$, a impedância de surto a partir da descontinuidade é inferior àquela da primeira linha indicando que, além da onda refletiva se propagar em sentido contrário ao da onda incidente, a sua amplitude também terá sinal contrário;

$\Gamma >0$, a impedância de surto a partir da descontinuidade é superior à da primeira linha e a onda refletiva terá sinal igual ao da onda incidente;

$\Gamma=1$, a impedância de surto a partir da descontinuidade é nula, resultando na reflexão total da onda incidente. A onda refletida terá a mesma amplitude da onda incidente, porém com sinal contrário.

A onda de tensão resultante em qualquer ponto da linha se dará pela soma das ondas incidentes (V^+) e refletidas (V^-), levando-se em conta eventuais defasamentos no tempo entre tais ondas.

O caso mais comum de descontinuidade em uma linha de transmissão se apresenta na impedância de aterramento da torre. Dessa forma, a onda de corrente se propaga até encontrar uma estrutura aterrada e aí se divide em duas parcelas, sendo que a maior desce pela torre e a menor continua a se propagar pelo cabo de blindagem.

2.5 ATERRAMENTO

O aterramento elétrico consiste fundamentalmente de uma estrutura condutora, que é enterrada propositadamente ou que já se encontra enterrada, e que garante um bom contato elétrico com a terra, chamada eletrodo de aterramento, e a ligação desta estrutura condutora aos elementos condutores da instalação elétrica que não são destinados à condução da corrente.

Esta ligação elétrica intencional com a terra é feita para prover a instalação de um potencial de referência e/ou de um caminho de impedância adequada à corrente de falta. Neste último aspecto, a terra deve ser considerada como um elemento do circuito por onde pode circular uma corrente, seja ela, proveniente de uma falta ou descarga atmosférica. No caso da descarga atmosférica o fenômeno é eletrostático a corrente do raio circula pela terra para neutralizar as cargas induzidas no solo. A circulação da corrente apresenta consequências, como por exemplo, tensão de contato e tensão de passo.

Os eletrodos de aterramento podem ter configurações diversificadas de acordo com a sua aplicação, sendo as mais usuais e de ordem práticas as hastes de aterramento dispostas verticalmente, os cabos contrapesos e as malhas de aterramento, ambos formados por eletrodos horizontais. Verifica-se a utilização de hastes verticais, principalmente, quando as camadas mais profundas do solo possuem resistividade muito baixa. Já os eletrodos horizontais são enterrados em profundidades na ordem de 0,5m e usados principalmente quando a maior preocupação é o controle do gradiente de potencial na superfície do solo.

Uma conexão a terra apresenta uma resistência, indutância e capacitância, que caracterizam a impedância de aterramento. Tal impedância pode ser definida como a oposição oferecida pelo solo a uma injeção de corrente elétrica, por meio de eletrodos, e expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante. (VISACRO, 2002)

As torres de linhas de transmissão operam em condições atmosféricas adversas,

e mesmo assim devem manter o desempenho elétrico da linha de transmissão em níveis satisfatórios para o consumidor. Por isso, os suportes da linha devem ser aterrados de maneira a tornar a resistência de aterramento compatível com o desempenho desejado e com a segurança de terceiros. Dependendo da situação da linha de transmissão, tipo e localização das estruturas, sistemas específicos de aterramentos deverão ser projetados.

Este trabalho propõe o estudo do método de aterramento convencional o qual constitui o lançamento de quatro ou seis “pernas” radiais de fios contrapesos a partir do pé da torre, no item 7 este tema será estudado mais profundamente. Tal aterramento tem função de escoar as correntes de descargas e de curto-circuito e aplica-se em áreas rurais, em locais não acessíveis a terceiros.

Outros tipos de aterramento são conhecidos como aterramentos especiais e são específicos para áreas de invasão, loteamentos e circulação constante de

peessoas. Geralmente são em forma de anéis equalizadores e hastes de aterramento e tem como principal finalidade mitigar os potenciais perigosos de passo e de toque ao redor das estruturas.

Neste contexto é importante considerar o modelo de aterramento adequado e capaz de representar todos os aspectos envolvidos, para as condições determinadas pelo fenômeno. Assim, os conceitos apresentados neste tópico deverão ser considerados, são eles: resistividade do solo, resistência de aterramento, impedância de aterramento.

2.5.1 Resistividade do solo

A resistividade do solo (ρ) pode ser conceitualizada como sendo a resistência elétrica medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta de 1 m e área das faces de 1 m²), preenchido com este solo (VISACRO, 2002). A relação entre resistividade e resistência é dada por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{ou} \quad \rho = R \frac{A}{l} \quad \text{Equação (3)}$$

O solo em seu estado natural se comporta como um mau condutor de corrente elétrica, se estiver totalmente seco pode ser considerado como isolante.

Os principais fatores que influenciam na resistividade do solo são: o tipo do solo, solos com camadas estratificadas e materiais diferentes, teor de umidade, compactação e pressão e composição química dos sais dissolvidos na água retida.

As diversas combinações acima resultam em solos com características diferentes e, conseqüentemente, com valores de resistividades distintas. Assim, solos aparentemente iguais têm resistividades diferentes.

Os diversos fatores citados anteriormente são os que têm maior influência na resistividade do solo. Entretanto, na prática, considerando solo reais, é difícil estabelecer uma relação entre tais fatores e a resistividade do solo. Assim, a medição de resistividade é de fundamental importância no projeto e análise do desempenho de aterramentos elétricos.

É importante considerar os valores característicos de resistividade do solo no Brasil. Grande parte do solo do território brasileiro apresenta valores de resistividades muito elevados, sendo superiores a 1000 $\Omega.m$. Particularmente, o estado de Minas Gerais, apresenta um valor médio de resistividade da ordem de 2400 $\Omega.m$ [18, 20], sendo comum valores entre 1000 e 5000 $\Omega.m$ em regiões onde são instalados sistemas elétricos. Esses valores elevados de resistividade justificam-se, em parte, pelo fato dos solos superficiais serem compostos predominantemente de formações antigas.

Nos próximos capítulos cada influência será apresentada com a finalidade de demonstrar a dimensão do seu impacto na obtenção da resistividade do solo.

2.5.1.1 Tipo de solo

Os tipos de solo não podem ser utilizados como parâmetro único para definição da resistividade, pois como já apresentado, para um mesmo tipo de solo pode-se obter em medições de resistividade de diferentes valores.

Embora não possa ser definido um valor para cada tipo de solo, é possível caracterizar faixas de resistividade para diferentes tipos, conforme tabela abaixo.

Quadro 2: Relação entre tipos de solo e resistência.

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE $\Omega.m$
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Ar ila seca	1.500 a 5.000
Argila com 40% de umidade	80
Ar ila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Calcário com acto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Fonte: VISACRO, 2002.

2.5.1.2 Umidade

A resistividade do solo sofre alterações com a umidade. Esta variação ocorre em virtude da condução de cargas no mesmo ser predominantemente iônica. Uma quantidade maior faz com que os sais, presentes no solo, se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável a passagem da corrente iônica. Assim, um solo específico, com concentração diferente de umidade apresenta uma grande variação na sua resistividade. Conclui-se, portanto, que o valor da resistividade do solo acompanha os períodos de seca e chuva de uma região. Os aterramentos melhoram a sua qualidade com solo úmido, e pioram no período da seca.

2.5.1.3 Estratificação do solo

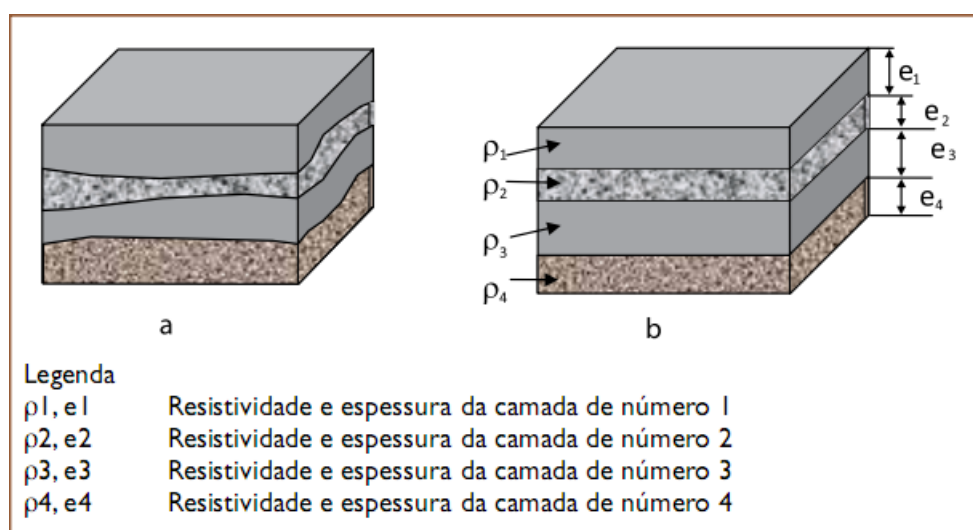
O solo é, geralmente, constituído por diversas camadas, sendo que cada camada apresenta um valor de resistividade e uma espessura. A determinação destes valores e a estratificação do solo são muito importantes para o cálculo

das características do sistema de aterramento, essenciais para o desenvolvimento dos projetos e estudos.

Considerando as características que normalmente apresentam os solos, em virtude da sua própria formação geológica ao longo dos anos, a modelagem em camadas estratificadas, isto é, em camadas horizontais, tem produzido excelentes resultados comprovados na prática.

A figura abaixo mostra duas situações de solo: (a) solo real, (b) solo estratificado.

Figura 9 – Solo Estratificado



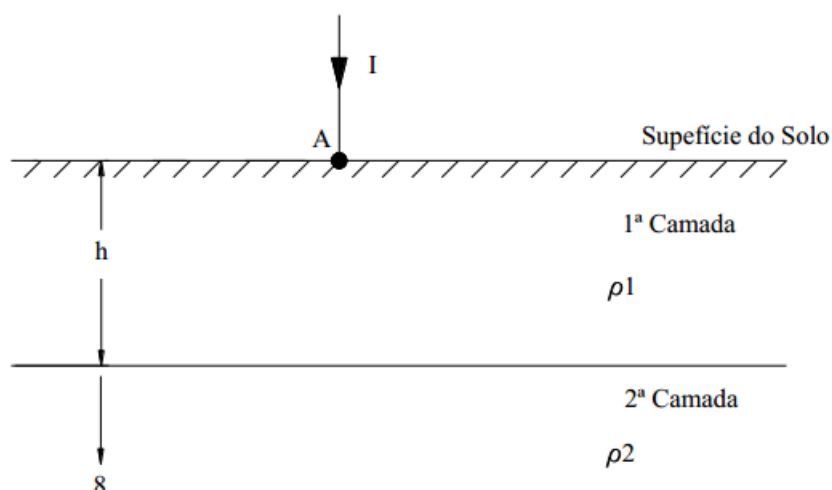
Fonte: Revista "O setor Elétrico"

Para realização da estratificação do solo existem vários modelos, sendo o mais utilizado e apresentado neste trabalho a Modelagem do solo em duas camadas.

Usando as teorias do eletromagnetismo no solo com duas camadas horizontais, é possível desenvolver uma modelagem matemática, que com o auxílio das medidas efetuadas pelo Método de Wenner, possibilita encontrar a resistividade do solo da primeira e segunda camada, bem como sua respectiva profundidade.

Uma corrente elétrica I entrando no ponto A, no solo de duas camadas a figura abaixo, gera potenciais na primeira camada, que deve satisfazer a equação (4), conhecida como Equação de Laplace.

Figura 10: Solo em Duas Camadas.



Fonte: Revista "O setor Elétrico"

$$\nabla^2 V = 0 \quad \text{Equação (4)}$$

V = Potencial na primeira camada do solo

Desenvolvendo a Equação de Laplace relativamente ao potencial V de qualquer ponto p da primeira camada do solo, distanciado de " r " da fonte de corrente A, chega-se a seguinte expressão:

$$V_p = \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + n^2 h^2}} \right] \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

V_p = É o potencial de um ponto p qualquer da primeira camada em relação ao infinito.

ρ_1 = Resistividade da primeira camada.

h = Profundidade da primeira camada.

r =Distância do ponto p à fonte de corrente A .

K = Coeficiente de reflexão, definido por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad \text{Equação (6)}$$

ρ_1 = Resistividade da primeira camada.

ρ_2 = Resistividade da segunda camada.

Pela equação (6), verifica-se que a variação do coeficiente de reflexão é limitada entre -1 e +1.

$$-1 \leq K \leq +1 \quad \text{Equação (7)}$$

2.6 MODELAGEM DAS MALHAS DE ATERRAMENTOS UTILIZADAS TIPICAMENTE EM TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

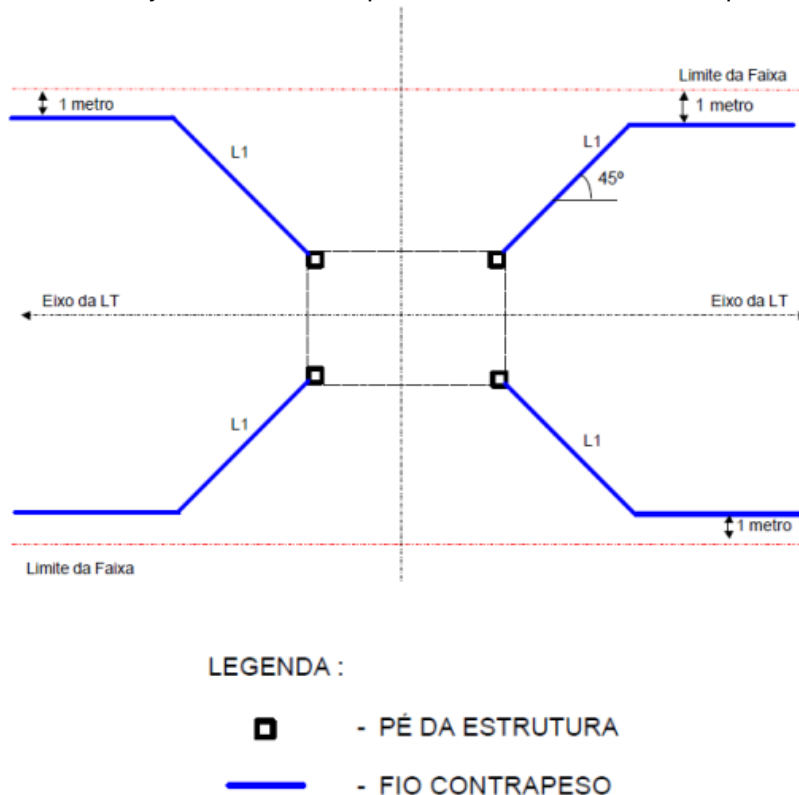
Na literatura atual, é possível encontrar modelos de aterramento que permitem prever variáveis importantes para o dimensionamento da proteção contra surtos, como a impedância de aterramento e níveis máximos de sobretensão. Contudo, observa-se que os modelos baseados na teoria de campos eletromagnéticos (TCE) e teoria de circuitos (TC), apresentam elevada complexidade matemática, sendo geralmente realizados por meio de programas computacionais com alto custo. Em contrapartida nota-se que o modelo baseado na teoria de linhas de transmissão (TLT) requer poucos recursos computacionais e apresentam relativa simplicidade, se comparado aos demais. Este método possui concordância com os demais e, por este motivo, será utilizado neste trabalho.

Neste caso, considera-se o eletrodo como sendo dividido em diversos segmentos, sendo cada um desses segmentos constituído por um circuito RLC. As perdas internas ao condutor devido à resistência série do modelo, por serem pequenas comparadas às perdas para o solo, normalmente não são consideradas.

2.6.1 Contrapeso

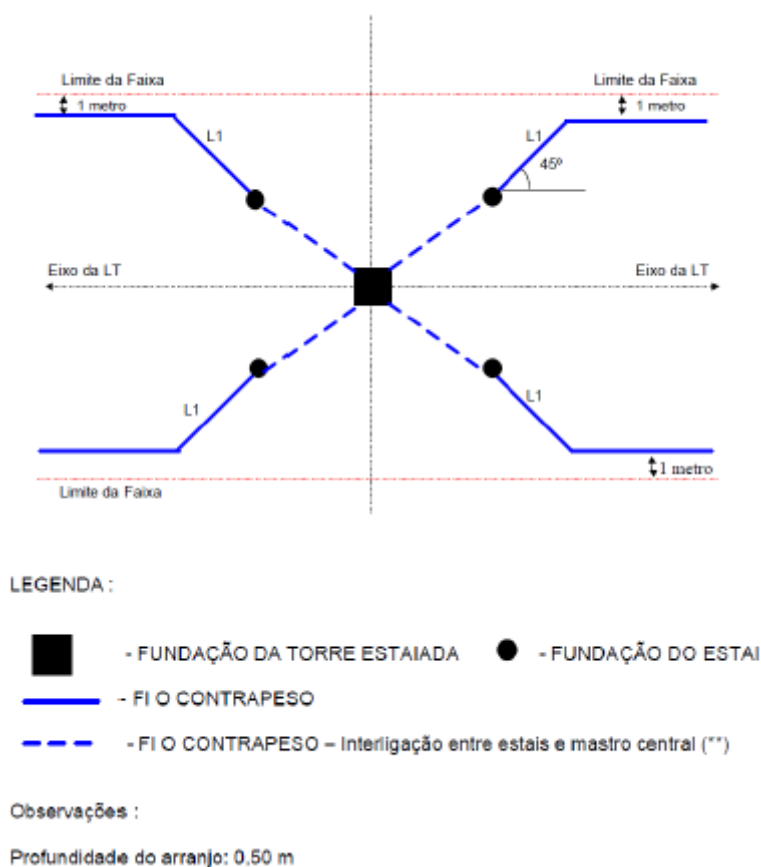
Contrapesos são cabos enterrados no solo a uma profundidade que pode variar de 20 cm a 1 metro, conectados ao pé ou base da torre. Normalmente, constituídos por condutores de cobre, aço zincado ou aço-cobre. Assumem configurações aproximadamente radiais devido às limitações do espaço disponível para instalação. As topologias comumente utilizadas em estruturas autoportantes e estaiadas são mostradas na figura 11.

Figura 11: Arranjo de aterramento para estruturas metálicas autoportantes.



Fonte: CEMIG, 2003.

Figura 12: Arranjo de aterramento para estruturas metálicas estaiadas.



Fonte: CEMIG, 2003.

O uso de um único eletrodo apresenta grande aplicabilidade, porém, em malhas de aterramento espera-se valores reduzidos de impedância de pé de torre. Comumente, os critérios para impedância de pé de torre são definidos da seguinte forma:

- Valor desejável: Resistência menor ou igual a 20 Ohms;
- Valor aceitável: Resistência entre 20 e 30 Ohms;
- Valor crítico: Resistência maior que 30 Ohms.

Geralmente as condições de resistividade do solo não permitem a utilização de apenas um cabo contrapeso, pois com esta configuração os níveis de impedância de pé de torre apresentados não seriam possíveis de alcançar.

Desta forma, justifica-se a composição dos sistemas de aterramento constituídos pela interligação de diferentes eletrodos que são posicionados sob o solo de acordo com as peculiaridades do projeto. Deve-se ressaltar, entretanto, que embora o aumento da quantidade de eletrodos resulte na redução da impedância, esta redução ocorre em proporções cada vez menores (Grcev, 2009). Isto porque, quando dois eletrodos são colocados a certa distância no solo, passa a existir um efeito entre ambos que influencia na capacidade de dispersão de corrente do conjunto. Tal efeito está associado à chamada impedância mútua, definida como sendo a elevação de potencial de um eletrodo, em relação ao terra remoto, devido ao fluxo de corrente no outro eletrodo.

Estudos mostram que a melhor performance do cabo contrapeso é obtida nos primeiros 30 metros e que um dado comprimento de cabo contrapeso é mais bem empregado na faixa de extensão máxima entre 70 e 90 metros de comprimento (devido ao rápido escoamento das correntes para o solo). Valores superiores não têm efetividade no escoamento de correntes impulsivas.

O estudo de caso proposto no capítulo 7, pretende verificar os impactos para resistência de pé de torre causados pela variação da área da malha de aterramento, constituída pelo produto entre o comprimento do cabo contrapeso “L” e a distância “d” entre eles, além de verificar a redução desta variável para a configuração com quatro e/ou seis fios contrapesos.

2.6.2 Faixa de servidão

As faixas de servidão, também chamadas de faixas de segurança, são áreas do terreno com restrição imposta à faculdade de uso e gozo do proprietário, cujo domínio e uso é atribuído a concessionária ou proprietário da LT, para permitir a implantação, operação e manutenção do seu sistema elétrico (Cemig, ND-5.1).

O conhecimento da largura da faixa de servidão constitui um parâmetro fundamental para determinação da malha de aterramento, isto porque a partir dela determina-se a distância “d” entre os cabos contrapesos. Quanto maior esta distância, menor será o valor da resistência. Esta diminuição deve-se à queda da impedância mutua que é diretamente proporcional à distância entre os fios contrapeso.

Em um caso específico, a Cemig estabelece a largura da faixa de acordo com o nível de tensão da linha, conforme a seguir:

- A largura da faixa de segurança para redes de distribuição rurais até 23,1kV é 15 metros, distribuídos em 7,5 metros de cada lado em relação ao eixo da rede.
- A largura da faixa de segurança para redes de distribuição rurais de 34,5kV é 20 metros, distribuídos em 10 metros de cada lado em relação ao eixo da rede.
- A largura da faixa de segurança de uma linha de transmissão de energia elétrica (tensão igual ou superior a 69kV) deve ser determinada levando-se em conta o balanço dos cabos devidos à ação do vento, efeitos elétricos e posicionamento das fundações de suportes e estais. Neste caso deve-se procurar a Cemig antes da construção do padrão de entrada para a definição da largura da faixa de segurança, pois esta definição será pontual e dependerá do tipo da linha de transmissão.

3 METODOLOGIA

Em um primeiro momento será realizado um levantamento bibliográfico do objeto investigado, visando justificar o tema proposto e compreender a base conceitual que o envolve.

Em seguida será realizada a modelagem de um sistema de aterramento de uma torre específica, aplicando a rotina de cálculo adequada.

A rotina de cálculos é abordada em três etapas e mais uma etapa particular para análise do resultado final. Na primeira é feito o estudo do solo, analisando a estratificação, tendo como foco o solo estratificação em duas camadas. No segundo momento são apresentados os cálculos dos parâmetros que envolvem o dimensionamento da resistência de aterramento. E por fim na terceira etapa a apresentação do resultado final desta resistência. Na etapa particular é feito uma análise conclusiva sobre a escolha do método para diminuição da resistência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise

Durante o estudo do sistema de aterramento das LT's é possível perceber o quão importante é o seu dimensionamento correto. Tal dimensionamento é comumente otimizado através da redução da resistência de aterramento, que visa o escoamento das correntes de surto provenientes das descargas atmosféricas ou curto-circuito. Como nada vem do acaso, foram estabelecidos em estudos anteriores alguns valores de referência para a resistência. Estes valores dependem da configuração do aterramento que será utilizado. Para a configuração utilizando 4 fios contrapeso o valor é de 20Ω , já na configuração utilizando 6 fios contrapeso os valores podem variar entre 20 a 30Ω , podendo chegar a 40Ω em casos extremos. No estudo de caso foram realizadas análises em cima dos valores citados.

Uma avaliação importante feita durante os cálculos foi que a relação percentual da diminuição da resistência entre os dois tipos de configuração citados (4 fios contrapeso e 6 fios contrapeso) pode variar entre 30 e 40 por cento. Ou seja, percentual significativo em termos de diminuição de resistência. Contudo, deve-se observar a relação custo-benefício entre os dois métodos, pois a aplicação das configurações não variam somente em função dos valores ôhmicos, mas também em função do custo que aumenta à medida que fios são acrescentados.

4.2 ESTUDO DE CASO

Neste item serão expostos os resultados finais do estudo em questão. Para isto foram realizados estudos com intuito de otimizar a resistência de pé de torre de uma linha aérea de transmissão de energia, de forma a encontrar os valores ôhmicos esperados para que haja bom desempenho do sistema.

Para tal, foram apresentados os dados de entrada para a modelagem dos cálculos e as configurações do sistema de aterramento utilizadas. Enfim, toda a rotina que resulta no valor esperado para a resistência de aterramento da LT.

Acerca dos dados apresentados, deve-se considerar como objeto de estudo uma linha aérea de transmissão de energia com tensão de operação de 230 kV que se encontra em fase de projeto. Parte do sistema de aterramento já foi definida, porém, durante sua concepção o projeto apresentou deficiências em algumas estruturas, devido aos altos valores de resistividade do solo. A empresa não autorizou a exposição de sua marca, portanto, haverá descrição em relação a este detalhe.

A utilização de um caso existente justifica-se em função da agilidade, pois, por exemplo, o processo de medição de resistividade do solo é um trabalho que demanda custos com deslocamento ao local onde a LT será construída, equipamentos específicos de medição e pessoal qualificado para realização do trabalho.

O presente estudo teve como objetivo modelar o cálculo das resistências de aterramento das estruturas de uma LT em 230 kV, com o intuito de apresentar o método utilizado para diminuir a resistência em cada estrutura crítica no decorrer da LT.

4.3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO ESTUDO DE CASO

4.3.1 Características Básicas da LT 230 kV

O estudo envolve uma linha de transmissão de energia em 230 kV, com as seguintes características:

- Tensão de operação: 230 kV;
- Cabo Condutor: CAA 795 MCM - 45/7 fios "TERN";

- Cabos pára-raios: Aço galvanizado 3/8" – EHS - 7 fios, OPGW – SM – 24 FO e CAA 89,6 mm² – 12/7 fios – DOTTEREL;
- Isoladores: suspensão, vidro temperado, CB 254x146 mm, classe 12.000 kgf;
- Aterramento: fio de aço cobreado (Copperweld) - Nº 4 AWG – disposição radial;
- Comprimento aproximado da LT: 90,6 km;
- Número de circuitos: 1;
- Número de pára-raios: 2.

As estruturas utilizadas serão metálicas, treliçadas, galvanizadas, autoportantes, de circuito simples para 230 kV.

4.3.2 DADOS DO SISTEMA DE ATERRAMENTO A SEREM CONSIDERADOS

4.3.2.1 Configuração

As configurações do sistema de aterramento a serem utilizadas são de dois tipos:

- Radial 4 fios contrapeso: eletrodos cilíndricos horizontais, sendo dois de cada lado da estrutura disposição paralela sob a faixa de servidão da LT;
- Radial 6 fios contrapeso: eletrodos cilíndricos horizontais, sendo três de cada lado da estrutura disposição paralela sob a faixa de servidão da LT.

Mais adiante, através dos cálculos, será mostrado que há redução significativa das resistências de aterramento mediante alteração da configuração dos fios contrapeso, justificando assim um método para a diminuição destas.

4.3.2.2 Modelagem da Resistividade do Solo

A resistividade do solo é um dos parâmetros fundamentais para o cálculo da resistência de aterramento e é obtida através do estudo do comportamento da corrente injetada no terreno. Esta análise é realizada no momento da medição através do valor de resistência obtido. Na medição o equipamento utilizado, injeta corrente no solo através da haste que é fincada, assim a corrente percorre o solo até alcançar a outra haste espaçada, com isso é medido o valor da resistência, possibilitando assim fazer a análise de sensibilidade da estratificação do solo diante do comportamento da corrente. A estratificação pode ser em uma, duas, três ou quatro camadas.

A medição é realizada da seguinte maneira: primeiramente, é escolhido o sentido da medição que pode ser longitudinal ou transversal. Opta-se pelo sentido longitudinal, no eixo da LT, quando a LT encontra-se em fase de projeto, pois caso a medição seja realizada desta forma em uma linha existente, corre-se o risco de atingir o cabo contrapeso. Quando realizada em linhas existentes é escolhida a medição na transversal, perpendicular ao eixo da LT, pois, desta forma o risco de atingir o cabo contrapeso é eliminado. Feito isto, fincam-se 2 hastes de cobre de cada lado, a uma profundidade aproximada de 0,50 m e distâncias entre hastes de 2, 4, 8, 16 e 32m.

Com os valores de resistências medidos, é calculada a resistividade através da equação apresentada abaixo:

$$\rho = R * 2 * \pi * a \quad \text{Equação (8)}$$

Onde,

ρ – Resistividade do solo (Ωm);

R - Resistência do solo medida (Ω);

a - Espaçamento entre haste (m);

O quadro (3) abaixo mostra os valores de resistividade medidos das estruturas da LT em questão.

Quadro 3: Resistividade do solo modelada a partir de medições em campo.

TORRE	a	2.π.a	Resistência Medida	Resistividade
Nº DA TORRE	(m)	(m)	R (Ω)	ρ (Ω.m)
1 Longitudinal	2	12,60	183,90	2317
	4	25,10	105,80	2656
	8	50,20	52,90	2656
	16	100,50	15,60	1568
	32	201,00		
2 Longitudinal	2	12,60	6,35	80
	4	25,10	3,45	87
	8	50,20	2,41	121
	16	100,50	1,96	197
	32	201,00	1,81	364
3 Longitudinal	2	12,60	11,35	143
	4	25,10	5,73	144
	8	50,20	3,00	151
	16	100,50	1,65	166
	32	201,00	1,42	285
4 Longitudinal	2	12,60	18,44	232
	4	25,10	12,68	318
	8	50,20	5,86	294
	16	100,50	4,46	448
	32	201,00	3,32	667
5 Longitudinal	2	12,60	131,80	1661
	4	25,10	72,00	1807
	8	50,20	31,20	1566
	16	100,50	13,30	1337
	32	201,00	12,70	2553
6 Longitudinal	2	12,60	121,60	1532
	4	25,10	64,20	1611
	8	50,20	29,80	1496
	16	100,50	12,90	1296
	32	201,00	11,30	2271
7 Longitudinal	2	12,60	154,30	1944
	4	25,10	86,80	2179
	8	50,20	39,40	1978
	16	100,50	27,90	2804
	32	201,00	18,20	3658
8 Longitudinal	2	12,60	197,40	2487
	4	25,10	74,90	1880
	8	50,20	36,60	1837
	16	100,50	14,80	1487
	32	201,00	0	0

9 Longitudinal	2	12,60	66,50	838
	4	25,10	32,70	821
	8	50,20	9,98	501
	16	100,50	4,55	457
	32	201,00	2,27	456
10 Longitudinal	2	12,60	96,80	1220
	4	25,10	48,70	1222
	8	50,20	17,30	868
	16	100,50	7,50	754
	32	201,00	3,70	744
11 Longitudinal	2	12,60	77,90	982
	4	25,10	40,90	1027
	8	50,20	18,90	949
	16	100,50	7,90	794
	32	201,00	3,60	724

4.3.2.2.1 Método Gráfico para Estratificação do Solo

Neste momento serão realizadas análises das curvas geradas a partir dos dados medidos em campo apresentados no item anterior.

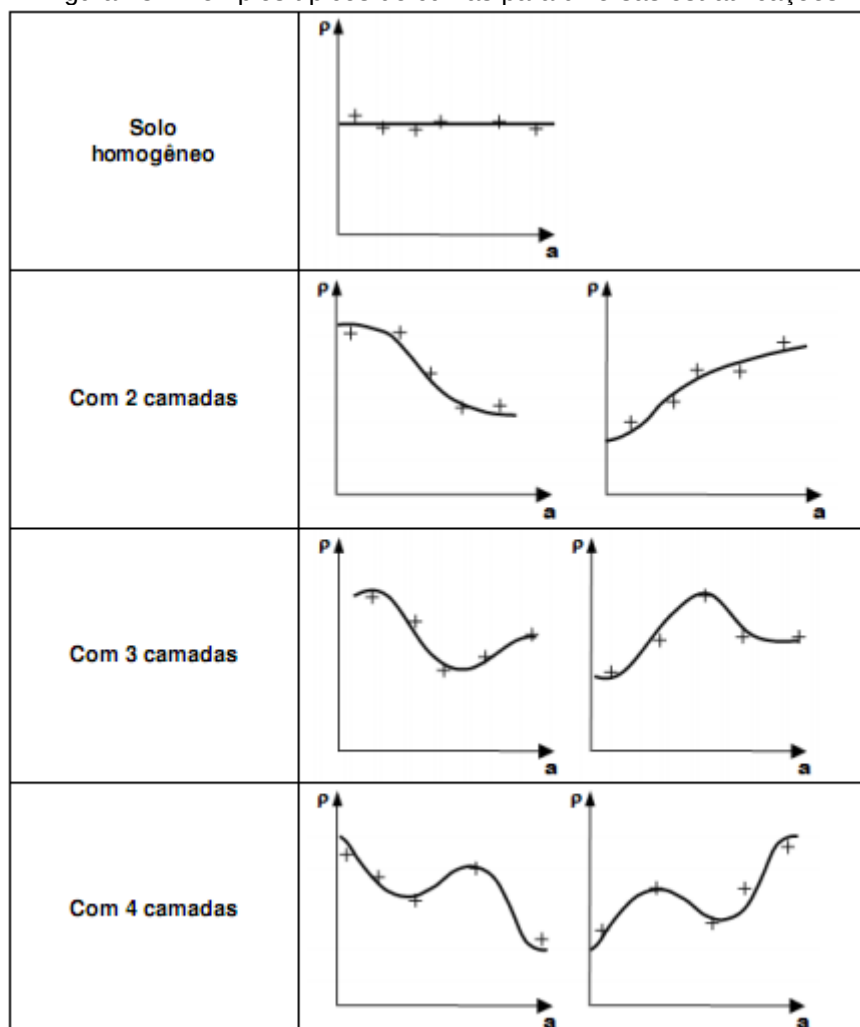
Após a obtenção da resistividade do solo, é realizada a análise de sensibilidade da estratificação através das curvas Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) apresentadas abaixo. Lembrando que a análise é feita em cada ponto de locação da estrutura no decorrer da LT.

Durante a análise de sensibilidade é estudado o comportamento do solo em função das suas camadas. É importante observar que em alguns casos a curva, Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre haste (a), pode apresentar pontos críticos com valores muito altos. Tais pontos podem prejudicar a análise. Quando ocorrer este tipo de situação o ponto deve ser expurgado. O mesmo deve ser feito para valores muito baixos.

Este fato acontece quando a resistência é medida em solos com presença não aparente de rocha (valores de resistência muito altos) e solos com presença de água próxima da superfície (valores de resistência muito baixos).

Abaixo são apresentadas as curvas utilizadas como parâmetro para identificar o comportamento do solo estratificado em uma, duas, três e quatro camadas respectivamente. Estas curvas foram encontradas em estudos anteriores, e são tratadas como base para análise de sensibilidade do comportamento da Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a).

Figura 13: Exemplos típicos de curvas para diversas estratificações



Fonte: ABNT NBR 7117:2012

Para análise de sensibilidade do solo, as curvas Resistividade do solo (ρ) x Espaços entre hastes (a), foram projetadas para cada torre, como mostrado a seguir, afim de compará-las com as curvas apresentadas anteriormente e identificar a modelagem do solo em relação as suas camadas. Pôde-se perceber, portanto, que, com os valores obtidos nas medições, o caso apresentado tem solo estratificado em duas camadas no decorrer de toda a LT.

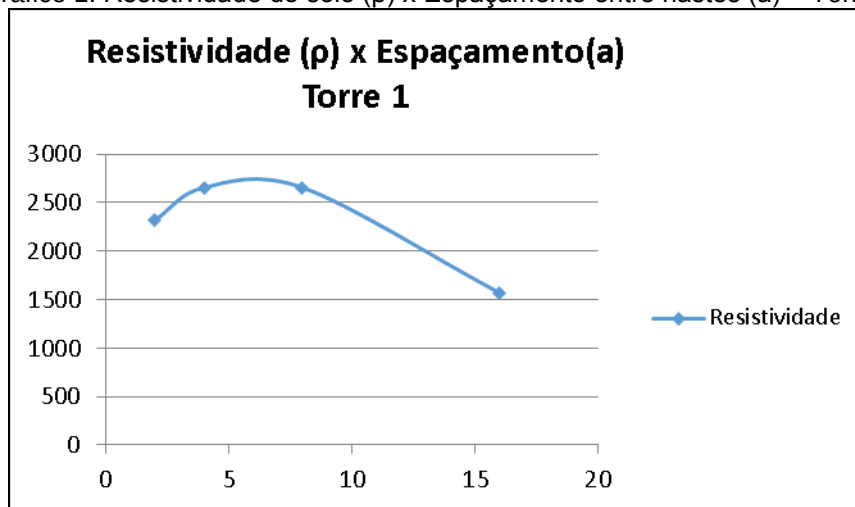
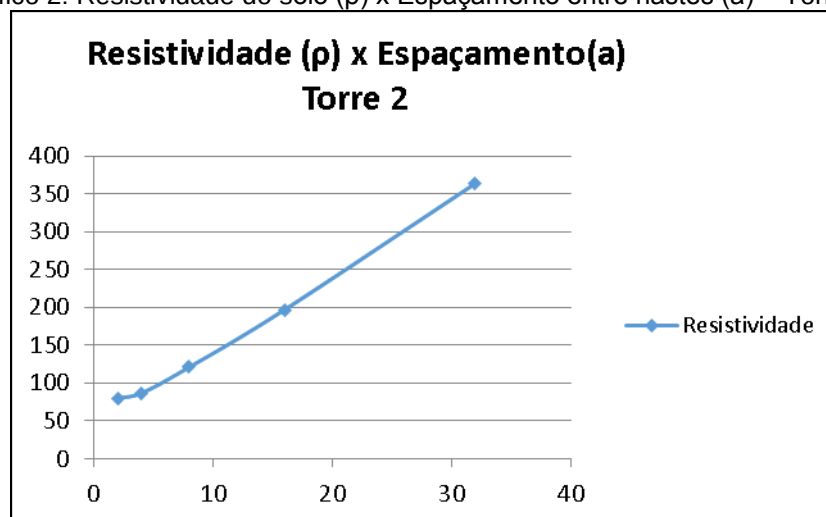
Gráfico 1: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 1Gráfico 2: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 2

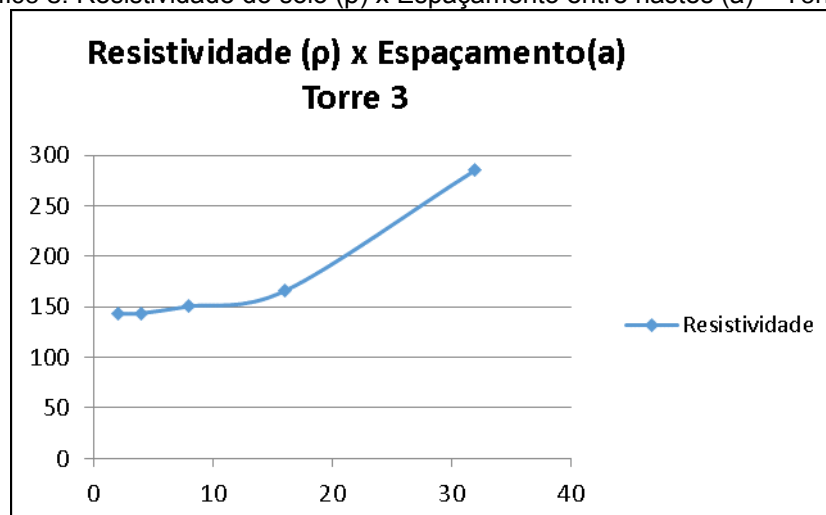
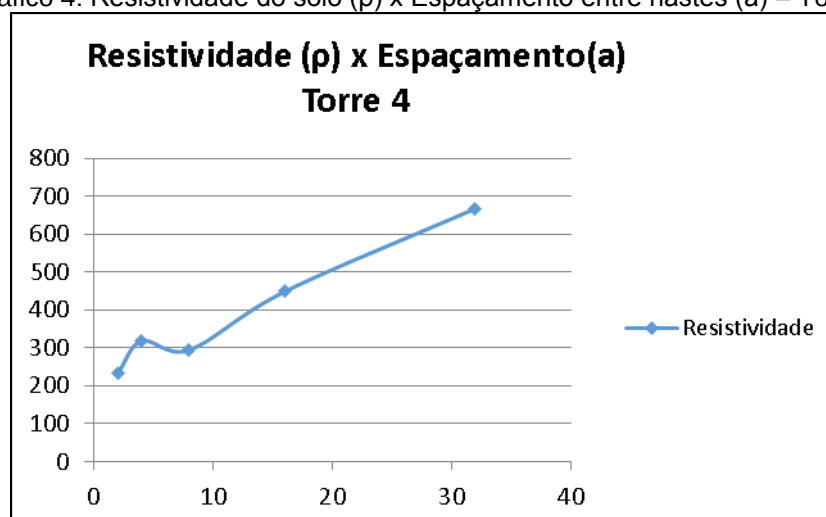
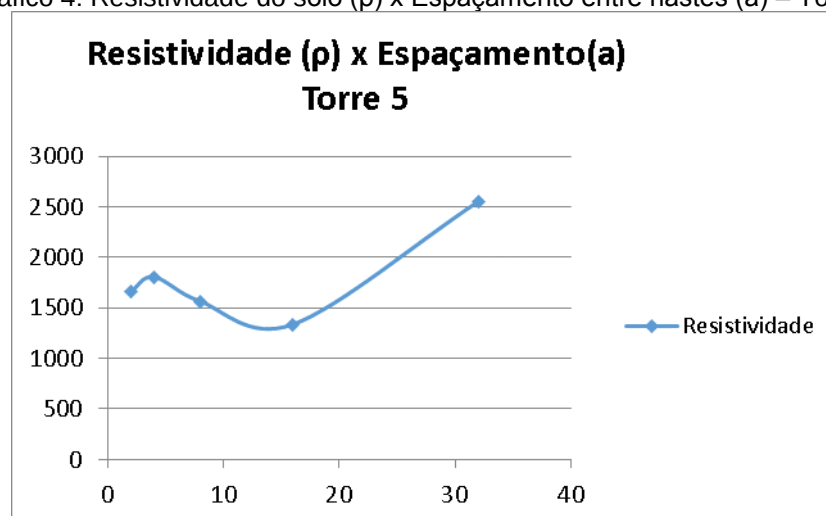
Gráfico 3: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 3Gráfico 4: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 4Gráfico 4: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 5

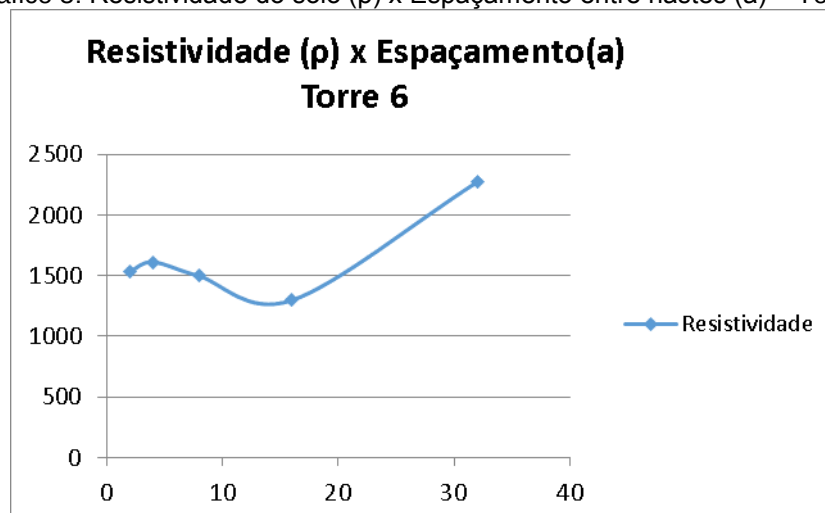
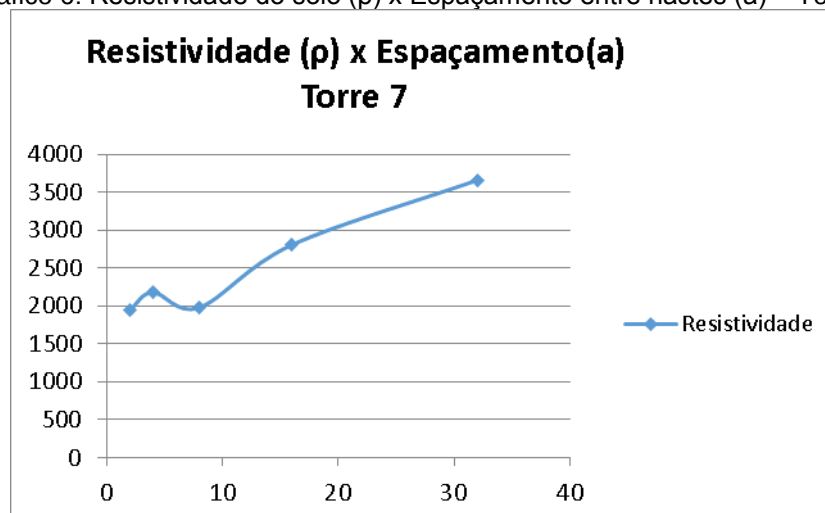
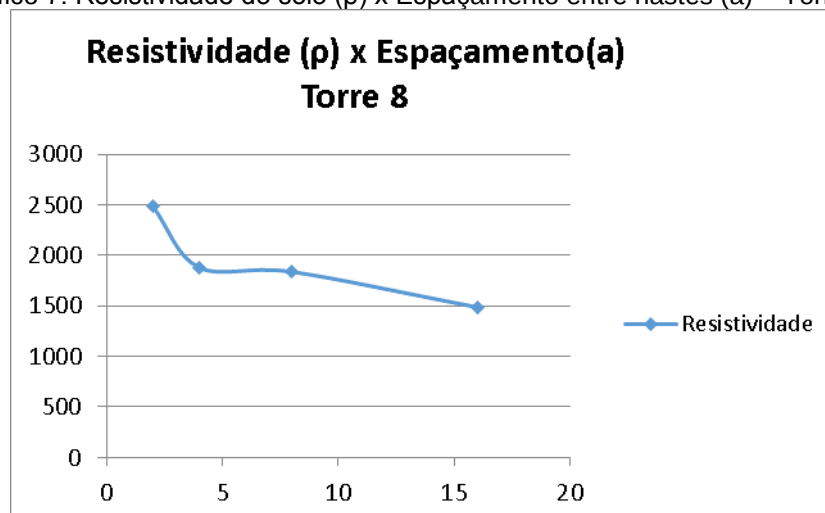
Gráfico 5: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 6Gráfico 6: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 7Gráfico 7: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 8

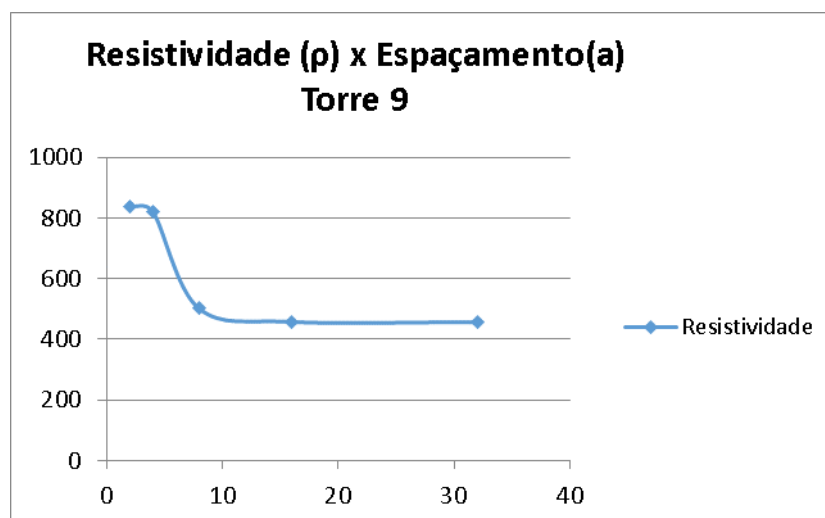
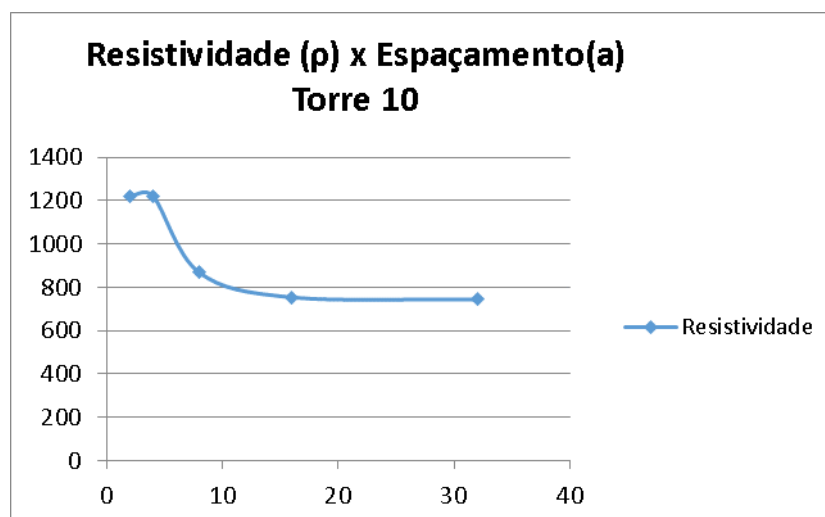
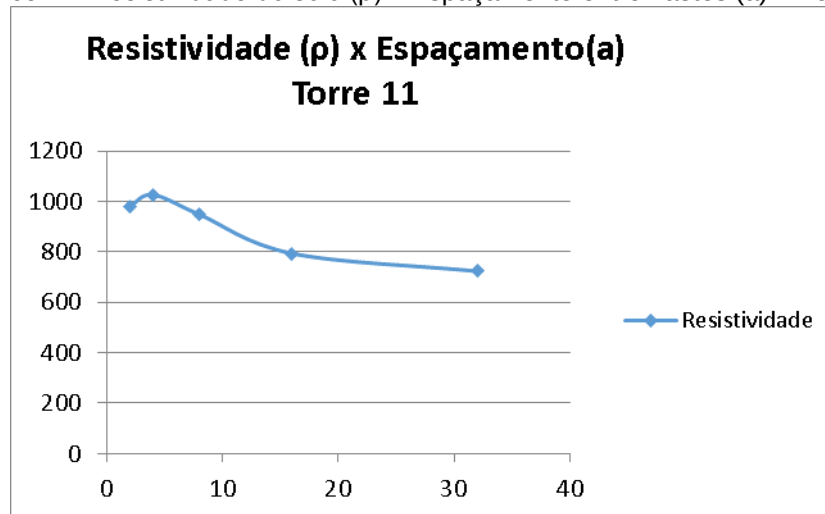
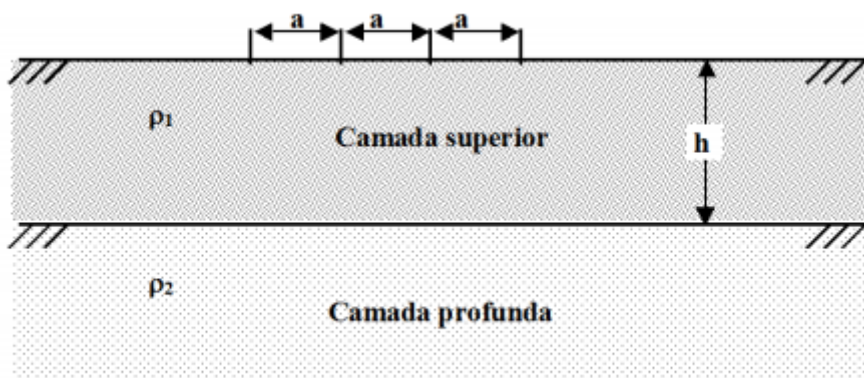
Gráfico 9: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 9Gráfico 10: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 10

Gráfico 11: Resistividade do solo (ρ) x Espaçamento entre hastes (a) – Torre 11

Além de identificar o número de camadas do solo, durante a análise de sensibilidade das curvas também é identificada a espessura da primeira camada (h).

Conforme a figura abaixo, pode-se perceber que h corresponde a espessura da primeira camada e para segunda camada é considerada espessura com valor infinito.

Figura 14: Solo estratificado em duas camadas



Fonte: ABNT NBR 7117:2012

A espessura da primeira camada (h) é encontrada seguindo os seguintes passos:

- a) Determinar a relação ρ_2/ρ_1 , onde ρ_2 é a resistividade obtida na última medição (maior valor de **a** medido) e ρ_1 é a resistividade obtida na primeira medição (menor valor de **a** medido). Aplicando esta etapa no projeto estudado, pode-se chegar aos seguintes valores de ρ_2/ρ_1 .

Quadro 4: Obtenção da relação de ρ_2/ρ_1

TORRE	A	Resistividade	ρ_1 ($\Omega.m$)	ρ_2 ($\Omega.m$)	ρ_2/ρ_1
Nº DA TORRE	(m)	ρ ($\Omega.m$)			
1 Longitudinal	2	2317	2317	1568	0,68
	4	2656			
	8	2656			
	16	1568			
	32				
2 Longitudinal	2	80	80	364	4,55
	4	87			
	8	121			
	16	197			
	32	364			
3 Longitudinal	2	143	143	285	1,99
	4	144			
	8	151			
	16	166			
	32	285			
4 Longitudinal	2	232	232	667	2,88
	4	318			
	8	294			
	16	448			
	32	667			
5 Longitudinal	2	1661	1661	2553	1,54
	4	1807			
	8	1566			
	16	1337			
	32	2553			
6 Longitudinal	2	1532	1532	2271	1,48
	4	1611			
	8	1496			
	16	1296			
	32	2271			
7 Longitudinal	2	1944	1944	3658	1,88
	4	2179			
	8	1978			
	16	2804			
	32	3658			
8 Longitudinal	2	2487	2487	1487	0,60
	4	1880			
	8	1837			
	16	1487			
	32	0			

9 Longitudinal	2	838	838	456	0,54
	4	821			
	8	501			
	16	457			
	32	456			
10 Longitudinal	2	1220	1220	744	0,61
	4	1222			
	8	868			
	16	754			
	32	744			
11 Longitudinal	2	982	982	724	0,74
	4	1027			
	8	949			
	16	794			
	32	724			

- b) Após obter os valores de ρ_2/ρ_1 , extrair do quadro 5 o valor de μ_0 para ρ_2/ρ_1 , onde μ_0 é o coeficiente de permeabilidade do solo. Os dados obtidos serão mostrados no próximo passo.

Quadro 5: μ_0 em função de p_2/p_1

p_2/p_1	M_0	p_2/p_1	M_0	p_2/p_1	M_0
0,001	0,684	0,70	0,936	14,5	1,413
0,002	0,684	0,75	0,948	15,0	1,416
0,003	0,685	0,80	0,959	15,5	1,418
0,003	0,685	0,85	0,970	16,0	1,421
0,004	0,686	0,90	0,981	16,5	1,423
0,005	0,686	0,95	0,990	17,0	1,425
0,005	0,686	1,0	1,000	17,5	1,427
0,006	0,687	1,5	1,078	18,0	1,429
0,007	0,687	2,0	1,134	18,5	1,430
0,008	0,688	2,5	1,177	19	1,432
0,009	0,688	3,0	1,210	20	1,435
0,010	0,689	3,5	1,237	30	1,456
0,015	0,691	4,0	1,260	40	1,467
0,02	0,694	4,5	1,278	50	1,474
0,03	0,699	5,0	1,294	60	1,479
0,04	0,704	5,5	1,308	70	1,482
0,05	0,710	6,0	1,320	80	1,484
0,06	0,715	6,5	1,331	90	1,486
0,07	0,720	7,0	1,334	100	1,488
0,08	0,724	7,5	1,349	110	1,489
0,09	0,729	8,0	1,356	120	1,490
0,10	0,734	8,5	1,363	130	1,491
0,15	0,757	9,0	1,369	140	1,492
0,20	0,778	9,5	1,375	150	1,493
0,25	0,798	10,0	1,380	160	1,494
0,30	0,817	10,5	1,385	180	1,495
0,35	0,835	11,0	1,390	200	1,496
0,40	0,852	11,5	1,394	240	1,497
0,45	0,868	12,0	1,398	280	1,498
0,50	0,883	12,5	1,401	350	1,499
0,55	0,897	13,0	1,404	450	1,500
0,60	0,911	13,5	1,408	640	1,501
0,65	0,924	14,0	1,410	1 000	1,501

Fonte: ABNT NBR 7117:2012

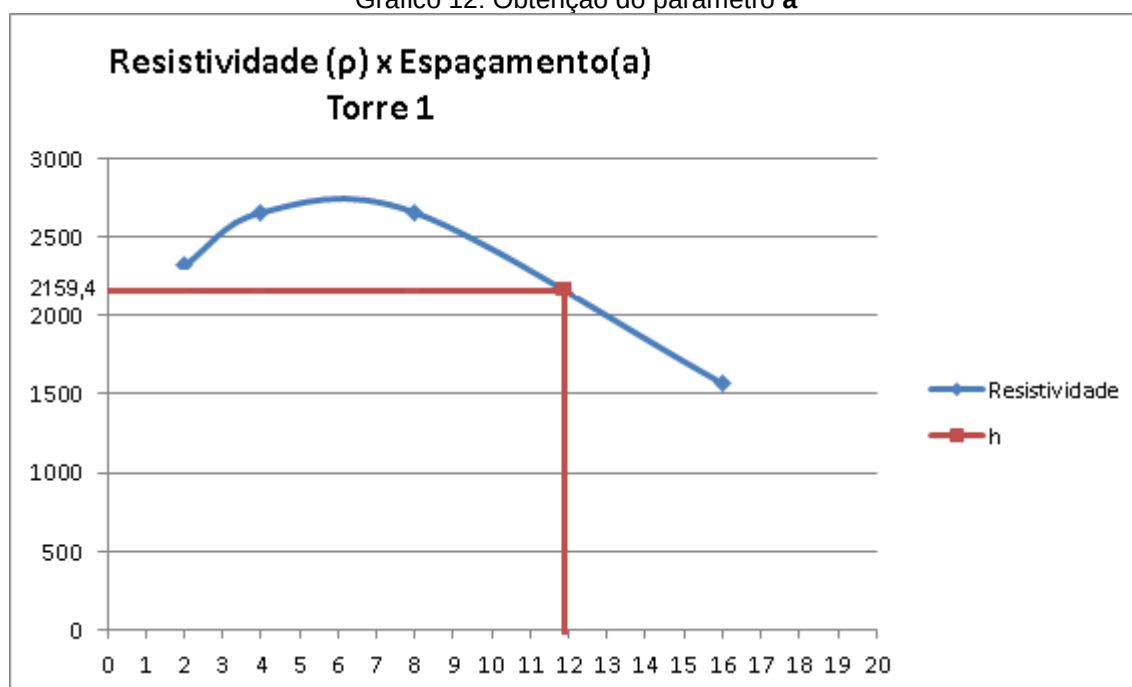
c) Determinar $\rho(h) = \mu_0 \times \rho_1$;

Quadro 6: Determinação de $\rho(h)$

TORRE	A	Resistividade	$\rho_1 (\Omega.m)$	μ_0	$\rho(h)$
Nº DA TORRE	(m)	$\rho (\Omega.m)$			
1 Longitudinal	2	2317	2317	0,93	2159,44
	4	2656			
	8	2656			
	16	1568			
	32				
2 Longitudinal	2	80	80	1,28	102,24
	4	87			
	8	121			
	16	197			
	32	364			
3 Longitudinal	2	143	143	1,13	162,16
	4	144			
	8	151			
	16	166			
	32	285			
4 Longitudinal	2	232	232	1,21	280,72
	4	318			
	8	294			
	16	448			
	32	667			
5 Longitudinal	2	1661	1661	1,08	1790,56
	4	1807			
	8	1566			
	16	1337			
	32	2553			
6 Longitudinal	2	1532	1532	1,08	1651,50
	4	1611			
	8	1496			
	16	1296			
	32	2271			
7 Longitudinal	2	1944	1944	1,13	2204,50
	4	2179			
	8	1978			
	16	2804			
	32	3658			
8 Longitudinal	2	2487	2487	0,91	2263,17
	4	1880			
	8	1837			
	16	1487			
	32	0			

9 Longitudinal	2	838	838	0,88	740,79
	4	821			
	8	501			
	16	457			
	32	456			
10 Longitudinal	2	1220	1220	0,91	1110,20
	4	1222			
	8	868			
	16	754			
	32	744			
11 Longitudinal	2	982	982	0,95	927,99
	4	1027			
	8	949			
	16	794			
	32	724			

- d) Após calcular $\rho(h)$ para cada torre, deve-se utilizar este valor encontrado na curva Resistividade do solo (ρ) x Espaçamentos entre hastes (a). O valor de $\rho(h)$ encontrado no passo anterior será fixado no eixo ρ onde será traçada uma reta até que esta encontre um ponto da curva. Através deste ponto a coordenada a será fixada, conforme exemplificado na figura abaixo. Este valor determinado de a , será o valor de h desejado.

Gráfico 12: Obtenção do parâmetro a 

No quadro 7 abaixo, encontram-se os valores de **h** obtidos.

Quadro 7: Obtenção de h(m)

Nº Estrutura	h (m)
1	11,9
2	4,0
3	6,7
4	7,2
5	4,0
6	2,7
7	10,3
8	19,0
9	0,6
10	1,8
11	8,1

4.3.2.2.2 Resistividade Aparente

Define-se a resistividade aparente como aquela vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerada a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas.

Os estudos realizados anteriormente no item 4.3.2.2 demonstraram como encontrar os valores de ρ_1 , ρ_2 e h . Com base em tais valores é possível realizar o cálculo da resistividade aparente (ρ_a). A resistividade aparente é um parâmetro desejado para o cálculo da resistência de aterramento, que será trabalhado adiante no item 4.3.2.3. Para demonstração do cálculo deste parâmetro serão seguidos os seguintes passos:

- Determina-se o valor do raio r do círculo da área equivalente à área do sistema de aterramento constituídos de eletrodutos horizontais.

$$r = 0,565\sqrt{A}$$

onde, A = área da malha de aterramento;

- Fixa-se a profundidade da malha de aterramento d ;
- Determina-se o fator α da seguinte forma:

se $\rho_2/\rho_1 < 1$ e $d/h > 0,90$, $\alpha = r/2(h-d)$.

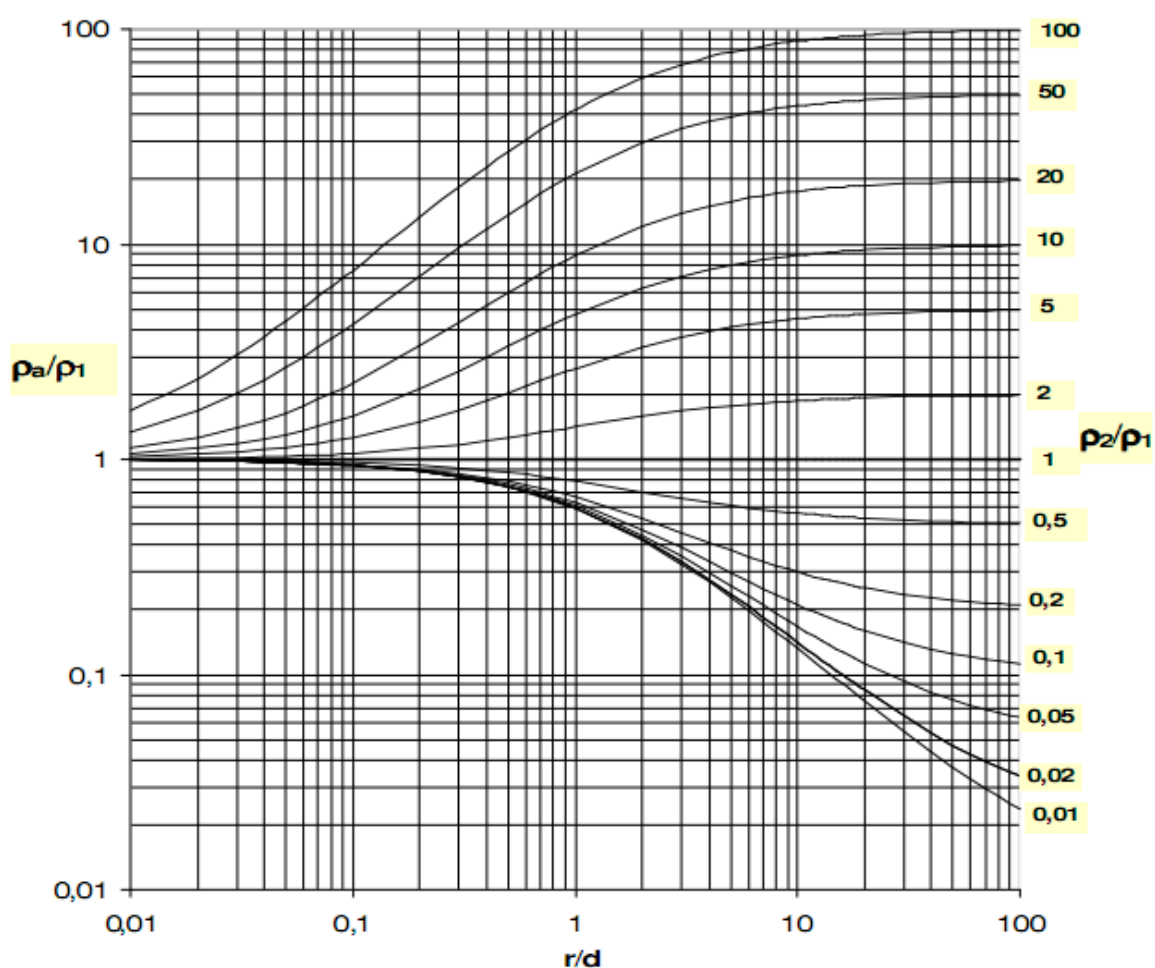
Nas demais condições, $\alpha = r/h$.

A partir do valor de α e da relação ρ_2/ρ_1 determina-se na figura abaixo o valor de N , onde:

$$N = \rho_a/\rho_1$$

Equação (9)

Gráfico 13: Resistividade aparente ρ_a para um solo com duas estratificadas



Fonte: ABNT NBR 7117:2012

Através da equação 10, é possível deduzir o parâmetro ρ_a , conforme equação abaixo:

$$\rho_a = N * \rho_1 \quad \text{Equação (10)}$$

Com isto obtêm-se, portanto, os parâmetros ρ_1 , ρ_2 e h característicos da estratificação do solo em duas camadas, bem como a resistividade do solo (ρ_a), a qual será utilizada na determinação da resistência da malha de aterramento.

4.3.2.3 Cálculo da Resistência de Aterramento

Para o cálculo da resistência de aterramento é utilizada a equação (11) apresentada abaixo:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left[\left(\ln \frac{2L}{a'} \right) - 1 \right] \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

a = raio da seção reta do eletrodo

d = profundidade dos eletrodos

ρ = resistividade aparente (ρ_a)

L = comprimento do fio contrapeso em m.

Dados para cálculo:

- Tipo	fio de aço cobreado
(Copperweld)	
- Seção	4 AWG
- Diâmetro total	5,19 mm
- Raio (a)	2,59 mm
- Profundidade de instalação (d)	[1]
- Comprimento (L)	[2]
- Distância entre cabos contrapeso(a_{12})	38 m
- a'	calculado de acordo com a configuração adotada.

[1] A profundidade típica a ser adotada será de 0,40m.

[2] Comprimento total do cabo contrapeso

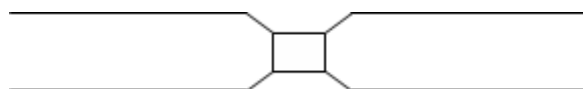
Para o cálculo do parâmetro a' , deve-se considerar primeiramente a configuração da malha de aterramento que será adotada. Isto porque, existem duas equações distintas para modelar cada configuração. Abaixo serão apresentados os métodos matemáticos que definem a' .

Considerando a configuração para 4 fios contrapeso, adota-se a seguinte base cálculo:

$$a' = [(2ad)^{\frac{1}{2}} * (a_{12}(4d^2 + a_{12}^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação (12)}$$

Modelo Real:

Figura 15: Modelo da malha de aterramento – 4 fios contrapeso



Modelo de Cálculo:

Figura 16: Fase L – Método de cálculo

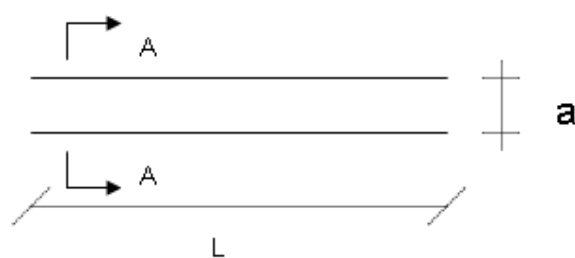
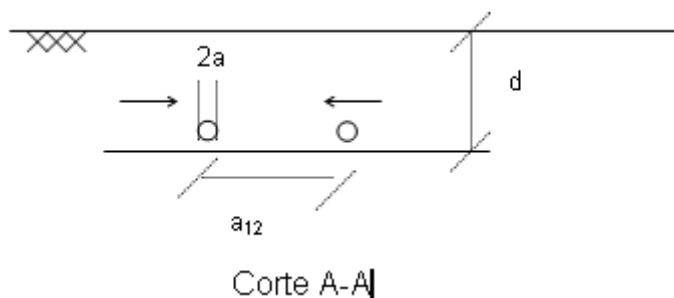


Figura 17: Fio contrapeso – Vista perfil

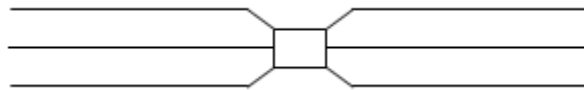


Para a configuração utilizando-se 6 fios contrapeso, utiliza-se a equação abaixo para o cálculo de a' :

$$a' = \left\{ [2ad]^{1/2} [a_{12}(4d^2 + a_{12}^2)^{1/2}]^{1/3} [a_{23}(4d^2 + a_{23}^2)^{1/2}]^{1/3} [a_{13}(4d^2 + a_{13}^2)^{1/2}]^{1/3} \right\}^{1/3} \quad \text{Equação (13)}$$

Modelo Real:

Figura 18: Modelo da malha de aterramento – 6 fios contrapeso



Modelo de Cálculo:

Figura 19: Fase L – Método de cálculo

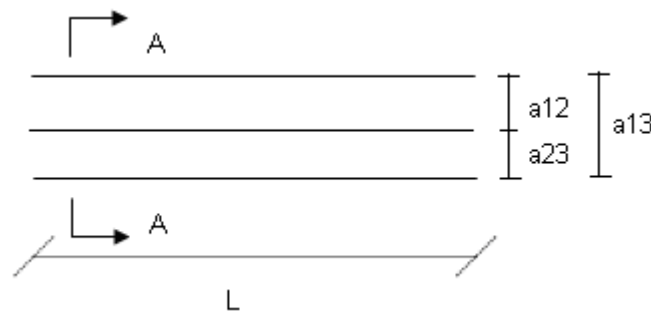
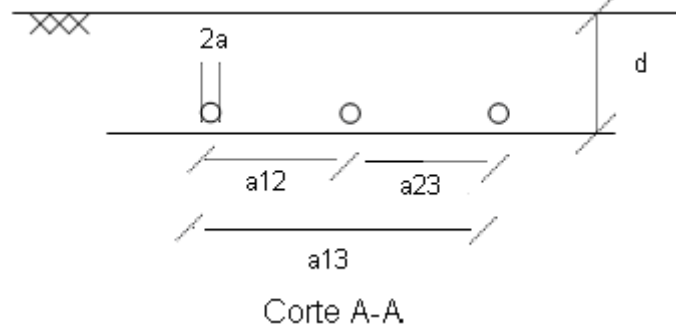


Figura 20: Fio contrapeso – Vista perfil



Dessa maneira concluí-se a modelagem de cálculo da resistência da malha de aterramento.

4.3.2.4 Método utilizado para a diminuição da resistência de aterramento

O método utilizado para a diminuição da resistência de aterramento consiste na variação da configuração da malha de aterramento ou no comprimento do cabo contrapeso. Para demonstrar a diminuição da resistência de aterramento será utilizada como exemplo uma estrutura em que a resistividade medida apresentou um valor muito alto.

A estrutura escolhida foi a Torre 5, propositalmente em função dos valores altos de resistividade do solo.

De acordo com estudos feitos pela CEMIG, foram padronizadas fases que correspondem aos comprimentos usuais de cabo contrapeso utilizados, conforme Quadro 8 abaixo. Durante a rotina de cálculos são realizadas variações nas fases (L), começando com a menor e observando qual a sua influência no cálculo da resistência de aterramento, até que se obtenha o valor esperado de 20Ω . Devido aos custos que envolvem o aumento do comprimento do cabo contrapeso, esta variação é realizada fase a fase até a fase 4 onde têm-se 150 m de cabo contrapeso. A partir desta fase a diminuição da resistência de aterramento passa a ser muito pequena, devido as interações eletromagnéticas entre os condutores, portanto considera-se a fase 4 como o maior comprimento utilizado.

Quadro 8: Comprimento por fase

Tipo Estrutura	Fase	Comprimento (m)	
		L	Total
Autoportante	1	16	32
	2	40	80
	3	80	160
	4	150	300

4.3.2.4.1 Cálculo da resistência T.5: Configuração 4 fios contrapeso

Quadro 9: Dados medidos da torre T.5

TORRE N° DA TORRE	a	2.p.a	Resistência Medida	Resistividade	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO							
	(m)	(m)	R (Ω)	ρ (Ω .m)								
					Seco	Úmido	Ench	Ped.solta	Rocha	Arg.	Aren.	Moledo
5 Longitudinal	2	12,60	131,80	1661	X							
	4	25,10	72,00	1807	X							
	8	50,20	31,20	1566	X							
	16	100,50	13,30	1337	X							
	32	201,00	12,70	2553	X							

Para os valores de resistividade do solo das cinco medições do eixo da torre, foram considerados ρ_1 (resistividade da primeira camada, $a=2\text{m}$) o valor da primeira medição e ρ_2 (resistividade da segunda camada, $a=32\text{m}$) o valor da última medição. Isto porque constatou-se que o solo neste caso é estratificado em duas camadas, conforme a análise do gráfico da figura 27.

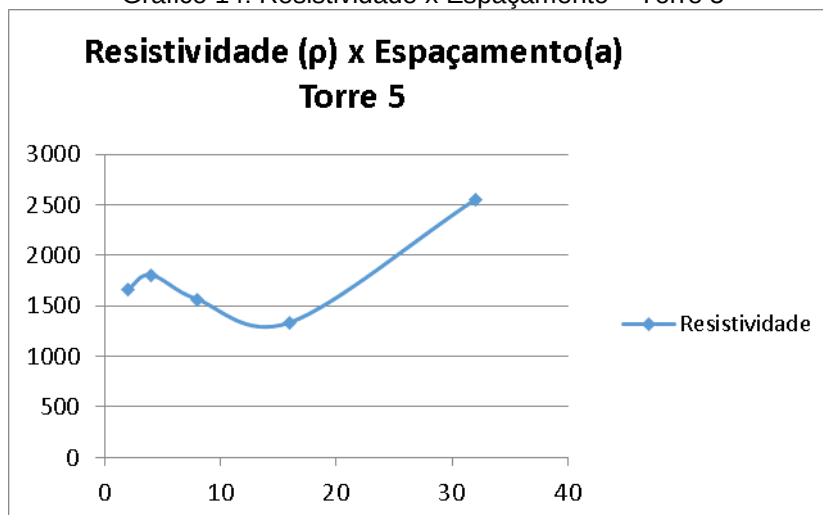
Assim,

$$\rho_1 = 1661 \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_2 = 2553 \Omega \cdot \text{m}$$

Para adquirir o valor de h (profundidade da camada), foi traçado a curva resistividade (ρ) x espaçamento entre haste (m). Mostrada abaixo especificamente para estrutura T.5.

Gráfico 14: Resistividade x Espaçamento – Torre 5



Neste momento é conveniente adiantar o cálculo de $\rho(h)$. Onde:

$$\rho(h) = \mu_o * \rho_1$$

Fazendo a relação ρ_2/ρ_1 , é encontrado o valor de μ_o de acordo com o quadro 5. Assim,

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{2553 \Omega.m}{1661 \Omega.m} = 1,54$$

Analisando o quadro 5 é obtido o valor de $\mu_o = 1,078$.

Com a determinação do parâmetro é possível calcular o $\rho(h)$, conforme abaixo.

$$\rho(h) = \mu_o * \rho_1 = 1,078 * 1661 = 1790,56 \Omega.m$$

O valor de **a** que correspondente ao $\rho(h)$ encontrado é o valor de **h** desejado. Portanto com a análise na curva de resistividade (ρ) x espaçamento entre haste (m) o valor $h = 4,0m$.

Para calcular a resistência de aterramento é preciso determinar os parâmetros que envolvem a equação:

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * (\ln \frac{2 * L}{a'} - 1)$$

Seguindo o roteiro de cálculo do subitem 4.3.2.2, é necessário encontrar valor de ρa antes de aplicar a equação 15. Assim temos:

$$\rho a = N * \rho_1$$

O parâmetro N é obtido da análise do gráfico da figura 16, onde suas curvas são extraídas da relação de $\rho_2/\rho_1 \times \alpha$. A relação ρ_2/ρ_1 já foi calculada e é igual a 1,54. Então é necessário determinar α . Como a relação $\rho_2/\rho_1 < 1$, então:

$$\alpha = \frac{r}{h}$$

$$r = 0,565 * \sqrt{A}$$

O cálculo de A será feito levando em consideração a fase 1, $L = 16\text{m}$.

$$A = 2 * L * d$$

d - Distância entre os fios contrapesos paralelos, 38m (ver modelo para cálculo no item 4.3.2.3)

$$A = 2 * 16\text{m} * 38\text{m} = 1216\text{m}^2$$

$$r = 0,565 * \sqrt{1216} = 19,70\text{m}$$

Substituindo os valores de r e h na equação de α , temos:

$$\alpha = \frac{r}{h} = \frac{19,70\text{m}}{4,0\text{m}} = 4,92$$

Sabendo que $\alpha = 4,92$ e a relação $\rho_2/\rho_1 = 1,54$ é possível fazer a análise da figura 2.1 para obter o valor de N.

$$N \sim 1,30.$$

$$\rho a = N * \rho_1 = 1,30 * 1661\Omega.m = 2159,30\Omega.m$$

Do subitem 4.3.2.3 tem-se a equação para o a' , então:

$$a' = [(2ad)^{\frac{1}{2}} * (a_{12}(4d^2 + a_{12}^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}$$

$$a' = [(2 * 0,00259\text{m} * 0,4\text{m})^{\frac{1}{2}} * (38\text{m}(4,0 * (0,4\text{m})^2 + (38\text{m})^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}} = 1,31$$

Finalmente, com todos os parâmetros calculados é possível obter através da equação abaixo o valor da resistência.

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * (\ln \frac{2 * L}{a'} - 1)$$

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * (\ln \frac{2 * L}{a'} - 1) = \frac{2159,30\Omega.m}{\pi * 16} * (\ln \frac{2 * 16}{1,31} - 1) = 94,32\Omega$$

Como o valor da resistência é muito acima do valor de referência são utilizados alguns métodos para diminuir.

Um dos métodos é a alteração da distância entre o cabo contrapeso e o limite da faixa de servidão (parâmetro a_{12}). Se a queda no valor final da resistência for suficiente, ou seja, aproximar do valor de referência, é então adotado esse

valor de fase na implantação do sistema de aterramento, caso contrário, utiliza-se outro método que será mostrado mais adiante.

Então para demonstração, é alterado o valor de a_{12} . Consideremos $a_{12} = 39\text{m}$. Ou seja, o fio contrapeso sai do pé da torre com um ângulo de 45° até atingir 0,5m da faixa de servidão da LT, seguindo-a paralela até atingir o valor da fase adotada. Dessa maneira, o valor entre os fios contrapeso (a_{12}) é igual a 39m.

$$a' = [(2ad)^{\frac{1}{2}} * (a_{12}(4d^2 + a_{12}^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}$$

$$a' = [(2 * 0,00259\text{m} * 0,4\text{m})^{\frac{1}{2}} * (39\text{m}(4,0 * (0,4\text{m})^2 + (39\text{m})^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}} = 1,33$$

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * (\ln \frac{2 * L}{a'} - 1)$$

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * (\ln \frac{2 * L}{a'} - 1) = \frac{2159,30\Omega.m}{\pi * 16} * (\ln \frac{2 * 16}{1,33} - 1) = 93,67\Omega$$

Com a alteração deste parâmetro não houve diminuição significativa no valor da resistência, mesmo porque o valor do a' teve um aumento de 0,02. Assim adota-se outro método para conseguir diminuir da resistência para aproximação do valor de referência. O método que será utilizado é o aumento da fase L, ou seja, aumentar a quantidade de fio contrapeso. Para isso o valor de a_{12} que será considerado é 38m novamente.

Considerando $L = 40\text{m}$, temos:

$$A = 2 * L * d$$

d – Distância entre os fios contrapeso paralelos (ver modelo de cálculo do item 4.3.2.3)

$$A = 2 * 40\text{m} * 38\text{m} = 3040\text{m}^2$$

$$r = 0,565 * \sqrt{A} = 0,565 * \sqrt{3040} = 31,15\text{m}$$

Substituindo os valores de r e h na equação de α , temos:

$$\alpha = \frac{r}{h} = \frac{31,15\text{m}}{4,0\text{m}} = 7,79$$

Sabendo que $\alpha = 7,79$ e a relação $\rho_2/\rho_1 = 1,54$ é possível fazer a análise da figura 2.1 para obter o valor de N.

$$N \sim 1,40.$$

$$\rho a = N * \rho_1 = 1,40 * 1661\Omega.m = 2325,40\Omega.m$$

Como não houve alteração nos parâmetros da equação de a' para esse método, então considera-se $a' = 1,31$. Então,

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * \left(\ln \frac{2 * L}{a'} - 1 \right)$$

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * \left(\ln \frac{2 * L}{a'} - 1 \right) = \frac{2325,40\Omega.m}{\pi * 40} * \left(\ln \frac{2 * 40}{1,31} - 1 \right) = 57,56\Omega$$

Ainda não conseguiu-se chegar ao valor de referência, mas uma análise considerável é que utilizando este método do aumento de fase (L), houve uma queda de $36,76\Omega$ na resistência ou melhor, uma queda de 60% do valor anterior. Como o objetivo ainda não foi alcançado, será utilizada a fase 3, onde $L = 80\text{m}$.

Considerando $L = 80\text{m}$, tem-se:

$$A = 2 * L * d$$

$$A = 2 * 80\text{m} * 38\text{m} = 6080\text{m}^2$$

$$r = 0,565 * \sqrt{A} = 0,565 * \sqrt{6080} = 44,05\text{m}$$

Substituindo os valores de r e h na equação de α , temos:

$$\alpha = \frac{r}{h} = \frac{44,05\text{m}}{4,0\text{m}} = 11,01$$

Sabendo que $\alpha = 11,01$ e a relação $\rho_2/\rho_1 = 1,54$ é possível fazer a análise da figura 2.1 para obter o valor de N.

$$N \sim 1,50.$$

$$\rho_a = N * \rho_1 = 1,50 * 1661\Omega.m = 2491,50\Omega.m$$

$$R = \frac{\rho_a}{\pi * L} * (\ln \frac{2 * L}{a'} - 1)$$

$$R = \frac{\rho_a}{\pi * L} * (\ln \frac{2 * L}{a'} - 1) = \frac{2491,50\Omega.m}{\pi * 80} * (\ln \frac{2 * 80}{1,31} - 1) = 37,72\Omega$$

Essa tentativa é feita até conseguir o valor de referência de 20Ω , neste caso mesmo utilizando fase 3 ($L = 80\text{m}$) ainda não foi obtido esse valor. Então finalmente é utilizado fase 4 (L).

Considerando fase 4, $L = 150\text{m}$ é repetida toda a rotina de cálculo anterior.

$$A = 2 * 150 * 38 = 11400m^2$$

$$r = 0,565 * \sqrt{A} = 0,565 * \sqrt{11400} = 60,32m$$

$$\alpha = \frac{r}{h} = \frac{60,32}{4,0} = 15,08$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1,54$$

$$N = 1,20$$

$$\rho a = N * \rho_1 = 1,20 * 1661\Omega.m = 1993,20\Omega.m$$

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * (\ln \frac{2 * L}{a'} - 1) = \frac{1993,20\Omega.m}{\pi * 150} * (\ln \frac{2 * 150}{1,31} - 1) = 18,75\Omega$$

Finalmente o valor da resistência a ser considerado para esta configuração, sendo que a aproximação do valor de referência foi conseguido somente na fase 4.

Para os valores de L, é considerado no máximo até 150m. Esta consideração é feita, pois, foi constatado em estudos anteriores, realizados pelas concessionárias, que após essa quantidade de fio contrapeso a variação final da resistência do aterramento é muito pequena, dessa forma não é viável ultrapassar esses valores.

Outro método que pode ser aplicado é a utilização da configuração radial com 6 fios contrapeso. Com essa configuração a queda da resistência de pé de torre é muito grande. Para provar essa afirmação, os cálculos foram apresentados abaixo, ainda utilizando a estrutura T.5 para o estudo.

4.3.2.4.2 Cálculo da resistência T.5: Configuração 6 fios contrapeso

Quadro 10: Dados medidos da torre T.5

TORRE Nº DA TORRE	a	2.p.a	Resistência Medida	Resistividade	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO							
	(m)	(m)	R (Ω)	ρ (Ω.m)								
					Seco	Úmido	Ench	Ped.solta	Rocha	Arg.	Aren.	Moledo
5 Transversal	2	12,60	131,80	1661	X							
	4	25,10	72,00	1807	X							
	8	50,20	31,20	1566	X							
	16	100,50	13,30	1337	X							
	32	201,00	12,70	2553	X							

Antes de iniciar os cálculos, cabe uma observação. Não é necessário repetir toda a rotina de cálculo, pois, com essa configuração é alterado apenas o método de cálculo do a' . Isso acontece, pois é acrescentado na configuração dois fios contrapeso entre os fios existentes, assim diminuindo pela metade a distância entre eles.

Dessa maneira, os parâmetros r , α , ρ_2/ρ_1 , h , N e ρ_a , são aproveitados de acordo com cada fase.

Cálculo do a' :

$$a' = \left\{ [2ad]^{1/2} [a_{12}(4d^2 + a_{12}^2)^{1/2}]^{1/3} [a_{23}(4d^2 + a_{23}^2)^{1/2}]^{1/3} [a_{13}(4d^2 + a_{13}^2)^{1/2}]^{1/3} \right\}^{1/3}$$

Onde:

a_{12} e a_{23} – Distância entre os fios contrapeso (ver modelo real no item 4.3.2.3 configuração utilizando 6 fios contrapeso), igual a 19m.

a_{13} – Distância dos fios contrapeso extremos, nesse caso igual a 38m.

d – Profundidade de instalação dos fios contrapeso.

$$a' = \left\{ [2 * 0,00259 * 0,4]^{1/2} [19(4 * 0,4^2 + 19^2)^{1/2}]^{1/3} [19(4 * 0,4^2 + 19^2)^{1/2}]^{1/3} [38(4 * 0,4^2 + 38^2)^{1/2}]^{1/3} \right\}^{1/3}$$

$$a' = 2,97m$$

Aproveitando os valores encontrados anteriormente de r , α , ρ_2/ρ_1 , h , N e ρ_a , temos, para a primeira tentativa utilizando fase 1, sendo $L = 16m$.

$$r = 19,70m$$

$$\alpha = 4,92$$

$$\rho_2/\rho_1 = 1,54$$

$$h = 4,0m$$

$$N = 1,30$$

$$\rho_a = N * \rho_1 = 1,30 * 1661\Omega.m = 2159,30\Omega.m$$

Com todos os valores apresentados é possível fazer o cálculo final da resistência. Para isso será utilizada a equação abaixo.

$$R = \frac{\rho_a}{\pi * L} * \left(\ln \frac{2 * L}{a'} - 1 \right)$$

$$R = \frac{\rho_a}{\pi * L} * \left(\ln \frac{2 * L}{a'} - 1 \right) = \frac{2159,30\Omega.m}{\pi * 16} * \left(\ln \frac{2 * 16}{2,97} - 1 \right) = 59,16\Omega$$

Com o valor da resistência obtido, é constatado uma queda de $34,51\Omega$ utilizando a mesma fase (L), ou seja, queda de aproximadamente 60%. Na primeira tentativa quase foi atingida a faixa dos valores de referência de 30 a 40Ω .

Dando continuidade aos cálculos, será apresentado para a próxima fase, considerando $L = 40m$. Da mesma maneira, as variáveis r , α , ρ_2/ρ_1 , h e N , são aproveitadas dos cálculos para a configuração 4 fios contrapeso.

$$r = 31,15m$$

$$\alpha = 7,79$$

$$\rho_2/\rho_1 = 1,54$$

$$h = 4,0\text{m}$$

$$N = 1,40$$

$$\rho_a = N * \rho_1 = 1,40 * 1661\Omega.m = 2325,40\Omega.m$$

$$R = \frac{\rho_a}{\pi * L} * \left(\ln \frac{2 * L}{a'} - 1 \right) = \frac{2325,40\Omega.m}{\pi * 40} * \left(\ln \frac{2 * 40}{2,97} - 1 \right) = 42,44\Omega$$

Na prática se fosse alcançado esse valor de 42,44 ohms, seria adotada essa fase, pois 2,44 ohms é um valor muito pequeno em relação ao valor de referência e por isso não influencia no escoamento da corrente para terra.

Em sequência à rotina de cálculo, será apresentado o cálculo para a fase posterior, L= 80m.

$$\rho_a = N * \rho_1 = 1,50 * 1661\Omega.m = 2491,50\Omega.m$$

$$R = \frac{\rho_a}{\pi * L} * \left(\ln \frac{2 * L}{a'} - 1 \right) = \frac{2491,50\Omega.m}{\pi * 80} * \left(\ln \frac{2 * 80}{2,97} - 1 \right) = 29,60\Omega$$

E por fim a resistência utilizando a fase 4, L= 150m.

$$A = 2 * 150 * 38 = 11400\text{m}^2$$

$$r = 0,565 * \sqrt{A} = 0,565 * \sqrt{11400} = 60,32\text{m}$$

$$\alpha = \frac{r}{h} = \frac{60,32}{4,0} = 15,08$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1,54$$

$$N = 1,20$$

$$\rho a = N * \rho_1 = 1,20 * 1661 \Omega.m = 1993,20 \Omega.m$$

$$R = \frac{\rho a}{\pi * L} * \left(\ln \frac{2 * L}{a'} - 1 \right) = \frac{1993,20 \Omega.m}{\pi * 150} * \left(\ln \frac{2 * 150}{2,97} - 1 \right) = 15,29 \Omega$$

Por esse motivo foi importante calcular a resistência para todas as fases, fazer a comparação dos valores de resistência entre as fases. A queda de resistência entre uma fase e outra da mesma configuração, varia de 60 a 70%. Mas o aspecto mais importante a ser considerado é a queda de resistência entre as fases dessa configuração em relação as fases da configuração utilizando 4 fios contrapeso, como é apresentado no quadro abaixo.

Quadro 11: Quadro comparativo dos valores de resistências em função da configuração

TABELA COMPARATIVA DOS VALORES DE RESISTÊNCIAS EM FUNÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DA MALHA DE ATERRAMENTO								
FASES (L)	16m (Ω)	QUEDA (%)	40m (Ω)	QUEDA (%)	80m (Ω)	QUEDA (%)	150m (Ω)	QUEDA (%)
RADIAL - 4 FIOS	93,67	36,84	57,56	26,27	37,72	21,52	21,06	15,28
RADIAL - 6 FIOS	59,16		42,44		29,60		17,84	

Em todas as fases a configuração radial com 6 fios contrapeso consegue uma resistência menor, ou seja, atinge a proximidade ou os valores de referência utilizando fases inferiores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da importância do sistema de aterramento para o bom funcionamento do sistema elétrico, a resistência de pé de torre frente às correntes de surto e provenientes das descargas atmosféricas é vista como um parâmetro diferencial no momento do dimensionamento desse sistema.

A sua diminuição é criteriosamente analisada para facilitar o escoamento de tais correntes para terra, assim evitando o retorno da corrente para os condutores fase da linha. Quanto menor a resistência, melhor será o escoamento, visto que a relação entre os dois parâmetros é inversa.

No estudo do método de diminuição foi constatado que a alternância da configuração do aterramento e também o tamanho do fio contrapeso utilizado acarreta em uma queda significativa no valor da resistência. E para o dimensionamento da malha de aterramento o método de variação do comprimento do fio contrapeso e alteração da configuração são os fatores que mais refletem nessa queda.

Em relação à alternância da configuração, é possível uma queda de até 40% na utilização da primeira fase e esta porcentagem cai na medida que aumenta o comprimento do fio contrapeso, dessa maneira, é comprovado a utilização apenas até a fase 4 onde $L = 150\text{m}$, pois, a partir deste comprimento a queda da resistência de pé de torre é insignificante.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de janeiro, 2002.

_____. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de janeiro, 2005.

_____. **NBR 15287**: informação e documentação: Projeto de pesquisa: apresentação. Rio de janeiro, 2005.

CEMIG - Manual de Distribuição - ND-5.1 - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária Rede de Distribuição Aérea - Edificações Individuais (versão de maio de 2013)

CEMIG, 30.000 – er/lt – 3368; ~Instrução para aterramento de Estruturas de Linhas de Transmissão de 69 a 500kV, julho, 2003.

CIGRÉ - Working Group 33.01, Task Force 33.01.02- Lightning Location Systems – “Characterization of Lightning for Applications in Electric Power Systems” - CIGRÉ - December 2000.

CUMMINS, K.L; Murphy, M.J; Bardo, E.A.; Hiscox, W.L.; Pyle, R.B.; Pifer, A.E.: “A Combined ToA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network”, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, Nº D8, pages 9035-9044, April 27,1998.

L. Grcev, "Impulse Efficiency of Ground Electrodes," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.24, no.1, pp.441-451, Jan. 2009.

VISACRO, Silvério; “Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia”, livro, Artiliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005

VISACRO, Silvério; “Aterramentos Elétricos”, livro, Artiliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2002

CAMARGO, C. C. B. **Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Fundamentais**, Florianópolis: Editore da UFSC / Eletrobrás, Co-Edição Eletrobrás, 1984.

FUCHS, R.D. et al. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. 2ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. N. p.

CEMIG. **Critérios de Projeto Eletromecânico de linhas aéreas de transmissão até 500 kV**. Belo Horizonte/MG: CEMIG, ano. N. p.