



**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:
ANÁLISE DE ATERRAMENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Wesley José Nóbrega Aires e Costa

Orientador:
Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Março de 2012

Trabalho de Conclusão de Curso

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

Wesley José Nóbrega Aires e Costa
Aluno

Edson Guedes da costa, D. Sc.
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Março de 2012

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, gostaria de agradecer todas as pessoas que me ajudaram e fizeram parte da minha vida no decorrer do curso de engenharia elétrica.

Agradecer, primeiramente, a Deus por me dar forças e saúde. Toda minha família, principalmente aos que estão sempre ao meu lado, me apoiando tanto nos momentos de felicidades quanto nos de dificuldades. Em especial meus pais, minha avó, minha irmã, minha namorada, meus tios, dentre outros. Todos os professores, em especial ao professor Edson Guedes da Costa por ter aceitado ser meu orientador tanto no trabalho de conclusão de curso quanto no estágio.

Em especial, agradeço aos amigos Felipe Lucena e João Marcelo Leal, por mais uma vez não medirem esforços para auxiliarem na utilização do Tecat e parabenizar por também mais uma vez serem citados em trabalhos de conclusão de curso envolvendo o tema aterramentos.

Enfim, agradeço a todos aqueles que passaram de alguma forma por minha vida e de alguma maneira me ajudaram a chegar até este momento.

APRESENTAÇÃO

Neste relatório, é feita uma revisão bibliográfica a respeito de aterramentos elétricos, focando a medição de resistência de aterramento e sua posterior análise, de forma sucinta, em malhas de aterramento de estruturas metálicas de 230 kV. Para maior fundamentação da análise da malha de aterramento, foi utilizado o *software* Tecat Plus 5.2, onde valores de resistência foram obtidos por simulação e comparados com os medidos “*in loco*”.

As medições foram realizadas na obra de construção da linha de transmissão que ligará a subestação de Paulo Afonso III a subestação de ZEBU II, localizada na cidade de Delmiro Gouveia – AL, no povoado de Barragem Leste. Todas foram fiscalizadas pelos engenheiros e fiscais da Chesf.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVO.....	2
2. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS.....	2
2.1. ATERRAMENTO ELÉTRICO.....	2
2.2. FORMAS DE CONEXÃO AO SOLO.....	3
2.3. APLICAÇÕES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO.....	4
2.4. RESISTIVIDADE DO SOLO.....	5
2.4.1. UMIDADE DO SOLO.....	6
2.4.2. GRANULOMETRIA DO SOLO.....	7
2.4.3. COMPACIDADE DO SOLO.....	7
2.4.4. TEMPERATURA DO SOLO.....	8
2.4.5. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO.....	8
2.5. RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	9
2.5.1. TÉCNICAS PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	9
3. CONCEITOS BÁSICOS A RESPEITO DE SEGURANÇA.....	10
4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE ATERRAMENTO DA LINHA DE 230 kV.....	12
5. ESTUDO DE CASO.....	14
5.1. MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	15
5.1.1. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO.....	15
5.1.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	17
5.1.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	18
5.1.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	20
5.1.5. SIMULAÇÕES DE FALTA SOBRE A ESTRUTURA.....	23
6. CONCLUSÃO.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Efeito da umidade na resistividade do solo.....	7
Figura 2-2 - Resistividade x Temperatura (Kinderman & Campagnolo, 1995).....	8
Figura 2-3 - Estratificação do solo em duas camadas.....	9
Figura 3-1 - Representação esquemática da tensão de toque.....	11
Figura 3-2 - Representação esquemática da tensão de passo.	12
Figura 3-3- Projeto de Aterramento para estrutura Autoportante (Chesf, 2007).....	13
Figura 3-4 - Esquema de instalação do contrapeso	14
Figura 3-5 - Representação da Conexão do contrapeso com a estrutura.....	14
Figura 5-1 - Ilustração de um terrômetro digital (figura retirada do manual do MTD 20KWe).....	15
Figura 5-2 - Representação esquemática da medição de Resistência de aterramento utilizando o terrômetro.....	16
Figura 5-3 - Fotografia da medição de Resistência de aterramento	17
Figura 5-4 - Fotografia mostrando a Cravação da haste de aterramento.....	17
Figura 5-5 - Gráfico da resistência de aterramento x distância (Kinderman & Campagnolo, 1995).	19
Figura 5-6 - Representação da malha de aterramento estrutura 4/1.	21
Figura 5-7- Representação da Linha de potencia analisada	23
Figura 5-8 - Representação gráfica dos potenciais de passo.....	24
Figura 5-9 - Representação Gráfica dos potenciais de toque.....	24
Figura 5-10 - Gráfico de Potenciais da malha para a situação descrita acima	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistividade de Alguns Materiais.....	5
Tabela 2: Resistência de aterramento estrutura 4/3 (S21D).....	18
Tabela 3: Resistência de aterramento para a estrutura 4/1 (S21D).....	19
Tabela 4. Definições de projeto para o cabo <i>contrapeso</i>	20
Tabela 5 - Resistências de Aterramento para aumento de contrapeso.....	22

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

O consumo de energia de uma nação representa o seu crescimento econômico, tal consumo, somado aos grandes eventos esportivos que acontecerão, faz com que o processo de transmissão de energia elétrica torne-se de vital importância para o desenvolvimento nacional. Dessa maneira, a construção de linhas de transmissão assume um papel preponderante no cenário atual.

Para a operação de um sistema elétrico se mantenha em operação sem maiores problemas, ou seja, tenha continuidade dos serviços, é fundamental que o aterramento seja bem projetado, por ser responsável pela fuga da energia extra que se encontra no sistema. Em linha de transmissão (LT), pode-se dizer que o aterramento tenha as seguintes funções: proporcionar uma melhor qualidade de energia a ser fornecido, proporcionar um caminho de escoamento para terra em casos de descarga atmosférica, garantir os limites de segurança pessoal e dos equipamentos conectados fornecendo um caminho seguro e controlado de baixa impedância em direção a terra (Kinderman, et al., 1995).

O projeto de aterramento de uma LT deve ser previamente dimensionado, para que o mesmo funcione de maneira eficaz, esse dimensionamento deve ser feito analisando todos os riscos, levando em conta fatores como a resistividade do solo, resistência do solo, tipo de estrutura, esforços mecânicos a que serão submetidos os cabos de aterramento, esforços térmicos, estratificação do solo entre outros. Tomando como enfoque a construção do sistema de aterramento, podemos dizer que o mesmo deve se limitar a faixa de servidão, concentrado perto das estruturas e deve ser instalado sem a conexão do cabo para-raios.

Neste trabalho será apresentada uma análise quantitativa a respeito do projeto de aterramento, focando a respeito da resistência de aterramento e posteriormente comentando a aplicação do projeto de aterramento como um todo.

1.2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo, a avaliação do desempenho do sistema de aterramento de uma linha de transmissão de 230 kV em circuito duplo, com estruturas metálicas autoportantes, com posterior medição e análise de resistências do solo, identificando se os valores encontram-se dentro da margem estabelecida pela norma. Mais detalhadamente, esses valores serão coletados ao longo de um trecho de 6 km, localizado no povoado de Barragem Leste pertencente ao município Delmiro Golveia – AL.

2. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

2.1. ATERRAMENTO ELÉTRICO

Pode ser definido como uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo (Visacro Filho, 2005). O ponto de aterramento que deseja ser conectado é variável, dependendo da aplicação que se deseja, podendo assumir configuração muito diversificada, visando principalmente o desempenho do sistema e a segurança e proteção dos seres e equipamentos envolvidos.

O sistema de aterramento elétrico constitui-se basicamente de três componentes, são eles o eletrodo de aterramento, a terra que o envolve, e as conexões entre o ponto que se deseja conectar e o eletrodo. O primeiro varia sua forma e dimensão, de acordo com sua aplicação, as maneiras de utilização de eletrodos mais usadas são: hastes de aterramento, malhas de aterramento, estruturas metálicas das fundações de concreto e cabos contrapesos.

Um aterramento deve ter capacidade suficiente de dispersão para o solo de determinados valores de corrente, sem fazer com que a superfície do mesmo comprometa a segurança das pessoas, em caso de faltas. Logo, pode-se classificar o aterramento de duas formas, em: “aterramento de serviço”, desempenha uma função elétrica no sistema e “aterramento de segurança”, tem por finalidade evitar riscos de vida no local (Visacro Filho, 2005).

Para avaliação da natureza do aterramento, devem ser levadas em consideração que a conexão a terra apresenta resistência, capacitância e indutância, modificando assim a capacidade de condução, entretanto, a referência utilizada na maioria das vezes é apenas a resistência, devido as componentes reativas serem muito reduzidas (Visacro Filho, 2005).

2.2. FORMAS DE CONEXÃO AO SOLO

Segundo Filho, S. V. (2005), é possível estabelecer a distinção entre “sistema de aterramento” que é o sistema físico propriamente dito. Enquanto que “aterramento de sistema” corresponde à maneira de como o sistema elétrico é conectado ao solo, existindo assim três práticas descritas abaixo.

SISTEMA ISOLADO

Não existe conexão condutiva proposital entre o sistema e o solo. O acoplamento é fraco e de forma capacitiva, possui níveis de sobretensões elevadas e dificuldades na localização de eventuais faltas para terra. Utilizado em aplicações que priorizam a continuidade do serviço.

SISTEMA SOLIDAMENTE ATERRADO

Alguns pontos do sistema elétrico são conectados diretamente à terra, Procurando-se um caminho de mínima impedância à passagem de eventual corrente de falta para o solo. Os valores elevados da corrente resultante nessa eventualidade sensibilizam os dispositivos de proteção, os quais prontamente comandam o desligamento da parte faltosa do sistema. Muitas vezes, a intensidade das correntes as torna muito destrutiva para os componentes do sistema. As sobretensões são controladas mais facilmente neste caso, sendo a forma mais usual de aterramento de sistemas no Brasil.

SISTEMA ATERRADO POR IMPEDÂNCIA

Neste caso, é interposta uma impedância (reatância ou resistência), entre o sistema elétrico e seu aterramento físico, limitando a corrente de falta, quando a mesma existir. Com a crescente modernização da tecnologia, e a capacidade de captar mínimas correntes de falta, esse tipo de sistema vem crescendo, principalmente no aterramento por alta impedância. Acredita-se que futuramente, esse tipo de aterramento, será usado principalmente no ramo industrial.

Um ponto negativo desse sistema de aterramento é em caso de rompimento de um ou do banco de resistores, pois causa a abertura do caminho de retorno da corrente, fazendo com que os dispositivos de detecção não operem.

2.3. APLICAÇÕES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

Como dito anteriormente, existem várias maneiras de se utilizar os sistemas de aterramento, tanto com relação à função quanto a disposição física de seus eletrodos, mas sempre associados a dois fatores fundamentais: o desempenho do sistema e a segurança de pessoas e equipamentos.

No primeiro caso, na injeção da corrente no aterramento, o solo é usado como caminho de retorno. No segundo caso, quando existe a injeção de corrente, o solo serve como escoamento de carga ou corrente de descarga, e ainda promove a distribuição segura de potenciais, tornando-se um fator de segurança. Podemos citar assim, um conjunto de aplicações (Visacro Filho, 2005):

- A ligação à terra constitui-se em um fator de segurança, por permitir o escoamento de cargas e corrente de descargas, através dessa prática podemos evitar ou minimizar a energização de partes metálicas de sistemas, expostas ao contato de pessoas e animais, o carregamento de cargas estáticas em corpos ou equipamentos industriais.
- Há a possibilidade de limitar os níveis de potenciais, por meio de práticas de aterramento adequadas: As tensões induzidas em corpos

metálicos por fenômenos atmosféricos ou linhas energizadas próximas. Pode-se alcançar a minimização dos gradientes de potencial na superfície do solo.

- Uso da terra como um condutor de retorno, podemos citar o exemplo do MRT (monofásico com retorno por terra), os sistemas de transmissão por corrente contínua e diversos sistemas de tração elétrica. Fazendo-se necessário o máximo de cuidado com o ponto de injeção de corrente no solo.
- O aterramento de certos pontos do sistema, para influenciar no desempenho do mesmo, em circuitos eletrônicos, é chamado de ponto de referência. Associado a filosofia de proteção de sistemas polifásicos, apresenta diversos aspectos de interesse, quando ocorre o aparecimento de correntes no solo, entre os pontos de aterramento. A proteção se baseia na detecção dessas correntes, sensibilizando os dispositivos de proteção, permitindo isolar prontamente os circuitos ou equipamentos com defeito.

2.4. RESISTIVIDADE DO SOLO

Pode-se definir resistividade do solo (ρ) como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta l de 1m, área das faces A de 1m^2) preenchido com este solo . Sua unidade é “ $\Omega\cdot\text{m}$ ” (Visacro Filho, 2005). A equação que define a resistividade é:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

O solo em condições normais é um mal condutor de eletricidade, sem umidade é considerado como isolante, a tabela abaixo mostra alguns exemplos de resistividades de materiais diferentes.

Tabela 1: Resistividade de Alguns Materiais

Condutor	Resistividade ($\Omega\cdot\text{m}$)
Cobre Puro	$1,6 \times 10^{-8}$

Alumínio	$2,7 \times 10^{-8}$
Argila Seca	1500 a 5000
Húmus	10 a 150
Areia Comum	3000 a 8000
Terra de Jardim	140 a 480

Existe a necessidade do conhecimento de alguns parâmetros que influenciam na resistividade do solo, são eles:

2.4.1. UMIDADE DO SOLO

A condutividade do solo é sensivelmente aumentada pela quantidade de água nele contida, quanto mais água menos resistividade o mesmo possui, observa-se então que a água torna-se o principal elemento de condução de corrente (Visacro Filho, 2005). Muitas vezes, para preservar a umidade do solo, são postas camadas de britas no solo, diminuindo a evaporação.

A variação de resistividade ocorre devido à predominância iônica do solo, um percentual de umidade maior, faz com que os sais se dissolvam, formando um meio eletrolítico, facilitando a passagem da corrente iônica. Assim um solo específico pode variar sua resistividade de acordo com sua umidade (Kinderman, et al., 1995).

Além da umidade, observa-se que a concentração de sais minerais, influencia diretamente na condutividade, devido à eletrólise. Quando existe a injeção de sais no solo, verifica-se um aumento substancial na capacidade de condução.

A figura abaixo mostra um gráfico da variação da umidade em relação a resistividade, para um solo arenoso.

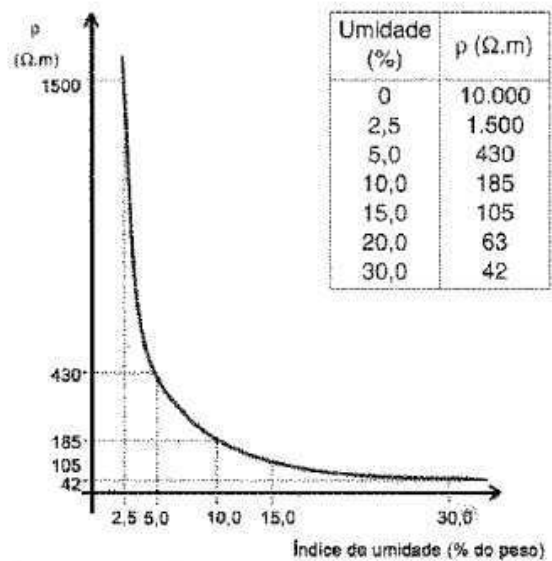


Figura 2-1- Efeito da umidade na resistividade do solo

2.4.2. GRANULOMETRIA DO SOLO

A composição do solo influencia diretamente na condutividade, principalmente em dois aspectos: a capacidade de retenção de água nas camadas do solo e a continuidade física, esta última diretamente relacionada com a compactação. Observa-se que uma composição de grãos maiores, tende a aumentar a resistividade, pois existe uma menor capacidade de retenção da água, deixando-a ir para as camadas mais profundas ou evaporar, como também gera uma menor continuidade elétrica. O inverso ocorre com um solo com grãos menores, onde os mesmos preenchem os espaços melhorando as duas condições (Visacro Filho, 2005).

2.4.3. COMPACIDADE DO SOLO

Solos mais compactos apresentam uma maior continuidade física, proporcionando uma maior condutividade. Por isso em medições de resistências de aterramento, faz-se necessário a acomodação do solo para que o mesmo torne-se mais compacto.

Os tipos de solos argilosos possuem uma menor resistividade, justamente por possuírem essa característica juntamente com a umidade.

2.4.4. TEMPERATURA DO SOLO

A análise a respeito da temperatura do solo deve levar em consideração um ρ mínimo, como mostrado na figura abaixo.

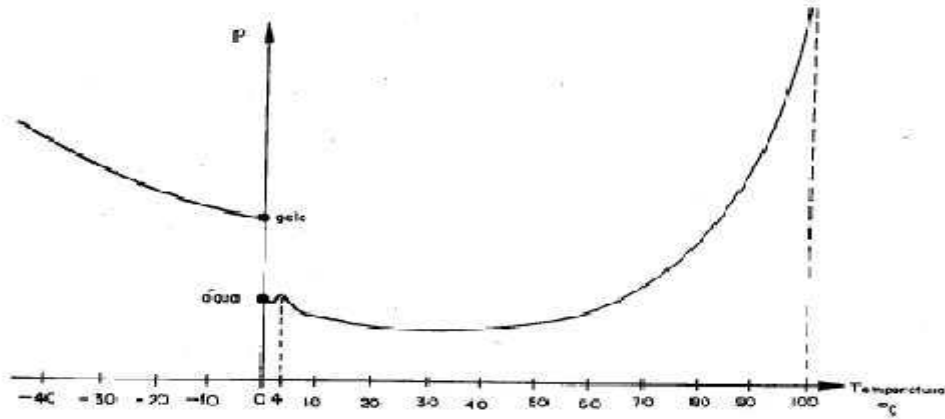


Figura 2-2 - Resistividade x Temperatura (Kinderman, et al., 1995)

Observa-se na Figura 2-2 que 0° , deve ser tomado como referência para duas análises. Nas temperaturas positivas, a resistividade aumenta com o aumento da temperatura, isso devido à evaporação que torna o solo mais seco, dificultando a passagem da corrente, enquanto que nas temperaturas negativas, a resistividade aumenta, pois é produzida uma dispersão nas ligações iônicas entre os grânulos de terra no solo.

2.4.5. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

O solo é composto de várias camadas, que são em geral horizontais e paralelas a superfície (sobrepostas), portanto cada uma é associada a um valor de resistividade diferente, além desse fato, existe a descontinuidade na superfície, ou seja, uma camada mais profunda pode aflorar em outro local devido ao relevo, fazendo com que a resistividade tenha um valor médio, chamada de resistividade efetiva.

A estratificação ocasiona uma variação na dispersão da corrente no solo, que é mostrada na Figura 2-3, apresentando o comportamento dos fluxos de dispersão das correntes em torno do aterramento, em um solo heterogêneo (Kinderman, et al., 1995). Observando que a corrente dissipa-se melhor na camada que oferece menor resistividade.

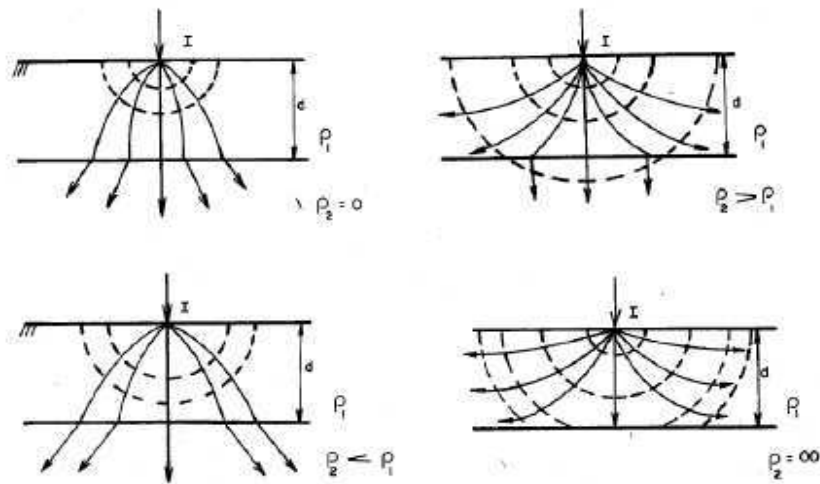


Figura 2-3 - Estratificação do solo em duas camadas

2.5. RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Como dito anteriormente, uma ligação a terra apresenta resistência, capacitância e indutância (impedância), porém com algumas considerações (baixa frequência e resistividades do solo baixa), pode-se tratá-la, como uma resistência linear. A resistência de aterramento caracteriza-se por três componentes principais (Visacro Filho, 2005):

- Resistência do eletrodo (muito baixa devido ao material empregado);
- Resistência de contato entre o eletrodo e a terra adjacente (quase nula);
- Resistência da terra circunvizinha (componente principal);

É definida como a soma das três componentes citadas acima, sendo mais precisamente determinada pela camada de terra mais próxima do eletrodo, enquanto que as demais camadas circunvizinhas tornam-se irrelevantes.

2.5.1. TÉCNICAS PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Algumas vezes, após a instalação do aterramento, verifica-se que o valor da resistência medida é superior a pedida no projeto, logo se faz

necessário à aplicação de técnicas que visam à melhoria do valor da resistência de terra próximo ao eletrodo de aterramento, ou até alterando o mesmo, serão listadas abaixo algumas técnicas possíveis (Visacro Filho, 2005):

- Aumento do número de eletrodos em paralelo;
- Aprofundamento dos eletrodos;
- Aumento da seção reta do eletrodo;
- Tratamento químico do solo;
- Tratamento físico do solo;

3. CONCEITOS BÁSICOS A RESPEITO DE SEGURANÇA

Como dito anteriormente, o foco principal do aterramento é a segurança pessoal, é projetado para que durante um curto-circuito com a terra, haja uma distribuição no perfil dos potenciais de passo e de toque abaixo dos limites de risco de fibrilação ventricular do coração.

Quando as partes do corpo humano são submetidas à diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica que pode resultar em diversas condições de risco, logo devem ser referenciadas nos projetos.

Os critérios de risco são definidos considerando os efeitos nocivos provocados pela circulação da corrente no corpo humano e suas consequências fisiológicas dependem de vários fatores, como a forma de onda da corrente e o caminho que a mesma percorre no corpo. De um modo geral, as condições de segurança são elaboradas com a finalidade de minimizar os riscos de fibrilação ventricular.

TENSÃO DE TOQUE

É a máxima diferença de potencial entre a mão e os pés a que fica submetido à pessoa eventualmente presente na região do aterramento. Em consequência pode-se ter a passagem de corrente pelo braço, tronco e pernas, podendo provocar a fibrilação cardíaca, queimaduras e outras lesões graves ao

organismo (Morena, et al.). A Figura 3-1 representa o que acontece com uma pessoa, no momento de uma falta, na região do aterramento.

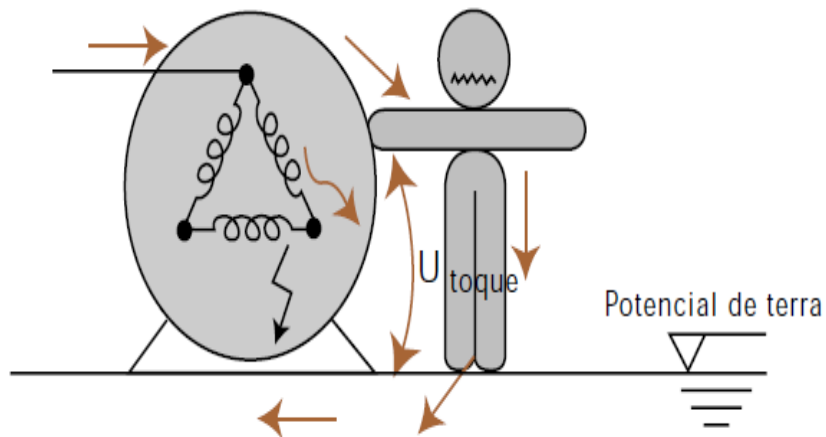


Figura 3-1 - Representação esquemática da tensão de toque.

TENSÃO DE PASSO

A tensão de passo é a máxima diferença de potencial entre os pés, que uma pessoa é submetida na região do aterramento. Durante a descarga para o solo, ocorre uma elevação do potencial, formando-se uma distribuição de potencial, cujo o ponto máximo é nas proximidades do eletrodo de aterramento, logo uma pessoa localizada nessa região, entre seus pés existirá uma diferença de potencial, a qual é geralmente definida para uma distância entre os pés de 1 metro, conseqüentemente poderá haver uma circulação de corrente através das duas pernas, geralmente de intensidade menor que na tensão de toque (Morena, et al.). A figura abaixo representa o que acontece no momento da descarga.

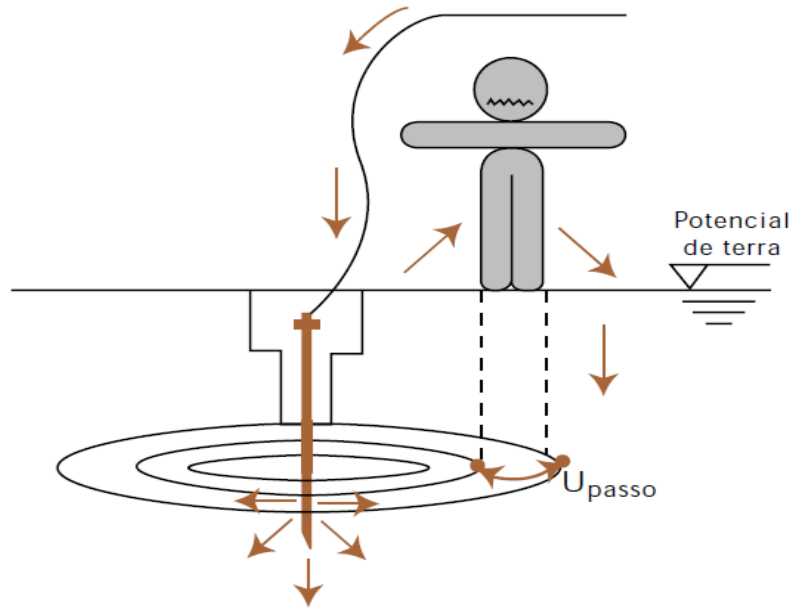


Figura 3-2 - Representação esquemática da tensão de passo.

Em seres humanos, a corrente varia conforme o trajeto percorrido, podendo acarretar em diferentes efeitos no organismo, no caso de animais, a tensão de passo pode ser mais danosa, devido ao maior risco de fibrilação ventricular.

4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE ATERRAMENTO DA LINHA DE 230 kV

Os sistemas de aterramento são comumente instalados em uma disposição radial, sendo compostos por cabos de cobre, aço cobreado ou aço zincado e denominados de cabos *contrapeso*, este nome foi introduzido erroneamente durante suas primeiras aplicações, pois se acreditava que havia uma relação entre o acoplamento capacitivo com os cabos aéreos da LT, depois se descobriu que o efeito era muito pequeno. O projeto utilizado na linha em questão é mostrado abaixo (Nogueira, 2006):

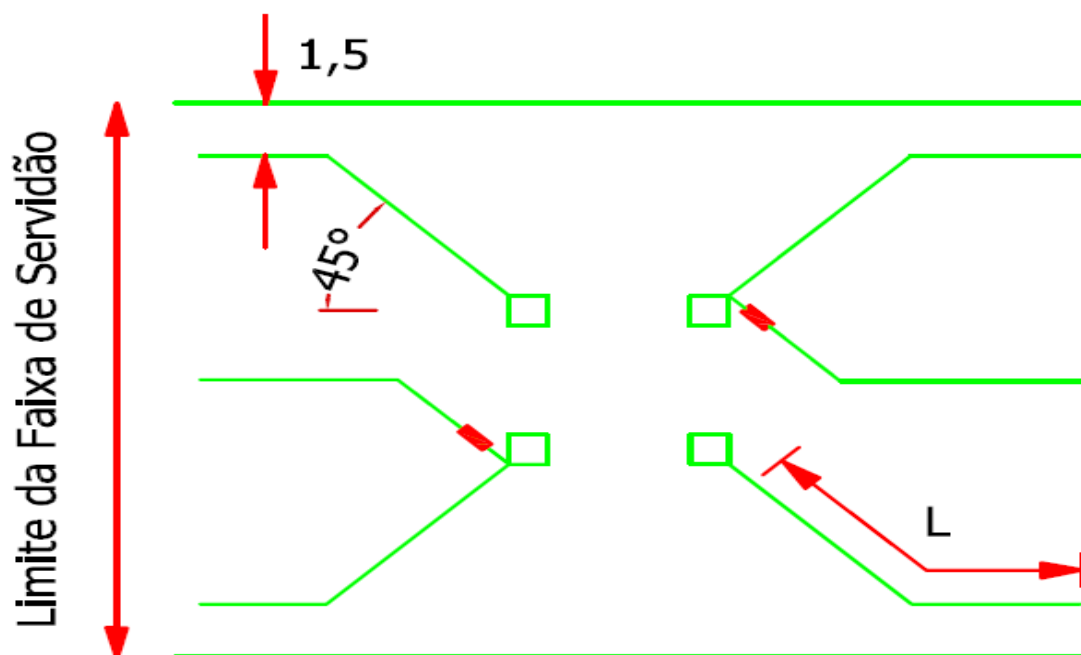


Figura 4-1- Projeto de Aterramento para estrutura Autoportante (Chesf, 2007)

O procedimento de construção empregado leva em consideração a resistividade do solo para determinação do comprimento L . O critério utilizado para determinar o comprimento se baseia no comportamento do sistema a 60 Hz, onde o valor máximo de resistência de aterramento a ser atendido de 20Ω .

Quanto à profundidade de instalação dos cabos, normalmente são enterrados a uma profundidade média entre 30 e 80 cm, sendo mais comum adotar-se 50 cm. Contudo, em solos sujeitos à agricultura cultivada, recomenda-se instalá-los a 1 m. As valetas deverão ser fechadas com terra e devidamente compactadas, após a instalação do contrapeso.

Antes da concretagem das fundações, deverá ser instalado um eletroduto de PVC com a espessura de $\frac{3}{4}$ " para a passagem dos cabos contrapeso. No projeto está definido também, como é feita a conexão do contrapeso com a estrutura, como estão representados nas figuras abaixo.

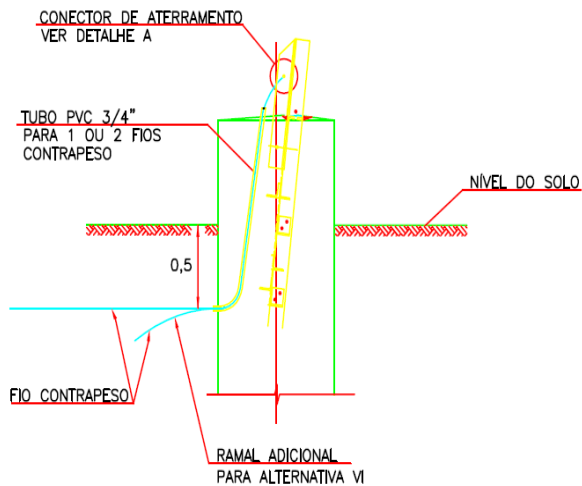


Figura 4-2 - Esquema de instalação do contrapeso

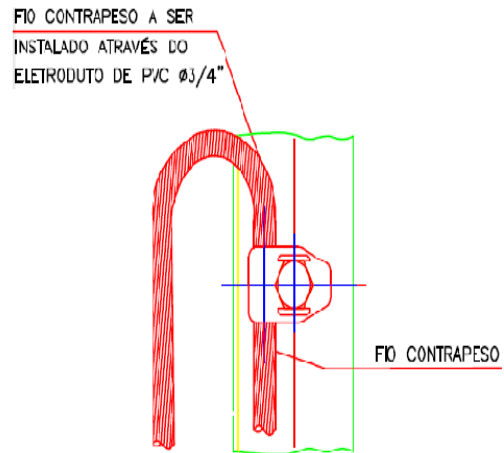


Figura 4-3 - Representação da Conexão do contrapeso com a estrutura

O cabo *contrapeso* deverá ser instalado dentro dos limites da faixa de servidão da LT, para a linha em questão considerar a largura de 40 m. Caso necessário, a direção de qualquer ramal poderá ser alterada com a finalidade de desviar de obstáculos menores. No caso de grandes obstáculos que venham a impedir a continuidade da instalação, este deverá retornar paralelamente ao instalado, a uma distância mínima de 6 m e com um raio mínimo de retorno de 3 m, fazendo com que o *contrapeso* instalado se aproxime o máximo do valor especificado no projeto (Chesf, 2007).

Em relação aos cabos para-raios, todas as estruturas devem ser aterradas, os mesmos serão conectados a estrutura através de um cabo com mesma bitola com grampos paralelos (lado do cabo para-raios) e com conectores tipo presilhas (lado da estrutura) (Chesf, 2009).

5. ESTUDO DE CASO

Foram realizadas medições de resistência do solo, na cidade de Delmiro Gouveia – AL, em uma obra de construção de Linha de Transmissão de 230 kV, saindo da subestação Paulo Afonso III destinada a subestação ZEBU II. As medições foram realizadas nas proximidades das estruturas metálicas autoportantes.

5.1. MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Para medição da resistência de aterramento, foram usados um terrômetro digital **MTD 20KWe** cujo o fabricante é a Megabras, duas hastes com 1 m de comprimento e diâmetro de 16 mm, além de três carretéis de cabos. No local da medição, o solo tinha uma composição rochosa, com camada de terra superficial de aproximadamente 0,3 m. A figura abaixo ilustra o equipamento utilizado.

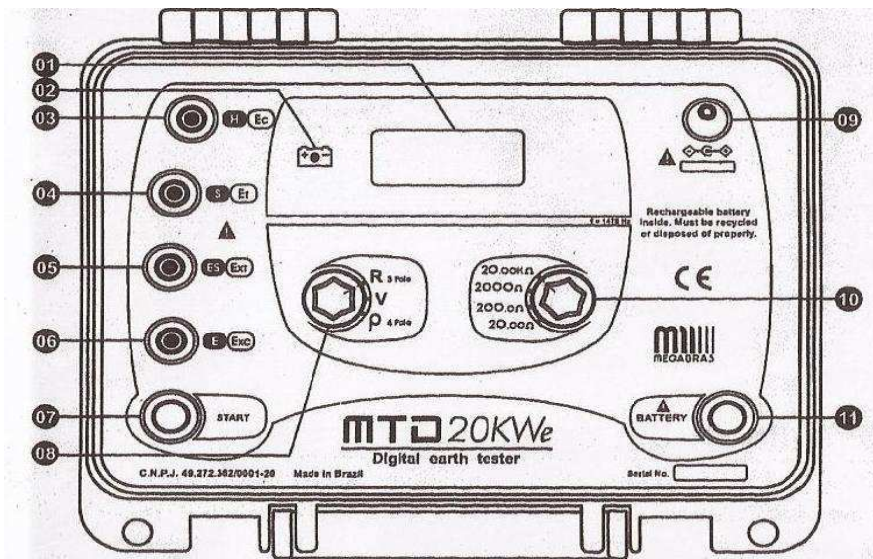


Figura 5-1 - Ilustração de um terrômetro digital (figura retirada do manual do MTD 20KWe)

O terrômetro injeta no terreno uma corrente estabilizada eletronicamente, e mede com alta precisão a tensão que aparece no terreno pela circulação da corrente através da resistência de difusão do aterramento. A leitura de R é direta, no display.

5.1.1. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

As medições foram realizadas tomando como base os pés das estruturas individualmente, sendo assim quatro conjuntos de medições por estrutura. A medição de resistência foi feita tomando três pontos de conexão, no terreno foram cravadas duas hastes, uma de corrente e uma de tensão e o terceiro ponto era a estrutura que servia como referência.

A haste de corrente foi cravada a 100 m da ligação à estrutura, em linha reta, enquanto que a haste de potencial se localizava entre a referência e a haste de corrente, variando sua posição de 10 em 10 m do ponto de ligação a estrutura em direção à haste de corrente, todas cravadas a uma profundidade mínima de 0,5m.

A direção preferencial para realização das medições é perpendicular a ao eixo da LT, exceto em casos de empecilhos físicos, podendo assim ser alterada para qualquer outra posição. A Figura 4-5 mostra um esquema de como foi feita a medição.

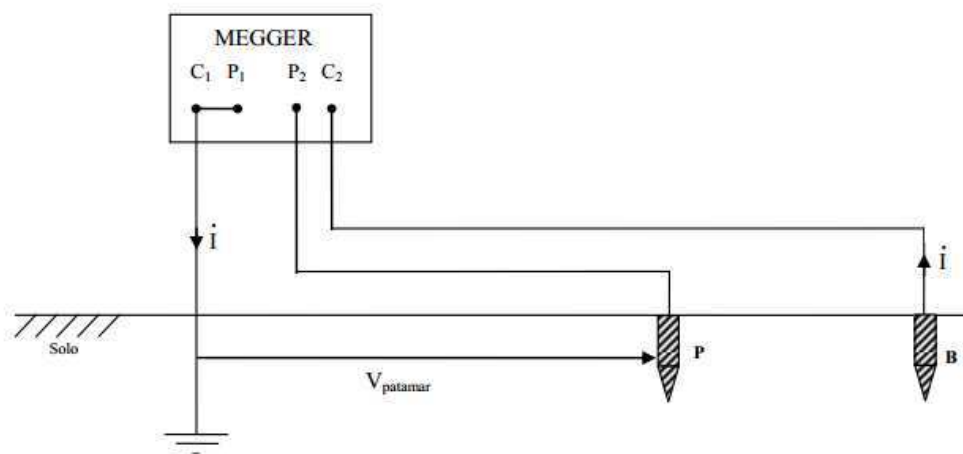


Figura 5-2 - Representação esquemática da medição de Resistência de aterramento utilizando o terrômetro.

Na figura, o ponto C2 representa a conexão a haste de corrente (B), o ponto P2 representa a conexão a haste de potencial (P) enquanto que o curto-circuito entre C1 e P1, a conexão a estrutura.

A resistência de aterramento pode ser obtida indiretamente pela relação $R=V/I$. A única diferença em relação ao instrumento aqui mostrado é que esse cálculo é feito diretamente, já estabelecendo a relação entre as grandezas de tensão e corrente (Visacro Filho, 2005).

Segundo as especificações Chesf, devem ser feitas tantas medições quanto necessário, até que ocorra uma das seguintes situações:

- Diferença entre cada uma das leituras sucessivas e a média das três não seja superior a 10% (dez por cento) desta média;

- A distância do eletrodo do potencial ao eletrodo de corrente seja inferior a 30m, sem ter ocorrido a situação anterior;
- Caso não ocorra a situação do primeiro item, o eletrodo de corrente deverá ser cravado numa posição mais afastada da estrutura (aproximadamente 150 m) e as medições deverão ser repetidas;
- Será considerada como valor da resistência de aterramento da estrutura, a média dos três valores obtidos conforme o primeiro item.

Nas figuras abaixo, estão representadas algumas ilustrações das medições sendo feitas na LT em questão.



Figura 5-3 - Fotografia da medição de Resistência de aterramento



Figura 5-4 - Fotografia mostrando a Cravação da haste de aterramento.

5.1.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Algumas precauções, durante a medição, devem ser tomadas a fim de evitar alterações nos resultados e ou danos às pessoas envolvidas no processo, são elas (Chesf, 2009):

- O contrapeso, no seu comprimento inicial, deverá ficar conectado às fundações das estruturas, mesmo que a medição da resistência tenha sido superior a 20 Ω , até que a Chesf forneça o comprimento definitivo;
- A instalação do sistema de aterramento das estruturas deverá ser concluída, obrigatoriamente, antes do lançamento dos cabos para-raios e condutores;

- Os cabos contrapeso deverão ser instalados com a máxima precaução, evitando-se danos ou quebras, não sendo admitidas emendas, exceto aquelas resultantes do processo de instalação;
- Evitar medições durante períodos de chuva, pois o solo poderá se apresentar com uma umidade superior à normal, nas camadas em torno do sistema de aterramento;
- Em medições próximas a outras linhas energizadas, deverão ser tomadas algumas precauções adicionais, foi o caso ocorrido na LT em questão, devido ao paralelismo da construção com muitas outras linhas, onde o operador deve usar botas com isolamento propício.

5.1.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Toda a medição foi acompanhada pelos engenheiros/fiscais da Chesf. A medição foi feita, individualmente, para cada pé da estrutura, a amostragem geral consistiu de 5 (cinco) estruturas, das quais serão apresentadas duas. As mesmas foram escolhidas por apresentarem casos diferentes, a primeira (estrutura 4/3) apresentou resultados adequados ao que foi solicitado no projeto, enquanto que a segunda (estrutura 4/1) encontrou-se fora dos padrões. Com relação a essa nomenclatura das estruturas de x/y, o x representa o quilômetro que a estrutura está inserida, enquanto que o y, representa a quantidade de estruturas dentro desse quilômetro x. Abaixo seguem as tabelas com as resistências de aterramento de ambas as estruturas:

Tabela 2: Resistência de aterramento estrutura 4/3 (S21D)

H. DE CORRENTE(m)	H. DE TENSÃO(m)	RESIST. PÉ A (Ω)	RESIST. PÉ B (Ω)	RESIST. PÉ C (Ω)	RESIST. PÉ D (Ω)
100	10	3,2	3,6	4,0	3,8
	20	4,0	4,2	5,2	6,0
	30	4,4	4,3	5,1	6,3
	40	4,7	4,8	5,4	5,8
	50				
	60				
	70				
Resistência Média		4,37	4,43	5,23	6,03

Tabela 3: Resistência de aterramento para a estrutura 4/1 (S21D)

H. DE CORRENTE(m)	H. DE TENSÃO(m)	RESIST. PÉ A (Ω)	RESIST. PÉ B (Ω)	RESIST. PÉ C (Ω)	RESIST. PÉ D (Ω)
100	10	5,9	5,8	17,2	3,8
	20	10,4	6,9	19,0	5,3
	30	20,0	11,2	20,2	5,9
	40	23,0	10,3	19,6	6,1
	50	22,0	13,3		5,6
	60	24,0	12,8		
	70				
Resistência Média		23,00	12,13	19,60	5,86

Segundo a especificação Chesf, o valor da resistência do pé da torre é a última medida, na qual a diferença dos três últimos valores não sejam superiores a 10% da média das mesmas, considerando tal fato podem-se determinar os valores das resistências para cada pé, como sendo a média das três últimas medidas como se encontra apontado nas tabelas.

Observa-se que o método descrito acima é uma aproximação matemática, que garante o valor da resistência dentro da região de patamar da curva de resistência de aterramento x distância. Como ilustrado na Figura 4-8. Observando o gráfico, nota-se que a resistência de patamar encontra-se nos valores próximos de R_A .

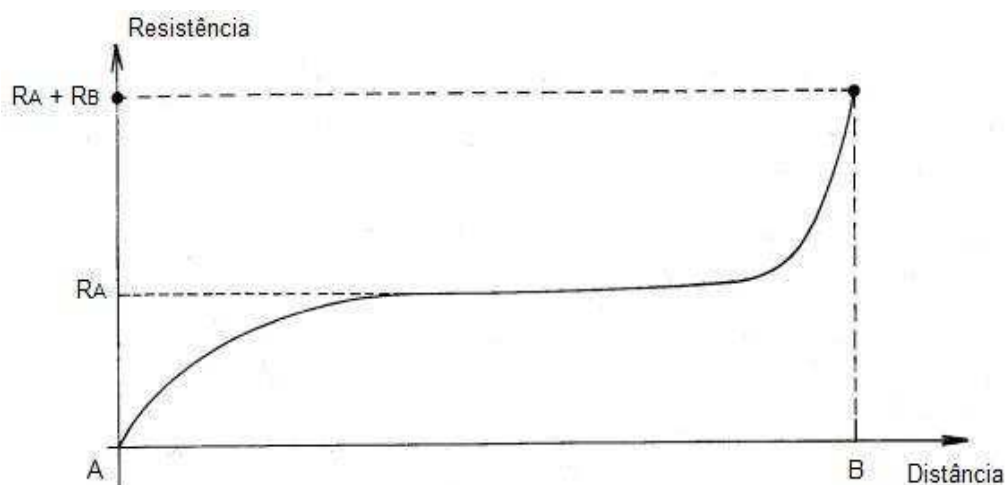


Figura 5-5 - Gráfico da resistência de aterramento x distância (Kinderman, et al., 1995).

5.1.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como dito anteriormente, o comprimento do cabo *contrapeso* é previamente definido pelo projetista Chesf, baseado na medição das resistividades do solo, capturadas durante a fase preliminar da construção da LT. Dessa maneira a empreiteira responsável pela construção, os instala baseando-se em tais definições, que estão representadas na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Definições de projeto para o cabo *contrapeso*

NÚMERO DA TORRE	RESISTÊNCIA CALCULADA P/ CONTRAPESO (Ω)	COMPRIMENTO POR PERNA (m)	TIPO DE CONTRAPESO A INSTALAR	COMPRIMENTO TOTAL A INSTALAR (m)
1/1 C2	8,43	14	LX4	56
1/2 C2	5,56	14	LX4	56
1/1 C1	30,00	50	LX4	200
1/2 C1	2,05	14	LX4	56
1/3	30,00	50	LX4	200
1/4	32,95	50	LX4	200
2/1	30,00	50	LX4	200
2/2	30,00	50	LX4	200
3/1	30,00	50	LX4	200
3/2	29,83	22	LX4	88
4/1	4,56	14	LX4	56
4/2	8,62	14	LX4	56
4/3	14,81	14	LX4	56
5/1	33,70	50	LX4	200
5/2	1,72	14	LX4	56
6/1	8,85	14	LX4	56

A análise é feita comparando a resistência média da estrutura medida previamente, com a resistência medida “*in loco*”, através do terrômetro, avaliando cada pé da torre individualmente, como se não houvesse nenhum acoplamento entre eles. Tal comparação dá subsídio para que o projetista Chesf identifique a necessidade de modificação do projeto de aterramento.

Analisando inicialmente a estrutura 4/3, observa-se que o valor de resistência medido “*in loco*” é menor do que o que foi definido por projeto. Dessa maneira, todas as resistências dos pés das torres estão dentro dos parâmetros, não havendo assim necessidade de modificação do projeto e a estrutura encontra-se pronta para todas as conexões do sistema de aterramento.

No caso da estrutura 4/1, através da comparação, foi verificado que a medição de resistência em campo foi maior que a de projeto. Para este caso, foi solicitado ao projetista que o cabo *contrapeso* fosse aumentado, elevando assim a área de dispersão da corrente pelo solo. Nesse caso, novas medições devem ser feitas para avaliar o comportamento do sistema de aterramento.

Como a medição “*in loco*” na estrutura 4/1 encontrou-se demasiadamente diferente do que solicitava o projeto, algumas simulações foram feitas sobre tal estrutura. O *software* utilizado para simulação foi o Tecat Plus 5.2.

Inicialmente foi feita uma modelagem do sistema de aterramento da estrutura, considerou-se então o bloco de concreto no qual a estrutura está fixada ao solo, como sendo um eletrodo com diâmetro de 1,00 m e profundidade de 2,0 m, o cabo *contrapeso* para tal estrutura foi dimensionado com um comprimento de 14 m, bitola de 3/8” e área de secção reta de 71,256 mm², assim a modelagem foi feita interligando todos os elementos do circuito, como mostrado na figura abaixo.

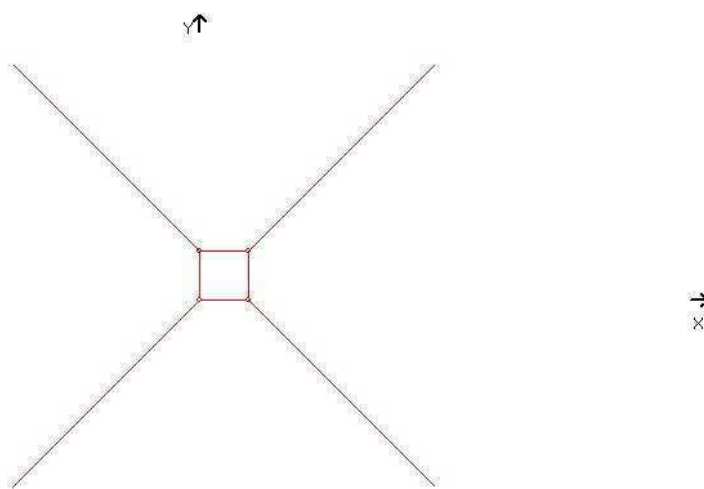


Figura 5-6 - Representação da malha de aterramento estrutura 4/1.

Na Figura 5-6, as extremidades do quadrado representam os eletrodos de concreto, com distâncias de 2,609 m entre si, representando os pés das torres, os cabos *contrapesos* estão representados pelas linhas retas, radiais aos pés das estruturas. Para simular o solo, foram utilizadas duas camadas, a primeira com resistividade de 500 Ω m, com espessura de aproximadamente 30

cm e a outra camada com resistividade de 1500 Ωm . A primeira simulação feita foi a de medição de resistência do aterramento, obtendo um valor de 29,21 Ω .

Utilizando novamente a comparação, entre o valor especificado por projeto Chesf (4,56 Ω), o valor medido em campo para cada pé (Tabela 3) e o valor verificado em simulação para o aterramento (29,21 Ω), nota-se que existe uma proximidade maior de valores entre a simulação e a medição em campo, comprovando que a utilização do terrômetro e as aproximações realizadas na malha foram feitas de maneira correta.

Este resultado induz então que o método de análise utilizado pelo projeto, pode possuir alguns erros que alteraram de forma significativa o resultado da resistência do aterramento.

Como dito anteriormente, para esses casos em que a resistência medida em campo é superior à determinada por projeto, há necessidade de aumento dos cabos *contrapeso*. Utilizando o Tecat através de um método de tentativas, ou seja, aumentando o comprimento do cabo até se aproximar de uma medida de resistência definida por projeto, os dados mostrados na Tabela 5 representam os valores obtidos.

Tabela 5 - Resistências de Aterramento para aumento de contrapeso

NÚMERO DA TORRE	COMPRIMENTO POR PERNA (m)	RESISTÊNCIA CALCULADA P/ CONTRAPESO (Ω)
4/1	20	23,42
	30	19,01
	60	11,92
	90	8,69

Observa-se que a variação da resistência do aterramento, devido à variação do comprimento do cabo, começa a diminuir até chegar a um ponto que o aumento exorbitante do cabo, influenciará de maneira irrelevante no valor da resistência, tornando-se inviável o aumento demasiado do *contrapeso*, por ficar muito distante do comprimento exigido em projeto e um gasto desnecessário devido ao tipo de solo do local que proporciona uma boa dispersão da corrente.

5.1.5. SIMULAÇÕES DE FALTA SOBRE A ESTRUTURA

Analisando agora o efeito de uma falta dentro da estrutura 4/1, a fim de verificar a resposta da malha de aterramento, foi feita uma simulação onde haveria uma injeção de corrente com amplitude de 1kA com duração de 0,3s, que é o tempo de atuação da proteção. A simulação foi feita utilizando a malha descrita no item anterior em uma área de 900 m², e nela foram analisadas as tensões de passo e de toque as quais uma pessoa de 70 kg estaria submetida.

Esta situação pode ser representada, por uma situação onde um cabo condutor toca na parte metálica da torre produzindo um curto-circuito do tipo monofásico á terra.

A primeira análise é a respeito da tensão de passo, vale salientar que o Tecat não é adequado para análise de aterramento de pé de torre, então os limites de segurança que aparecem nas figuras, são dependentes de fatores como resistividade da brita, fugindo completamente do escopo de linha de transmissão. Entretanto a análise pode ser feita observando a diferença de potencial por metro no gráfico. A Figura 5-7 mostra a linha de potencial que foi analisada dentro da malha e as Figuras 5-8 e 5-9 representam graficamente as tensões de passo e de toque para essa linha de potencial.

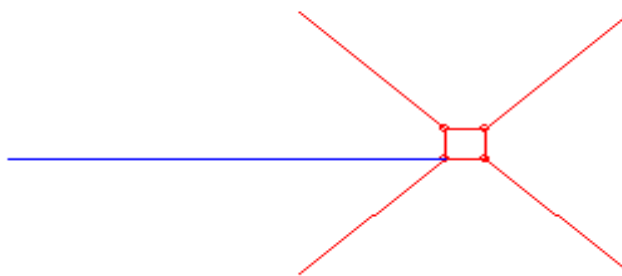


Figura 5-7- Representação da Linha de potencia analisada

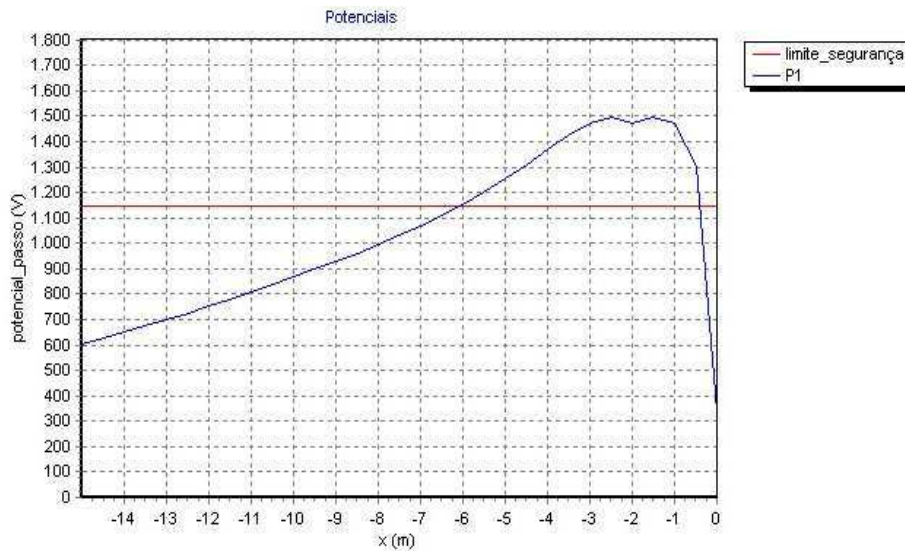


Figura 5-8 - Representação gráfica dos potenciais de passo

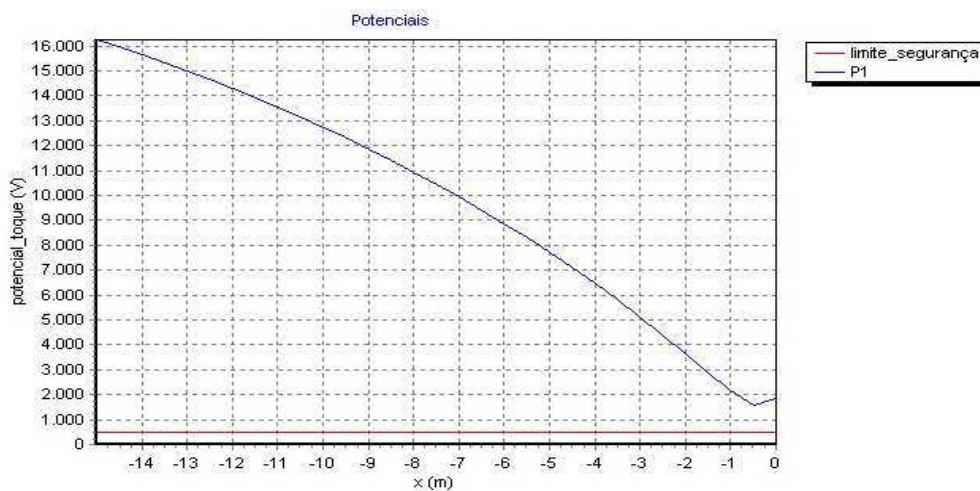


Figura 5-9 - Representação Gráfica dos potenciais de toque

Vale salientar também que em malhas de aterramento de estruturas metálicas, a diferença de tensão entre dois pontos na superfície é mais provável de ocorrer, devido à configuração da malha, logo a probabilidade de acontecer uma descarga elétrica em um indivíduo tocando na torre no momento da falta é bem menor do que uma descarga em um ser aos arredores da estrutura, provocado pela diferença de potencial no solo. Na Figura 5-10, está representado o gráfico de potencial da malha.

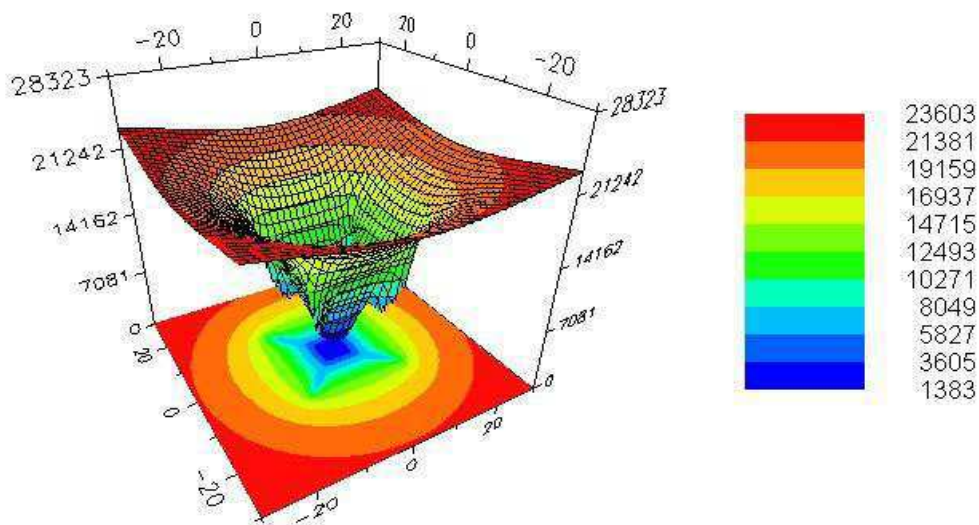


Figura 5-10 - Gráfico de Potenciais da malha para a situação descrita acima

A análise gráfica é feita verificando se a diferença de potenciais, tanto na tensão de passo como na tensão de toque, estão abaixo dos limites de fibrilação ventricular, caracterizando como um aterramento suficientemente seguro. Para o gráfico de potencial de passo, verifica-se que a maior diferença de potencial para distância de um metro, acontece nas proximidades da torre, no decorrer do percurso essa variação torna-se pequena, caracterizando o aterramento como aceitável dentro dos limites de segurança.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados alguns conceitos básicos a respeito de aterramento, focando principalmente a medição de resistência de aterramento em linhas de transmissão, o método utilizado para tal medição foi o da queda de potencial, diretamente utilizado pelo terrômetro.

Com os resultados obtidos em campo, os valores determinados no projeto e os dados obtidos na simulação, houve subsídio para uma comparação e fundamentar mais precisamente a análise. Proporcionou ainda o aprendizado na utilização do software *Tecat Plus 5.2*, que se mostrou de extrema importância na análise e projeto de sistemas de aterramento.

O relatório teve por finalidade analisar o sistema de aterramento das estruturas, em uma linha de transmissão de 230 kV, observando que dentro do espaço de amostragem, apenas uma das estruturas, encontrou-se fora dos padrões de projeto, sendo então solicitado ao projetista que o contrapeso fosse aumentado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER B. LIMA JOSÉ O.S. PAULINO, IVAN J.S. LOPES, THIAGO C. DIAS. **Modelo para Malhas de Aterramento de Torres de Linhas de Transmissão Submetidas a Descargas Atmosféricas.**[s/a].

CAPELLI ALEXANDRE. **Aterramento Elétrico: Parte II.** Saber Eletrônica. Jul/2000. - p. 1.

CHESF. **Especificação Técnica De Serviços De Linha De Transmissão.** Instalação Do Sistema De Aterramento, Estruturas Autoportantes, Depl 007/354. Abr/2007.

CHESF. **Especificação Técnica de Serviços de Linha de Transmissão.** Sistema de Aterramento. Set/2009.

KINDERMAN G.; CAMPAGNOLO J. M. **Aterramento Elétricos** . 3 ed. Porto Alegre : SAGRA-DC LUZZATO, 1995.

MORENA H.; COSTA F. C. **Aterramento Elétrico.** São Paulo : PROCOBRE.

NOGUEIRA R. L. S. **Análise De Sistemas De Aterramento Sob Solicitações Impulsivas: Otimização E Critérios De Segurança Em Aterramentos De Estruturas De Linhas De Transmissão.** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro : [s.n.], Mar/2006.

VISACRO F. S. **Aterramento Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento.** São Paulo : Artiliber Editora Ltda., 2005.