



FACULDADE DE ENGENHARIA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

MELHORAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DA LINHA DE TRANSMISSÃO
CL1

AUTOR:

Maira Amélia Raúl Mandede

SUPERVISORES:

Prof. Doutor Zacarias Chilengue, Eng^o [UEM]

Eng^o Mário André Focas [EDM]

Maputo, Junho de 2024



FACULDADE DE ENGENHARIA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

MELHORAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DA LINHA DE TRANSMISSÃO
CL1

AUTOR:

Maira Amélia Raúl Mandede

SUPERVISORES:

Prof. Doutor Zacarias Chilengue, Eng^o [UEM]

Eng^o Mário André Focas [EDM]

Maputo, Junho de 2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Gimo Raúl Mandede e Ester Doroteia Dava.

A minha Avó Anastácia Lendema, aos meus tios, primos e irmãos em especial Ivan Mandede, pelo apoio inestimável e orientação ao longo desta jornada académica e que de maneira incondicional têm me ajudado e incentivado para o alcance dos meus objectivos

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de estudo, trabalho, crescimento e aprendizado que me proporciona todos os dias.

Os meus profundos agradecimentos aos meus pais Gimo Raúl Mandede e Ester Doroteia Dava, que sempre dispensaram incentivo para que pudesse alcançar os meus sonhos, pelo apoio incalculável, confiança que depositaram em mim e moldaram a minha vida académica.

A minha avó Anastácia Lendema e aos meus tios: Marta (em memória), António, Helena, Flora, Ruth, Alice e Clésia que estiveram ao meu lado em momentos difíceis desta jornada e pelos valores transmitidos e experiências que incentivaram a ir em busca do conhecimento para alcançar os meus sonhos.

Aos meus irmãos e primos Ivan, Anastacia, Jaqueline, Assane, Assma, Gimo Junior, Iderson, Michela, Memeu e aos mais novinhos pelo seu apoio inestimável, presença constante e orientação ao longo de todo processo.

Aos meus colegas em especial ao Titos Saúl Beca, que têm acompanhado o processo da minha formação, pelo apoio, companheirismo e trabalho árduo de modo a tornarem os desafios mais leves e os triunfos mais leves durante dias e noites de modo a alcançar os nossos objectivos.

Aos meus amigos em especial Vania Vera por compartilharem comigo a jornada académica e incentivo na vida

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Zacarias Chilengue, Eng^o da Universidade Eduardo Mondlane e ao Eng^o Mário André Focas da Eletricidade de Moçambique pela sua orientação, conhecimento profundo e apoio incansável.

A todos os técnicos dos Departamentos da DTSU e colegas do estágio (Divisão de Transporte Sul) que estiveram disponíveis para esclarecer as dúvidas relacionadas ao estágio. A todos aqueles que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para minha formação, tanto profissional como pessoal, o meu muito obrigado.

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.

A malha de aterramento desempenha um papel fundamental na dissipação de correntes de falta, garantindo a segurança operacional e a integridade dos equipamentos. Um dos importantes métodos relacionados ao aterramento das linhas de transmissão é a redução das resistências de aterramento das estruturas, sabe-se que esta constitui um dos meios efectivos de controlar as sobretensões provocadas pelas descargas atmosféricas e também as correntes de surto do sistema.

Baseados nestas informações foram efetuadas medições em campo da resistência de aterramento e da resistividade do solo, onde foi possível constatar através dos resultados que algumas torres apresentaram valores que ultrapassaram os valores normalizados. O levantamento dessas informações é o principal foco deste estudo, que visa fornecer subsídios para a identificação de torres que apresentam resistência acima do valor normalizado.

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, Resistividade do solo.

ABSTRACT

Unscheduled shutdowns that occur in a transmission line constitute an important parameter in defining its performance, with atmospheric discharge being the main electromagnetic event responsible for such occurrences.

The grounding mesh plays a fundamental role in dissipating fault currents, ensuring operational safety and equipment integrity. One of the important methods related to the grounding of transmission lines is the reduction of the grounding resistance of the structures, it is known that this constitutes one of the effective means of controlling overvoltages caused by atmospheric discharges and also the system's surge currents.

Based on this information, field measurements were made of the grounding resistance of the counterweights and the resistivity of the soil, where it was possible to verify through the results that some towers presented values that exceeded the standardized values. Collecting this information is the main focus of this study, which aims to provide support for the identification of towers that present resistance above the normalized value.

In this work, the main physical aspects and appropriate methodologies for analyzing grounding are evaluated, with more specifically studying techniques to reduce grounding resistance, as well as grounding measurement routines and calculations involved in the process of obtaining data.

Keywords: Transmission Line, Atmospheric Discharges, Grounding, Grounding Resistance, Soil Resistivity.

Índice

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
RESUMO.....	III
ABSTRACT	IV
índice.....	V
Lista de Símbolos e abreviaturas	VIII
Lista de Figura.....	IX
Lista de Tabelas	X
CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.1.1. Contextualização.....	1
1.2. Formulação do Problema.....	1
1.3. Justificativa.....	1
1.4. Objectivos	2
1.4.1. Objectivo Geral.....	2
1.4.2. Objectivos Específicos.....	2
1.5. Metodologia	3
CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1. Linhas de transmissão	4
2.1.1. Torres de transmissão.....	5
2.2. Descargas atmosféricas.....	7
2.3. Pára-raios.....	11
2.4. Aterramento em linhas de transmissão.....	12
2.5. Constituição de um sistema de aterramento	13
2.6. Modelos de cabo de aterramento.....	14

2.6.1. Modelo de cabo de aterramento ou cabo contrapeso.....	14
2.6.2. Faixa de servidão.....	16
2.6.3. Modelo de haste vertical.....	16
2.7. Potencial de segurança.....	16
2.7.1. Tensão de Toque.....	17
2.7.2. Tensão de Passo.....	18
2.8. Malha de aterramento	19
2.8.1. Estudo do Solo.....	20
2.8.1.1. Resistividade do Solo.....	21
2.8.1.2. Tipo de solo.....	21
2.8.1.3. Humidade.....	22
2.8.1.4. Temperatura.....	23
2.8.1.5. Granulometria do solo.....	24
2.8.1.6. Compacidade do solo	24
2.8.1.7. Concentração e tipos de sais dissolvidos na água.....	25
2.8.1.8. . Tratamento químico do solo.....	25
CAPÍTULO III: MELHORAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO	27
3.1. Caso de Estudo: Linha de Transmissão CL1	277
3.1.1. Aterramento.....	27
3.1.1.1. Técnicas mais comuns de melhoria da Resistência de Terra.....	27
3.1.1.1.1. Aumento do número de eléctrodos em paralelo.....	27
3.1.1.1.2. Aprofundamento dos eléctrodos	28
3.1.1.1.3. Aumento da secção do eléctrodo	28
3.1.1.1.4. Tratamento químico do solo.....	28
3.1.2. Método utilizado na linha de transmissão CL1	28

3.2. Dados do sistema de aterramento a serem considerados	29
3.2.1. Configuração.....	29
3.2.1.1. Modelagem da resistividade do solo.....	29
3.2.2. Cálculo da Resistência de Aterramento	38
3.2.2.1. Método utilizado para a diminuição da resistência de aterramento	40
3.2.3. Cálculo da resistência Torre 94: Configuração 4 fios contrapeso.....	41
3.2.3.1. Cálculo da resistividade aparente.....	41
3.2.4. Cálculo da resistência Torre 94: Configuração 6 fios contrapeso.....	45
3.2.5. Tratamento químico do solo.....	52
3.3. Ajuste da resistência de aterramento tendo em conta a temperatura.....	53
3.4. Benefícios esperados do ponto de vista técnico da melhoria da malha de aterramento na linha de transmissão CL1.....	55
3.5. Benefícios esperados do ponto de vista económico da melhoria da malha de aterramento na linha de transmissão CL1.....	56
CAPÍTULO IV: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS.....	57
4.1. Custos de aquisição de material.....	57
4.2. Custo de aquisição de Ferramentas.....	57
4.3. Custo de Mão-de-obra.....	57
4.4. Custo de transporte.....	58
CAPÍTULO V: CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	59
5.1. Conclusão	59
5.2. Recomendações	59
CAPÍTULO VI: REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	60

Lista de Símbolos

UEM- Universidade Eduardo Mondlane

EDM- Eletricidade de Moçambique

DEEL- Departamento de Engenharia Eletrotécnica

FEUEM- Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane

DTSU- Divisão de Transporte Sul

NS- Nuvem-solo

NA- Nuvem-ar

NN- Nuvem-nuvem

IN- Intra-nuvem

LT- Linha de transmissão

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INMR- Insulators for Overhead Lines and Substations "Isoladores para Linhas Aéreas e Subestações"

MRT- Monofilar com retorno a terra

IEEE- Institute of Electrical and Electronics Engineers

GPR- Ground Potential Rise

CAA- cabo de alumínio com alma de aço

CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais

Lista de Figuras

Figura 1: Linhas de transmissão aérea (Fonte: Autor)4

Figura 2: Torre de transmissão (Fonte: Autor).....6

Figura 3: Descargas atmosféricas nas linhas de transmissão (Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018).....8

Figura 4: Curva expressa pela função de Heidler (Fonte: Vasconcelos e Moreira, 2017)9

Figura 5: Isolador com isolamento rompido (Fonte: INMR, 2017) 10

Figura 6: Para-raios de ZnO (Fonte: Hubbell Power Systems, 2015)..... 11

Figura 7: Constituição de um aterramento (Fonte: BGF CONSULTORIA, 2019) 13

Figura 8: Conexão aparafusada (esquerda); Conexão exotérmica tipo T (meio); Conexão tipo X (direita) (Fonte: BGF CONSULTORIA, 2019)..... 14

Figura 9: Arranjo de aterramento para estruturas metálicas autoportantes (Fonte: CEMIG, 2003)..... 15

Figura 10: Esquema de potencial de toque (Fonte: Adaptado de KINDERMANN, 1995, p.131) 17

Figura 11: Esquema de tensão de passo (Fonte: Adaptado de KINDERMANN, 1995, p.13) 18

Figura 12: Malha de aterramento (Fonte: UFPR, 2019)20

Figura 13: Valores típicos de K_t em função da resistividade (Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).....26

Figura 14: Medições das resistências entre a torre 3 até 81/ Fonte: Autor36

Figura 15: Medições das resistências entre a torre 89 até 142/ Fonte: Autor36

Figura 16: Medições das resistências entre a torre 144 até 196/ Fonte: Autor.....37

Figura 17: Medições das resistências entre a torre 199 até 251/ Fonte: Autor.....37

Figura 18: Medições das resistências entre a torre 254 até 315/ Fonte: Autor.....38

Figura 19: Modelo da malha de aterramento – 4 fios contrapeso (Fonte: Dos santos, 2013).39

Figura 20: Fase L – Método de cálculo (Fonte: Dos santos, 2013)40

Figura 21 : Fio contrapeso – Vista perfil (Fonte: Dos santos, 2013).....40

Figura 22: Modelo da malha de aterramento – 6 fios contrapeso (Fonte: Dos santos, 2013)45

Figura 23: Fase L – Método de cálculo (Fonte: Dos santos, 2013)45

Figura 24: Fio contrapeso – Vista perfil (Fonte: Dos santos, 2013).....46

Figura 25: Representação percentual de número de torre do método/ Fonte: Autor.....53

Lista de Tabelas

Tabela 1: Variação da resistividade em função do tipo do solo (Fonte: Adaptada da Revista Sector Eléctrico 2013).	22
Tabela 2: Variação do índice da humidade em função da resistividade do solo arenoso (Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)	23
Tabela 3: Valor da resistividade do solo arenoso de acordo com a temperatura (Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)	24
Tabela 4: Variação do sal adicional em função da resistividade do solo arenoso (Fonte: VISACRO, 2002)	25
Tabela 5: Valores das resistências medidas em cada torre 2 até 168 na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor).....	31
Tabela 6: Valores das resistências medidas em cada torre 37 até 196 na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor).....	32
Tabela 7: Valor da resistência medida na torre 81 na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor).....	33
Tabela 8: Valores das resistências medidas em cada torre (199 até 273) na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor).....	33
Tabela 9: Valores das resistências medidas em cada torre (219 até 301) na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor).....	34
Tabela 10: Valores das resistências medidas em cada torre (247 até 315) na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor).....	35
Tabela 11: Dados para cálculo da resistência (Fonte: Autor)	39
Tabela 12: Comprimento por fase (Fonte: Autor)	41
Tabela 13: valores de resistência e queda para as duas configurações (Fonte: Autor)	48
Tabela 14: Tratamento dos dados das resistências lidas entre as torres 2 até 197 da linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor).....	49
Tabela 15: Tratamento dos dados das resistências lidas entre as torres 36 até 295 da linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)	50
Tabela 16: Tratamento dos dados das resistências lidas entre as torres 78 até 311 da linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)	51
Tabela 17: Faixa da resistência obtidas através do tratamento químico do solo (Fonte: Autor).....	52
Tabela 18: Custo de aquisição de material (Fonte: Autor)	57
Tabela 19: Custo de aquisição de Ferramenta (Fonte: Autor).....	57
Tabela 20: Custo de Mão-de-obra (Fonte: Autor).....	57

CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

1.1.1. Contextualização

A malha de aterramento desempenha um papel fundamental no âmbito das infraestruturas eléctricas. O adequado funcionamento das linhas de transmissão é essencial para garantir sua operação segura e eficiente, dentro deste contexto, o sistema de aterramento torna-se uma prioridade para otimizar a operação e melhorar a confiabilidade do sistema eléctrico. Essa estrutura de terra fornece um caminho de baixa resistência eléctrica para a dissipação de corrente de falta, protegendo os equipamentos e o pessoal contra riscos de choques eléctricos e danos causados por surtos.

No entanto, apesar da sua importância, o sistema de malha de aterramento enfrenta desafios significativos que podem reduzir a capacidade da malha de aterramento de realizar suas funções de forma eficiente.

1.2. Formulação do Problema

A CL1 é uma linha de transmissão de 110 kV que parte da subestação de Infulene até a subestação da Macia e tem 125 km de distância. Foi construída em 1983, tem 41 anos de existência. Por conta disso, a linha tem enfrentado desafios significativos em relação á eficácia do sistema de aterramento. Nisso, há necessidade de compreender os obstáculos específicos enfrentados pelo sistema no que diz respeito ao estado actual das malhas de aterramento e em identificar estratégias eficazes para o seu bom desempenho. Esses desafios incluem a vandalização de acessórios de aterramento (cabo, grampos, uniões, terminais, ligadores) e ruptura de cabo de aterramento devido ao tempo de vida.

Como melhorar a malha de aterramento da linha de transmissão CL1 para garantir uma dissipação (escoamento) eficiente de corrente de falta para aumentar a confiabilidade do sistema?

1.3. Justificativa

A necessidade de melhorar as malhas de aterramento na linha de transmissão CL1 é crucial na segurança operacional. Um sistema de aterramento deficiente pode aumentar significativamente o risco de acidentes elétricos para os trabalhadores e operadores envolvidos nas atividades de manutenção e operação das linhas de transmissão. Além disso, uma infra-estrutura de aterramento inadequada pode levar a curtos-circuitos, falhas de equipamentos e interrupções no fornecimento de energia, afetando negativamente a confiabilidade do sistema elétrico e causando impactos econômicos e sociais adversos.

Também um aterramento inadequado pode resultar em danos aos equipamentos, aumentando os custos de manutenção e reduzindo sua vida útil. Investir no melhoramento das malhas de aterramento pode ajudar a proteger os investimentos em infra-estrutura elétrica, garantindo a operação eficiente e prolongada de seus activos.

1.4. OBJECTIVOS

1.4.1. Objectivo Geral

Propor melhorias na malha de aterramento da linha de transmissão CL1.

1.4.2. Objectivos Específicos

- Realizar uma análise detalhada da malha de aterramento existente na linha de transmissão CL1, identificando suas deficiências e pontos críticos;
- Criar um caminho de menor resistência para a corrente eléctrica, direccionando-a para a terra em caso de falhas ou descargas eléctricas;
- Propor soluções específicas para aprimorar a malha de aterramento de CL1, levando em consideração aspectos técnicos;
- Realizar simulação para validar as soluções propostas e verificar a eficácia na melhoria do desempenho da malha de aterramento;
- Avaliar os benefícios esperados das melhorias na malha de aterramento da linha CL1 incluindo a redução dos riscos operacionais e o aumento da vida útil dos equipamentos.

1.5. Metodologia

Para a realização deste trabalho, a metodologia a ser usada se baseará em:

- **Pesquisa Bibliográfica:** consistirá em revisão e análise de fontes bibliográficas como livros e artigos, tanto físicos como electrónicos;
- **Pesquisa de campo:** consistirá na coleta de dados através de experimentos e entrevistas.

CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Linhas de transmissão

As linhas de transmissão tem como propósito transportar energia eléctrica em grandes distâncias com um índice reduzido de perdas, garantindo assim, que a energia possa chegar até as extremidades dos circuitos com qualidade. Uma linha de transmissão é um circuito eléctrico que interliga diferentes tipos de subestações, cujo objectivo é o transporte de energia eléctrica (SANTOS, 2002 p.3).

A transmissão de energia pode ser realizada através de linhas aéreas, subterrâneas ou subaquáticas. As linhas de transmissão mais utilizadas são as linhas aéreas, que são caracterizadas por utilizarem condutores nus em sua extensão, conectados nas estruturas por isoladores. As linhas subterrâneas, em geral, utilizam cabos isolados e instalados em redes de ductos, sendo uma boa solução para grandes centros urbanos, apesar do custo mais elevado. As linhas subaquáticas, por sua vez, têm grandes limitações técnicas e económicas, mas são úteis em projectos especiais de travessias de rios e canais com vãos muito grandes, que dificultam a escolha de alternativa. As linhas de transmissão são constituídas por: torres e postes, cabos condutores (alumínio ou cobre), cabos pára-raio, isoladores, fundações, aterramento.

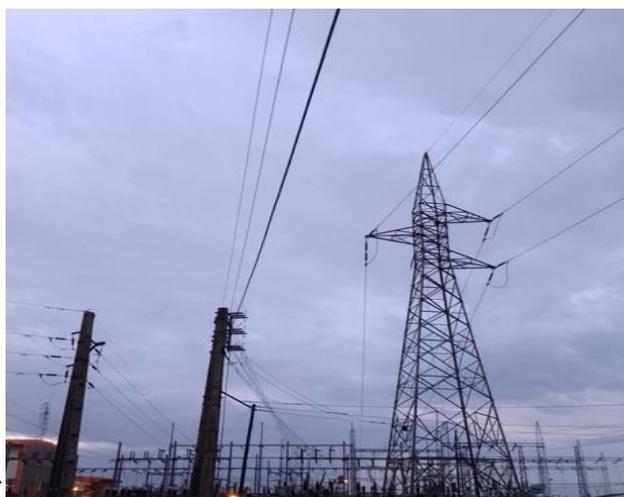


Figura 1: Linhas de transmissão aérea (Fonte: Autor)

2.1.1. Torres de transmissão

Dentre os elementos que compõe uma linha de transmissão de energia eléctrica, destacam-se as estruturas de suporte da linha, que são denominadas torres. Essas torres são responsáveis pela sustentação dos cabos condutores, cabos pára-raios, e também dos isoladores. A suspensão dos cabos pelas torres devem ocorrer de modo a garantir a distância segura entre os cabos condutores de fases, de outros circuitos, e entre os condutores e o solo. Outra função das torres é dada pelas amarrações das LTs ao terreno, através das suas respectivas fundações, as quais transmitem todos os esforços gerados para o solo.

Para a construção de uma linha de transmissão são utilizadas estruturas em concreto, metálicas com perfis de aço galvanizado ou postes de aço. Para altas tensões, o emprego de torres metálicas treliçadas é a solução mais econômica, devido à rapidez na montagem, com menor mobilização de material e equipamentos na execução (SINGH, 2009).

As mesmas podem ser classificadas conforme a estrutura e construção da seguinte maneira, (GONTIJO, 1994):

- A disposição dos cabos condutores;
- De acordo com número de circuitos eléctricos que elas suportam;
- Devida a sua função na linha;
- Forma de resistência das estruturas (autoportantes e estaiadas);
- Quanto a tensão da linha;
- Formato da silhueta da torre.

Quanto a função, as torres podem ser divididas em três tipos básicos:

- Terminais ou fim de linha;
- Torres de suspensão;
- Torres em ângulo.

As torres fim de linha, são aquelas utilizadas ou no início, ou no final, das linhas de transmissão, com o propósito de ancorarem os esforços dos cabos condutores e dos cabos para-raios. Essas possuem uma estrutura mais robustas, sendo projetadas para

suportarem os esforços dos cabos com o eixo da linha não coincidente com o eixo da torre, (CHAVES, 2004).

As torres de suspensão são adotadas em trechos retos, ou em locais com pouca angulação entre os cabos, podendo ser autoportantes ou estaiadas. Já as torres em ângulos trabalham nos pontos de mudança de direção das linhas, podem ser também chamadas de torres de ancoragem, na maioria das vezes estas torres são autoportantes (CHAVES, 2004).

Essas torres de transmissão, são de imensa importância para a linha de transmissão, tanto para suporte aos cabos de fase, e cabos para-raios, serve como ponte entre os cabos e o sistema de aterramento, auxiliando na descida das correntes indesejáveis para o solo através do sistema de aterramento, geralmente essas correntes são causadas por descargas atmosféricas.



Figura 2: Torre de transmissão (Fonte: Autor)

2.2. Descargas atmosféricas

A descarga atmosférica pode ser definida como uma descarga eléctrica transitória de curta duração, com uma alta corrente associada, que usualmente atinge quilómetros de extensão (SANTOS, 2016).

Os tipos de raios mais conhecidos são: nuvem-solo (NS); Intra nuvem (IN); nuvem-nuvem (NN) e; nuvem-ar (NA) (SAFAIE et al., 2018). A formação da descarga ocorre quando nuvens atingem uma quantidade de cargas eléctricas de forma a gerar campos eléctricos que superam a rigidez dieléctrica do ar, causando assim sua ruptura.

Os estudos do desempenho quanto a descargas atmosféricas são divididos em dois tipos que são: queda directa ou indirecta dos raios. Nos estudos de queda directa, é abordado o problema das ocorrências de descargas dos raios atingindo directamente um dos cabos condutores, elevando a tensão na fase. Se esta solicitação de tensão for superior à suportabilidade da cadeia de isoladores, poderá ocorrer uma descarga entre a fase e a torre. Este arco é alimentado pela tensão operativa do sistema que, conseqüentemente, provoca um curto-circuito e o desligamento da linha. Esse efeito é denominado de falha de blindagem. A partir dos estudos de queda directa é possível realizar uma optimização na posição dos cabos pára-raios em relação aos condutores, o que permite que se obtenha, na maioria dos casos, uma protecção mais efectiva dos cabos condutores (SILVA, 2007).

Pode-se definir descarga atmosférica como um fenómeno transitório e aleatório, que ocorre na atmosfera, tendo como origem uma nuvem de tempestade que se expressa, em seu estágio final, através de um fluxo de corrente impulsiva com alta intensidade em um curto intervalo de tempo através de um percurso constituído pelo canal de descarga. (BERARDO, 2012 p.29)

Já nos estudos de queda indirecta de raios, analisa-se o desempenho das linhas quando o raio atinge um dos cabos pára-raios. Ao contrário da queda directa, a ocorrência de desligamentos em consequência desse fenómeno, dificilmente é totalmente eliminada. Entretanto, esses efeitos podem ser minimizados através da análise e adequação dos distanciamentos na torre, acoplamento entre os cabos condutores e pára-raios e o aterramento da linha de transmissão proporcionando um

melhor desempenho. Ao atingir o cabo pára-raios, o raio provoca ondas de tensão e corrente que viajam ao longo da linha até atingir as torres mais próximas, com reflexões determinadas pelos valores das impedâncias de surto envolvidas.



Figura 3: Descargas atmosféricas nas linhas de transmissão (**Fonte:** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018)

Uma descarga atmosférica pode ser modelada por uma função descoberta por Heidler. Todo o processo de descarga atmosférica dura em média de 60 segundos (VASCONCELLOS, MOREIRA, 2017 p.2). A equação de Heidler é dada pode ser expressa abaixo:

$$F(t) = \frac{I_0 \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}}{\eta \left[1 + \left(\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right)\right]} e^{-\frac{t_1}{t_2}} \quad (2.1)$$

Onde:

I_0 - Amplitude de corrente na base do canal;

τ_1 - O constante de tempo relacionada ao tempo de frente de onda de corrente;

τ_2 - Constante de tempo relacionada ao tempo de decaimento de onda de corrente;

n - Expoente de ajuste da função de Heidler;

η - factor de correcção de amplitude.

$$\eta = e \left[\left(\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right) \left(\frac{n\tau_1}{\tau_2} \right) \right) \right]^{\frac{1}{n}} \tag{2.2}$$

De maneira gráfica a função de Heidler pode ser expressa pela curva abaixo. A função de Heidler é amostrada em um tempo na casa dos milissegundos, uma vez que a velocidade de propagação de uma descarga eléctrica é cerca de 100km/s.

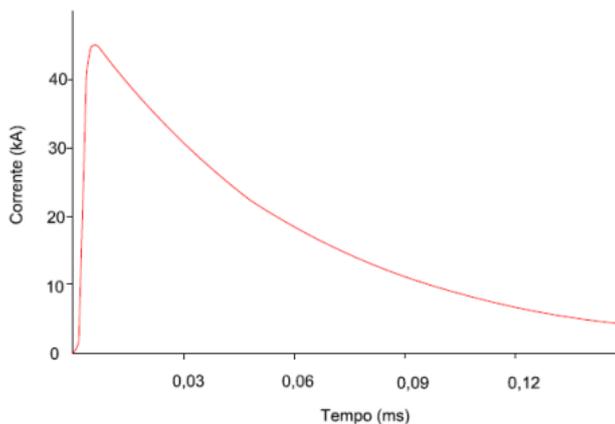


Figura 4: Curva expressa pela função de Heidler (Fonte: Vasconcelos e Moreira, 2017)

Porém, mesmo com a presença de cabos pára-raios, ainda existem ocorrências de surtos capazes de provocar desligamentos na linha de transmissão. Ambos são fenómenos oriundos de descargas atmosféricas que atingem a rede são eles: flashover e backflashover.

Segundo o INPE (2018) o filshover ocorre quando uma descarga atmosférica atinge directamente os cabos condutores da LT. A sobretensão incidida directamente sobre os condutores é capaz de romper o isolamento das cadeias de isoladores que garantem o isolamento eléctrico entre a estrutura e os condutores. Este tipo de fenómeno também é conhecido como Descarga Disruptiva Directa (BERARDO, 2012).

Quando é rompido o isolamento entre os condutores da LT e os isoladores da estrutura o caminho que possui a menor impedância para escoamento da corrente eléctrica, acaba sendo os próprios cabos condutores da linha de transmissão. A figura 5 apresenta um isolador com isolamento rompido.



Figura 5: Isolador com isolamento rompido (Fonte: INMR, 2017)

2.3. Pára-raios

Os pára-raios são considerados resistores que fornecem um caminho de baixa impedância para a corrente, além de limitar os níveis de sobretensões com base na compatibilidade dos equipamentos de protecção da rede.

De acordo com Pinto (2006), quando ocorre uma descarga de corrente, a mesma é direccionada à terra, através dessa impedância de surto limita a tensão em relação à terra. Em condições normais de operação, essa impedância é suficientemente alta para trabalhar em um circuito aberto, e assim permanece até o para-raios ser atingido por uma tensão de surto.

Os cabos pára-raios apresentam uma grande relevância nas linhas de transmissão, os mesmos são responsáveis pela protecção das fases contra as descargas eléctricas que podem gerar o desligamento temporário da linha ou até mesmo causar danos aos cabos e isoladores (GIAROLA, 2016). Para a protecção das linhas, os pára-raios são instalados no topo da torre, quando ocorre alguma descarga eléctrica, os cabos pára-raios direccionam as cargas eléctricas, evitando assim o contacto directo com cabos energizados (PINTO, 2006).



Figura 6: Para-raios de ZnO (Fonte: Hubbell Power Systems, 2015)

2.4. Aterramento em linhas de transmissão

Para qualquer tipo de sistema que envolva electricidade, é de importância significativa que hajam dispositivos de protecção capazes de garantir a integridade do sistema e dos seres vivos que circundam e usufruam de seus benefícios.

Segundo Visacro Filho (2002), o termo aterramento eléctrico pode ser definido como uma forma de conectar de forma proposital uma estrutura condutora de corrente eléctrica à terra, com a finalidade de prover um caminho a correntes indesejáveis pelo sistema através de uma impedância de aterramento, ou seja, aterramento é responsável por escoar surtos e anomalias que ocorrem em uma LT directamente para a terra.

A principal finalidade do aterramento da linha de transmissão, é transferir de forma eficiente as correntes transitórias provenientes de descargas atmosféricas para a terra no qual devem ser projectados para ter uma impedância menor do que a impedância do circuito da linha de transmissão, assim dividindo a corrente transitória que circula na torre reduzindo as tensões transitórias nos isoladores de linha.

Segundo Kindermann e Campagnolo (1995), o aterramento tem como objectivos principais:

- Obter uma mínima resistência de aterramento para correntes de falta à terra;
- Assegurar os potenciais de tensão produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança de modo a não causar riscos aos seres vivos;
- Tornar os equipamentos de protecção mais sensíveis, isolando mais rapidamente as falhas à terra;
- Proporcionar um caminho de escoamento para a terra de descargas atmosféricas;
- Usar a terra como retorno para a corrente em sistema MRT (Monofilar com Retorno a Terra);
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças de equipamentos.

Também segundo Silva e Júnior (2004, p. 12) para ser considerado eficiente um sistema de aterramento deve conter as seguintes características:

- **Capacidade de condução de corrente:** seu valor depende do material constituinte dos cabos e hastes empregados, do tempo de eliminação da falha, do tipo de conexão usada e das características do solo;
- **Segurança:** o índice de segurança de uma instalação está sujeito ao dimensionamento do sistema de aterramento, o qual deve ser feito para que os potenciais resultantes de correntes de falha estejam de acordo com os limites instituídos pelas normas técnicas;
- **Estabilidade:** para se ter um sistema de aterramento instável é imprescindível instalá-lo em um meio com resistividade constante em relação as condições climáticas, sendo que isto pode ser conseguido naturalmente ou artificialmente com o tratamento do solo, por exemplo com aplicação de bentonita.

2.5. Constituição de um sistema de aterramento

Basicamente, um sistema de aterramento pode ser constituído de três componentes:

- Conexões eléctricas que ligam o sistema aos eléctrodos de aterramento;
- Eléctrodos de aterramento podem ser qualquer corpo metálico inserido no solo;
- A terra onde está cravado os eléctrodos.



Figura 7: Constituição de um aterramento (Fonte: BGF CONSULTORIA, 2019)

De acordo com Mamede (2010), as conexões utilizadas para conectar os condutores nas emendas ou derivações podem ser: conectores aparafusados ou

conexões exotérmicas tipo derivação (T) ou tipo cruzamento (X). Os eléctrodos podem ser constituídos de aço galvanizado ou aço cobreado, sendo o último mais utilizado por adquirir elevada resistência à corrosão.

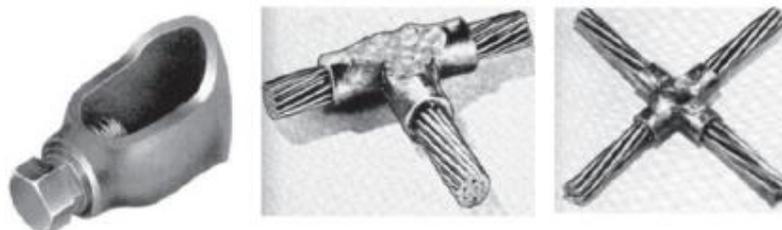


Figura 8: Conexão aparafusada (esquerda); Conexão exotérmica tipo T (meio); Conexão tipo X (direita) (Fonte: BGF CONSULTORIA, 2019)

Nas linhas de transmissão, o sistema de aterramento é constituído de cabos contrapesos e impedâncias instaladas, ou nos pés das torres de ancoragem, ou nas bases do mastro central e estais de estruturas estaiadas (MENEZES, 2015).

2.6. Modelos de cabo de aterramento

2.6.1. Modelo de cabo de aterramento ou cabo contrapeso

Baseia-se em eléctrodos dispostos ao solo de forma horizontal, seu comprimento e sua profundidade pode variar de acordo com as características de cada tipo de solo, ainda pode conter anéis equalizadores e hastes, em casos nos quais se pretende mitigar potenciais de passo e de toque perigosos ao redor das estruturas, devido ao facto da LT atravessar áreas de loteamento e de circulação de pessoas.

Normalmente, constituídos por condutores de cobre, aço zincado ou aço-cobre, são cabos enterrados no solo a uma profundidade que pode variar de 20 cm a 1 metro, conectados ao pé ou base da torre.

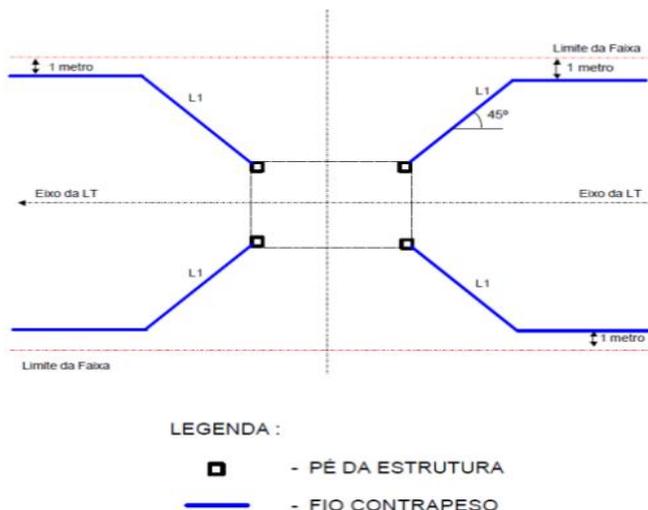


Figura 9: Arranjo de aterramento para estruturas metálicas autoportantes (**Fonte:** CEMIG, 2003).

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 resistência ao pé da 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 a terra remoto, devido ao fluxo de corrente no outro eletrodo.

2.6.2. Faixa de servidão

As faixas de servidão, também chamadas de faixas de segurança, são áreas do terreno com restrição imposta de uso e gozo do proprietário, cujo domínio e uso é atribuído ao proprietário da LT, para permitir a implantação, operação e manutenção do seu sistema elétrico.

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 mútua que é diretamente proporcional à distância entre os fios contrapeso.

2.6.3. Modelo de haste vertical

É importante destacar que os elétrodos verticais são usados principalmente quando as camadas mais profundas do solo têm menor resistividade, e também por razões práticas e fácil cravação no solo.

2.7. Potencial de segurança

O aterramento projetado deve atender aos índices de resistência de aterramento que sejam capazes de garantir um desempenho de segurança satisfatório tanto para o sistema quanto para terceiros. Para garantir tais índices, existem dois parâmetros importantes a serem levados em conta: **tensão de toque e tensão de passo**. Estes parâmetros garantem a segurança dos seres vivos que trafegam nos arredores da LT.

2.7.1. Tensão de Toque

O potencial de toque é a diferença de potencial existente entre um determinado ponto de uma estrutura metálica, situada ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 m da base da estrutura em questão (IEEE-80, 2000). Por consequência tem-se a passagem de corrente pelo corpo humano que dependendo da sua duração e intensidade, pode gerar alto risco a pessoa.

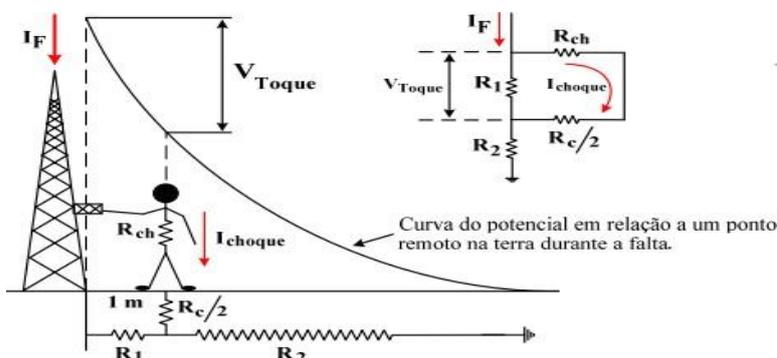


Figura 10: Esquema de potencial de toque (**Fonte:** Adaptado de KINDERMANN, 1995, p.131)

Na Figura 10 está representado um esquema de como se obter a expressão do potencial de toque em relação à corrente de choque:

$$V_t = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \times I_{ch} \quad (2.3)$$

A expressão para o potencial de toque máximo permissível será dada pela 2.4.

$$V_{max} = (100 + 1.5\rho_s) \times \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (2.4)$$

Onde:

R_c – Resistência de contacto que pode ser considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), conforme citado em IEEE-80 (2000).

R_{ch} – Resistência do corpo humano, que é considerada de 1,0 kΩ, conforme

mencionado em IEEE-80 (2000).

R_1 e R_2 – Resistências dos trechos de terra considerados.

I_{ch} – Corrente que percorre o corpo humano.

2.7.2. Tensão de Passo

O potencial de passo é a diferença de potencial existente entre dois pontos situados no solo e distanciados de 1m devido a passagem de corrente de curto-circuito pela terra (IEEE-80, 2000).

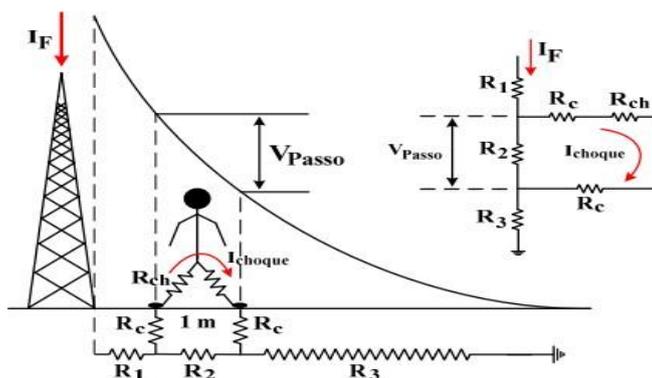


Figura 11: Esquema de tensão de passo (Fonte: Adaptado de KINDERMANN, 1995, p.13)

Na Figura 11 é apresentado um esquema de como se obter a expressão do potencial de passo em relação à corrente de choque, em que:

$$V_{Passo} = (R_{ch} + 2R_c) \times I_{ch} \quad (2.5)$$

Onde:

R_{ch} - Resistência do corpo humano, que é considerada de 1,0 k Ω , conforme mencionado em IEEE-80 (2000);

R_c - Resistência de contacto que pode ser considerada igual a 3ps (resistividade superficial do solo), conforme citado em IEEE-80 (2000);

R_1, R_2, R_3 - Resistências dos trechos de terra considerados;

I_{ch} - Corrente que percorre o corpo humano.

A expressão para o potencial de passo máximo permissível será dada pela equação 2.6.

$$V_{passo.max} = (100 + 6\rho s) \times \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (2.6)$$

2.8. Malha de aterramento

O objectivo principal da utilização de uma malha de aterramento é a manutenção das tensões de passo, toque e a resistência eléctrica dentro dos níveis toleráveis (HUANG et al., 1995).

Todas as sobrecargas do sistema, ao apresentarem um aterramento adequado, direccionam as tensões excessivas para as malhas de aterramento independentemente se as sobrecargas são provenientes de curtos-circuitos, descargas atmosféricas, surtos por chaveamento e correntes harmónicas.

As malhas de aterramento requerem cuidados para que exerçam a integridade de suas funções. São factores a serem considerados no projecto de aterramento das malhas: a geometria (as dimensões e especificações dimensionais), a localização dos eléctrodos, as características do solo e outros factores. O grande gradiente de potencial do solo, requer um cuidado especial no sistema de aterramento para que as sobrecargas sejam direccionadas ao solo protegendo o sistema como um todo.

A resistência da malha de aterramento é directamente proporcional a resistividade aparente condições normais, o aterramento eléctrico deve operar com potencial próximo

de zero. Assim, o potencial do eléctrodo do aterramento é praticamente igual ao potencial do terra remoto. Na ocorrência de falta, a corrente que é conduzida pela malha de aterramento para a terra causa a elevação do potencial eléctrico da malha em relação ao terra remoto. A elevação do potencial da malha GPR é o potencial eléctrico máximo que o eléctrodo da malha pode atingir em relação ao terra remoto durante a falta. Um dado importante na elaboração do estudo de sistema de aterramento é conhecimento das características do solo, principalmente a resistividade eléctrica.

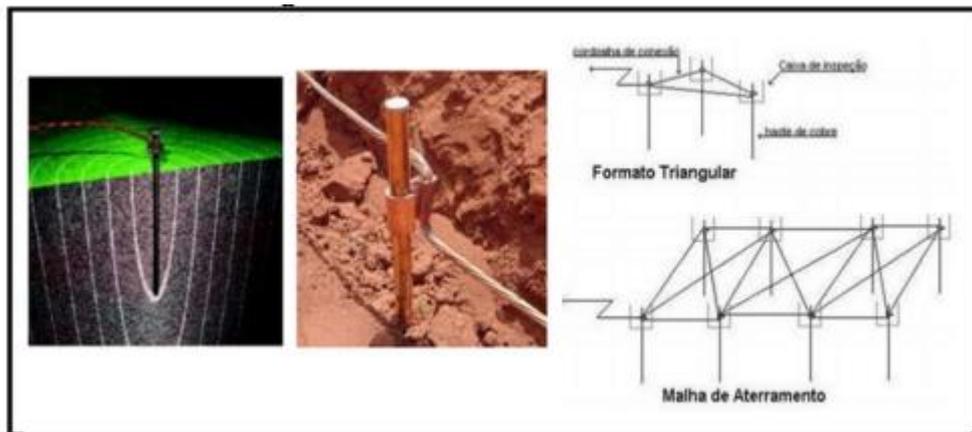


Figura 12: Malha de aterramento (Fonte: UFPR, 2019)

2.8.1. Estudo do solo

A permissividade e resistividade do solo, são parâmetros característicos do solo que está directamente relacionado com o comportamento da linha de transmissão em transitório de descargas atmosféricas. Como os cabos nus de aterramento enterrados entram em contacto directo com o solo de resistividade alta que tem influência moderada no desempenho do transitório. No solo com menor resistividade a influência no desempenho do transitório é baixa (LIU; ZITNIK; THOTTAPPILLIL, 2001). Para o desempenho do aterramento de linha de transmissão, o estudo do solo se faz necessário, uma vez que o solo serve como caminho para as correntes de transitórios na linha de transmissão. O projecto de aterramento é dimensionado de acordo com a resistência de aterramento, o levantamento das características do solo é realizada na fase de estudo de pré-projeto, Nascimento (2017) ainda cita que a resistividade ($\rho \leq 500 \Omega.m$) é proporcionalmente baixa e solos com resistividades acima ($\rho \geq 2000 \Omega.m$) é considerado elevado e requerem aterramentos complexos.

2.8.1.1. Resistividade do Solo

A resistividade eléctrica do solo corresponde a resistência existente entre faces opostas do volume de solo, em termos de facilitação do dimensionamento, se considera como parâmetro a análise de um cubo homogéneo e isotrópico cuja aresta mede uma unidade de comprimento.

Como o solo geralmente apresenta uma composição bastante heterogénea, o valor da sua resistividade pode variar em função do tipo de componente do solo de modo que o valor de sua resistividade varia de local para local. A seguir são considerados os principais parâmetros que influenciam no valor da resistividade de um solo, são eles:

- Tipo de solo;
- Humidade;
- Temperatura;
- Granulometria;
- Compacidade;
- Concentração e tipos de sais dissolvidos na água.

2.8.1.2. Tipo de solo

Os valores de resistividade para os solos são bastante distintos devido a grande variedade de solos existentes. A variação de resistividade de um local para outro é devido à formação geológica dos solos e a variação em um mesmo local é devido à profundidade das camadas estratificadas do solo.

Tabela 1: Variação da resistividade em função do tipo do solo (Fonte: Adaptada da Revista Sector Eléctrico 2013).

Tipo de Solo	Faixa da resistividade (Ω m)
Água do mar	Menor que 10
Alagadiço, Lama, Limo, Húmus	Até 150
Água destilada	300
Argila	300-5.000
Calcário	500-5.000
Areia	1.000-8.000
Granito	1.500-10.000
Basalto	A partir de 10.000
Concreto	Molhado: 20-100
	Húmido: 300-1.000
	Seco: 3.000-2.000.000

O solo é normalmente constituído por diversas camadas, cada uma delas apresentando uma espessura e resistividade. Os conhecimentos destes valores são de relevância para se determinar as condições do sistema de aterramento, bem como os determinar os potenciais de passo e do solo (MODENA e SUETA, 2013).

2.8.1.3. Humidade

A humidade é responsável por alterar a resistividade do solo. Uma percentagem maior de humidade faz com que os sais presentes no solo se dissolvam, formando um meio electrolítico favorável à passagem de corrente iónica. Dessa forma, um determinado tipo de solo, com diferente concentração de humidade, apresenta uma grande variação na sua resistividade (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Na tabela a seguir, é apresentada a relação entre a resistividade e humidade para um solo arenoso. Observa-se que a resistividade diminui sensivelmente com o aumento da quantidade de água diluída no solo para variações do índice de 0 a 18%

Tabela 2: Variação do índice da humidade em função da resistividade do solo arenoso (Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

Índice de Humidade (% por peso)	Resistividade do solo arenoso (Ωm)
0.0	10.000.000
2.5	1500
5.0	300
10.0	430
15.0	185
20.0	105
30.0	63

2.8.1.4. Temperatura

Deve-se encarar os efeitos da temperatura sobre a resistividade do solo em dois aspectos distintos:

- Uma temperatura elevada provoca maior evaporação, diminuindo a humidade do solo. Desta forma, um aumento de temperatura tende a aumentar a resistividade.
- Considerando que a resistividade do solo é sensivelmente influenciada pela água nele contida e sabendo-se que a água possui alto coeficiente negativo de temperatura, é razoável supor que a resistividade tende a crescer para uma diminuição da temperatura.

A tabela a seguir mostra o comportamento da resistividade de um solo arenoso de acordo com a variação da temperatura.

Tabela 3: Valor da resistividade do solo arenoso de acordo com a temperatura (Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

Temperatura (°C)	Resistividade do solo arenoso (Ω m)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3300

2.8.1.5. Granulometria do solo

A granulometria do solo exerce influência em dois aspectos: na capacidade de retenção de água nas camadas do solo e também na continuidade física (VISACRO, 2002). A influência de uma granulometria maior tende a aumentar a resistividade, visto que afecta a capacidade de retenção de água através do escoamento para camadas mais profundas ou pela evaporação. Também é afectada a continuidade física do solo, através do menor contacto existente entre os grãos, a continuidade eléctrica é menor.

2.8.1.6. Compacidade do solo

Segundo Visacro (2002), um solo mais compacto apresenta um valor de resistividade menor proporcionado pela maior continuidade física. Um aumento da pressão sobre o solo geralmente aumenta a compacidade deste, diminuindo sua resistividade. Recomenda-se a espera de um certo tempo para medição da resistência de terra após a instalação de um aterramento eléctrico. O solo demora um certo tempo para se acomodar e melhorar sua compactação.

2.8.1.7. Concentração e tipos de sais dissolvidos na água

Sabendo-se que a resistividade da água é governada pelos sais dissolvidos (condução electrolítica) e como a resistividade do solo depende da quantidade de água retida, conclui-se que a resistividade do solo é influenciada pela quantidade e pelos tipos de sais dissolvidos na água retida no mesmo (VISACRO, 2002). Na Tabela a seguir é relacionada a quantidade de sal adicionado a um solo arenoso de humidade 15% (percentual em peso) e temperatura de 17°C, com a resistividade.

Tabela 4: Variação do sal adicional em função da resistividade do solo arenoso (Fonte: VISACRO, 2002)

Sal adicionado (% por peso)	Resistividade do solo arenoso (Ω m)
0	107
0.1	18
1.0	1.6
5.0	1.9
10.0	1.3
20.0	1.0

2.8.1.8. Tratamento químico do solo

O tratamento químico do solo visa a diminuição da sua resistividade, conseqüentemente a resistência de aterramento.

O valor de K_t poderá de ser obtido, para cada caso, medindo-se a resistência do aterramento antes e após o tratamento.

$$K_t = \frac{R_{com\ tratamento}}{R_{Sem\ tratamento}} \quad (2.7)$$

Onde: K_t é o coeficiente de redução devido ao tratamento químico do solo

Na figura 13 têm-se um gráfico dos valores prováveis de K_t em função da resistividade do solo para um tratamento do tipo de GEL. A região hachurada é a faixa provável dos valores de K_t dado pelo fabricante, observa-se que em solo com alta resistividade, o tratamento químico é mais eficiente.

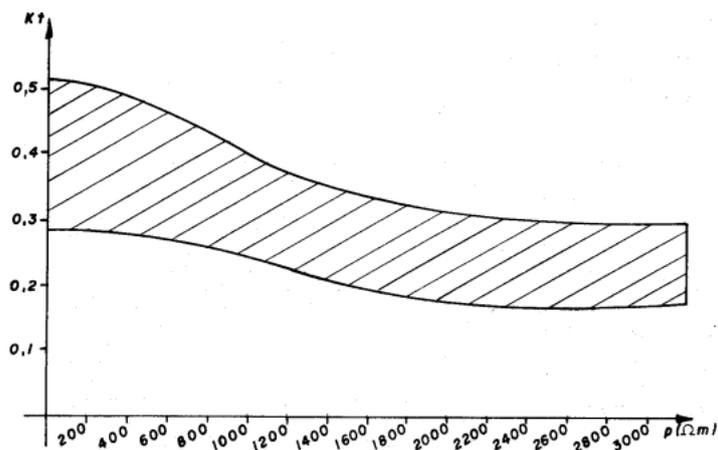


Figura 13: Valores típicos de K_t em função da resistividade (Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

CAPÍTULO III: MELHORAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO

3.1. Caso de Estudo: Linha de Transmissão CL1

A linha de transmissão CL1 que é o objeto de estudo, inicia na Subestação de Infulene e vai até a Subestação da Macia. Essa linha de transmissão possui uma tensão nominal de 110 kV, possui aproximadamente 125 km de extensão, uma capacidade máxima de 99MVA e possui 135 torres tipo Delta que são responsáveis pela sustentação dos demais elementos que compõe a linha, tais como: a cadeia de isoladores, os cabos condutores.

Os cabos condutores utilizados, foram cabos de alumínio nu CAA (Cabos de alumínio com alma de aço), muito utilizado para linha de transmissão aérea, eles são cabos formados por uma ou mais coroas de fios de alumínio, em torno de uma alma de aço composta de um ou mais fios.

3.1.1. Aterramento

3.1.1.1. Técnicas mais comuns de melhoria da Resistência de Terra

Muitas vezes, após a instalação de um sistema de terra, chega-se à conclusão, através de medições, que o valor da resistência de terra obtido é superior ao desejado. Existem algumas técnicas que podem ser aplicadas com o intuito de diminuir este valor. Tais técnicas actuam, de um modo geral, modificando a resistividade do solo nas proximidades do eléctrodo, alterando as condições dos eléctrodos ou pela conjugação das duas

3.1.1.1.1. Aumento do número de eléctrodos em paralelo

Por este meio consegue-se diminuir bastante a resistência. Contudo, os eléctrodos deverão estar suficientemente afastados para minimizar os efeitos da resistência mútua. A partir de um certo número de eléctrodos em paralelo, a resistência passa a diminuir pouco face ao número de eléctrodos necessários, deixando esta técnica de ser eficaz;

3.1.1.1.2. Aprofundamento dos eléctrodos

Este método é bastante usado na aplicação de hastes verticais. Se o solo apresentar camadas mais profundas de menor resistividade, esta técnica revela-se bastante eficaz. A partir de um certo ponto, o valor da diminuição da resistência de terra deixa de ser relevante para grandes aumentos de profundidade;

3.1.1.1.3. Aumento da secção do eléctrodo

Observa-se uma diminuição da resistência de terra para um aumento da área de secção do eléctrodo. Contudo, o que ocorre na maioria das vezes é o dimensionamento da secção do eléctrodo por questões de resistência mecânica ou em função da sua capacidade de condução de corrente, pois a variação no valor de resistência por variação da secção é pequena

3.1.1.1.4. Tratamento químico do solo

A adição de sais no solo circundante aos eléctrodos diminui a sua resistividade e, por conseguinte, o valor da resistência de terra. É necessária especial atenção para que os sais não entrem em contacto directo com os eléctrodos de forma a evitar a sua corrosão, bem como manter um controlo periódico do valor de resistência de terra que pode aumentar com o tempo devido à dispersão dos sais pelo solo;

3.1.2. Método utilizado na linha de transmissão CL1

O método de aterramento executado nas estruturas da LT, dispõe da utilização de eletrodos horizontais posicionados à uma dada profundidade sobre a porção de solo nas proximidades das estruturas. Esta configuração de aterramento que é tipicamente utilizada em linhas de transmissão, traz benefícios como economia em materiais e tempo de execução das atividades construtivas da LT.

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.

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 .

3.2. Dados do sistema de aterramento a serem considerados

3.2.1. Configuração

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

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

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. A medição é realizada da seguinte maneira: primeiramente, é escolhido o sentido da medição que pode ser longitudinal ou transversal. Como foi realizada em uma linha existente foi escolhida a medição na transversal, perpendicular ao eixo da LT, pois, desta forma o risco de atingir o cabo de aterramento é eliminado.

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

$$\rho = 2\pi aR \quad (2.7)$$

Onde: ρ – Resistividade do solo (Ωm);

R - Resistência do solo medida (Ω);

a - Espaçamento entre haste (m);

Tabela 5: Valores das resistências medidas em cada torre 2 até 168 na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

Nº de torre	Resistência Medida	Resistividade	Nº de Torre	Resistência Medida	Resistividade	Nº de torre	Resistência Medida	Resistividade
	R(Ω)	ρ (Ω.m)		R(Ω)	ρ (Ω.m)		R(Ω)	ρ (Ω.m)
2	68.2	856.59	89	48.6	610.42	144	17.3	Valor óptimo
3	90.6	1137.94	90	76.7	963.35	145	22.8	286.51
4	21.3	267.53	91	20.4	256.22	146	19.6	246.30
5	35.7	448.39	92	109	1369.04	147	36	452.39
6	33	414.48	93	103	1293.68	148	57.1	717.54
11	38.9	488.58	94	293.5	3686.36	149	24.2	304.11
12	60	753.60	95	90	1130.40	150	70.1	880.90
13	65.9	827.70	96	111.5	1400.44	151	93.4	1173.70
14	105.3	1322.57	97	100.8	1266.05	152	79.2	995.26
15	38.5	483.56	98	219.5	2756.92	153	87.2	1095.79
16	34.8	437.09	99	78.4	984.70	154	74.5	936.19
17	40.5	508.68	100	186.7	2344.95	155	69.5	873.36
18	65	816.40	101	179.2	2250.75	156	65.8	826.87
19	134.2	1685.55	102	114	1431.84	157	47.5	596.90
20	137	1720.72	103	170.2	2137.71	158	58.2	731.36
21	42.6	535.06	104	88.5	1111.56	159	79	992.74
22	46.4	582.78	105	101.8	1278.61	160	75.3	946.25
23	92.8	1165.57	106	99.9	1254.74	161	49.1	617.01
27	65.9	827.70	107	140.9	1769.70	162	80.8	1015.36
29	41	514.96	108	69.3	870.41	163	16.49	Valor optimo
30	118.4	1487.10	109	112.5	1413.00	164	13.41	Valor optimo
33	202	2537.12	110	101	1268.56	165	5.54	Valor optimo
34	164	2059.84	111	179.9	2259.54	166	6.42	Valor optimo
35	153.5	1927.96	112	6.74	Valor optimo.	167	3.62	Valor optimo
36	62.3	782.49	113	109	1369.04	168	15.19	optimo

Tabela 6: Valores das resistências medidas em cada torre 37 até 196 na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

37	71.6	899.30	114	102	1281.12	169	16.89	Valor óptimo
38	145.46	1826.98	115	50.9	639.30	170	19.1	Valor óptimo
40	110.4	1386.62	116	170	2135.20	171	12.28	Valor óptimo
42	203.4	2554.70	117	84.6	1062.58	172	0.72	Valor óptimo
44	88.6	1112.82	118	181.9	2284.66	173	1.86	Valor óptimo
45	36.8	462.21	119	195.6	2456.74	174	10.78	Valor óptimo
46	63	791.28	120	123.9	1556.18	175	81.7	1026.67
48	23.6	296.42	121	113.3	1423.05	176	54.1	679.84
49	97.6	1225.86	122	88	1105.28	177	80.7	1014.11
50	98.4	1235.90	123	174.4	2190.46	178	74.1	931.17
51	95.8	1203.25	124	136.3	1711.93	179	163.6	2055.86
53	126	1582.56	125	112.6	1414.26	180	79.1	994.00
56	32.3	405.69	126	74.4	934.46	181	55.1	692.41
59	109.8	1379.09	127	214	2687.84	182	56.7	712.51
66	24.6	308.98	128	58.1	729.74	183	51.4	645.91
68	88.1	1106.54	129	75	942.00	184	67.6	849.49
69	146.3	1837.53	130	135.8	1705.65	185	63.7	800.48
70	171.3	2151.53	131	69.9	877.94	186	38	477.52
71	240.4	3019.42	132	129.5	1626.52	187	51.3	644.65
72	126.2	1585.07	133	125.7	1578.79	188	44.9	564.23
73	104.2	1308.75	134	122.3	1536.09	189	69.2	869.59
74	89.9	1129.14	135	60	753.60	190	55	691.15
75	47.4	595.34	136	80.7	1013.59	191	60	753.98
76	52.7	661.91	137	73.3	920.65	192	25.8	324.21
77	112.2	1409.23	138	102	1281.12	193	56.1	704.97
78	167.9	2108.82	139	45.1	566.46	194	76.5	961.33
79	179.6	2255.78	140	38	477.28	195	57.2	718.80
80	184.4	2316.06	141	40	502.40	196	66.4	834.41

Tabela 7: Valor da resistência medida na torre 81 na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

81	89.1	1119.10	142	91.4	1147.98	197	66.4	834.41
-----------	------	---------	------------	------	---------	------------	------	--------

Tabela 8: Valores das resistências medidas em cada torre (199 até 273) na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

N. de torre	Resistência Medida	Resistividade	N. de torre	Resistência Medida	Resistividade
	R (Ω)	ρ (Ω.m)		R (Ω)	ρ (Ω.m)
199	24.1	302.85	254	6.58	Valores óptimos
200	85.4	1073.17	255	7.1	
201	39	490.09	256	4.51	
202	26.4	331.75	257	5.54	
203	24.1	302.85	258	13.13	
204	24.1	302.85	259	5.22	
205	16.9	Valor óptimo	260	6.95	
206	41.8	525.27	261	5.98	
207	78.1	981.43	262	6.23	
208	67.4	846.97	263	6.9	
209	379	4762.65	264	5.02	
210	217	2726.90	265	0.658	
211	87	1093.27	266	0.391	
212	35.9	451.13	267	1.867	
213	88	1105.84	268	3.31	
214	93.3	1172.44	269	6.9	
215	90.7	1139.77	270	9.36	
216	83.8	1053.06	271	4.35	
217	117.3	1474.04	272	7.3	
218	65.7	825.61	273	1.04	

Tabela 9: Valores das resistências medidas em cada torre (219 até 301) na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

219	48.1	604.44	274	3.31	
220	61.6	774.09	275	3.82	
221	67.8	852.00	276	3.54	
222	36	452.39	277	4.8	
223	35.9	451.13	278	8.2	
224	112.8	1417.49	279	10.6	
225	11.01	Valor óptimo	280	6.8	
226	4.3	Valor óptimo	281	5.47	
227	9.92	Valor óptimo	282	117	
228	3.19	Valor óptimo	283	2.6	
229	2.91	Valor óptimo	284	4.45	
230	4.2	Valor óptimo	285	4.63	
231	4.32	Valor óptimo	286	4.65	
332	11.07	Valor óptimo	287	3.14	
233	4.75	Valor óptimo	288	3.26	
234	8.58	Valor óptimo	289	274	3443.19
235	2.85	Valor óptimo	290	74.9	941.22
236	22.67		291	85.3	1071.91
237	5.71	Valor óptimo	292	52.9	664.76
238	3.14	Valor óptimo	293	82.1	1031.70
239	10.46	Valor óptimo	294	72.2	907.29
240	3.18	Valor óptimo	295	104.8	1316.96
241	3.21	Valor óptimo	296	77.9	978.92
242	2.83	Valor óptimo	297	74.8	939.96
243	3.72	Valor óptimo	298	72.3	908.55
244	5.1	Valores óptimos	299	63.8	801.73
245	0.99		300	71.6	899.75
246	3.82	Valor óptimo	301	85.4	1073.17

Tabela 10: Valores das resistências medidas em cada torre (247 até 315) na linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

247	23.01		302	73	917.35
248	3.91	Valor óptimo	303	81.3	1021.65
249	5.41	Valor óptimo	304	68.3	858.28
250	5.49	Valor óptimo	305	54.6	686.12
251	3.53	Valor óptimo	306	62.5	785.40
252	8.67	Valor óptimo	308	58.1	730.11
			309	52.7	662.25
			310	66.2	831.89
			311	34.4	432.28
			312	5.46	Valores Óptimos
			313	3.08	
			314	2.8	
			315	2.1	

A seguir, os valores das resistências medidas em cada torre são representadas graficamente para melhor visualização e bem como a interpretação para o seu tratamento posteriormente.

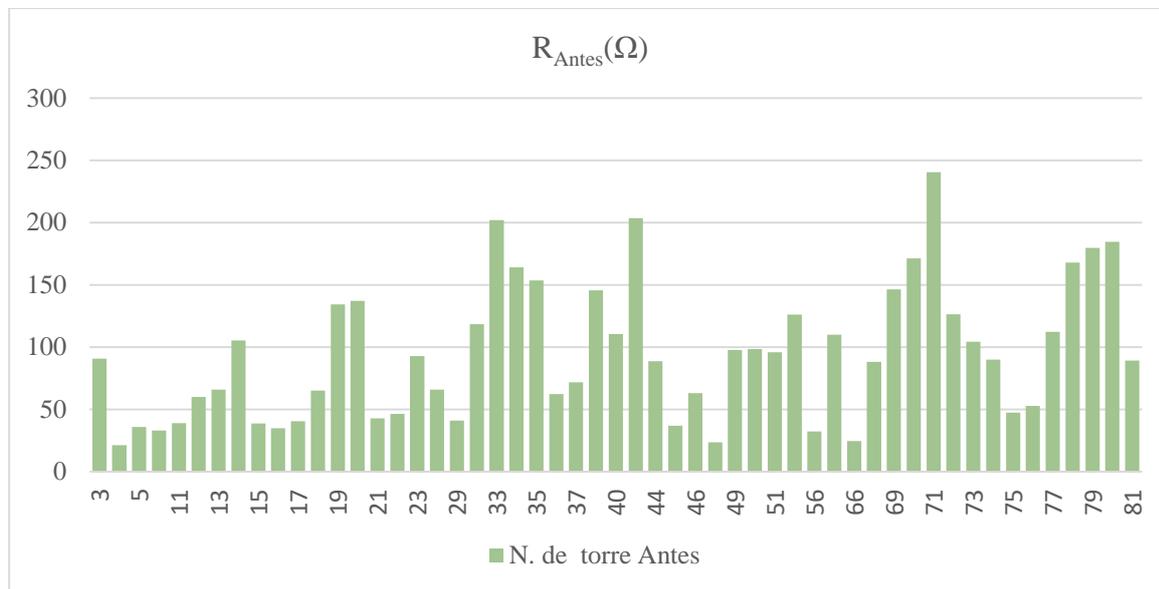


Figura 14: Medições das resistências entre a torre 3 até 81/ **Fonte:** Autor

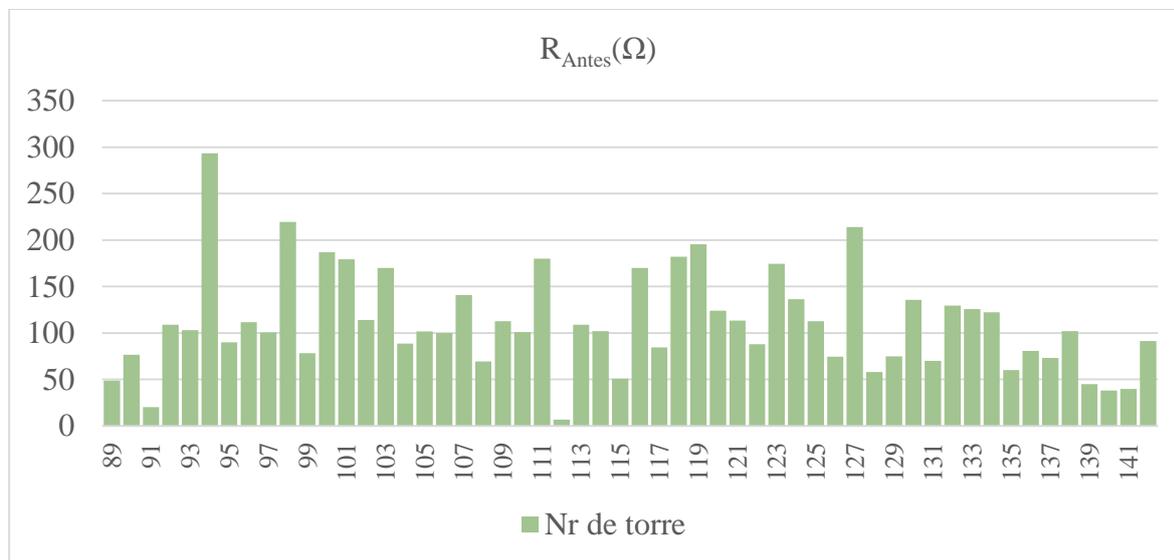


Figura 15: Medições das resistências entre a torre 89 até 142/ **Fonte:** Autor

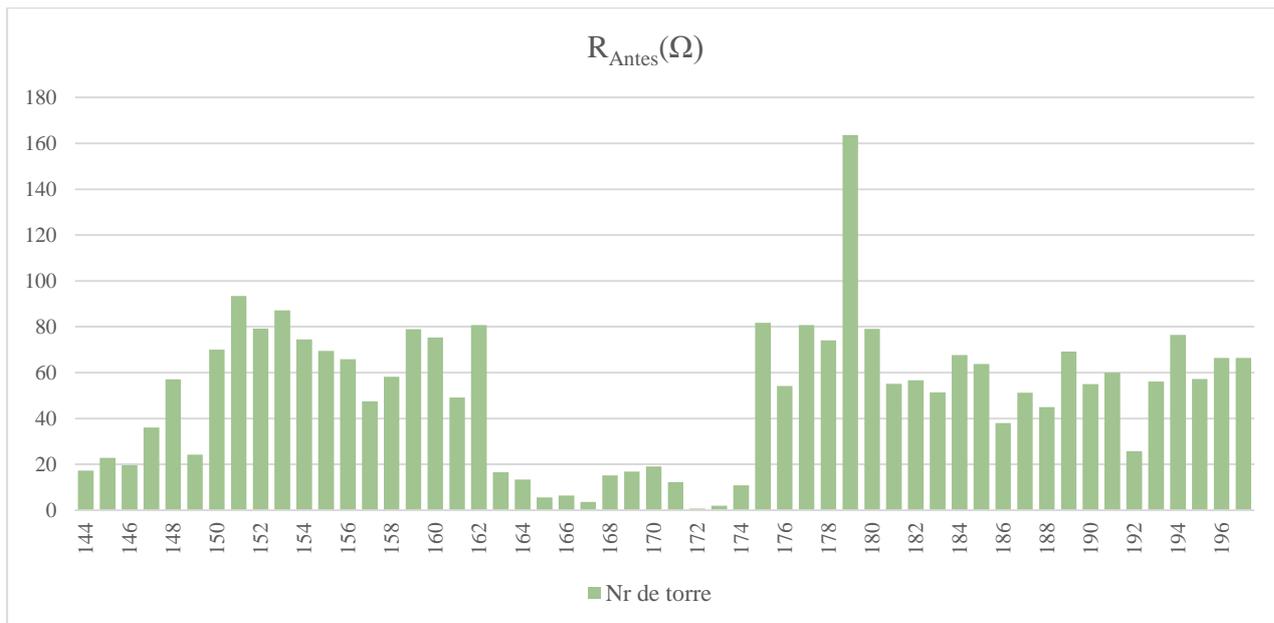


Figura 16: Medições das resistências entre a torre 144 até 196/ **Fonte:** Autor

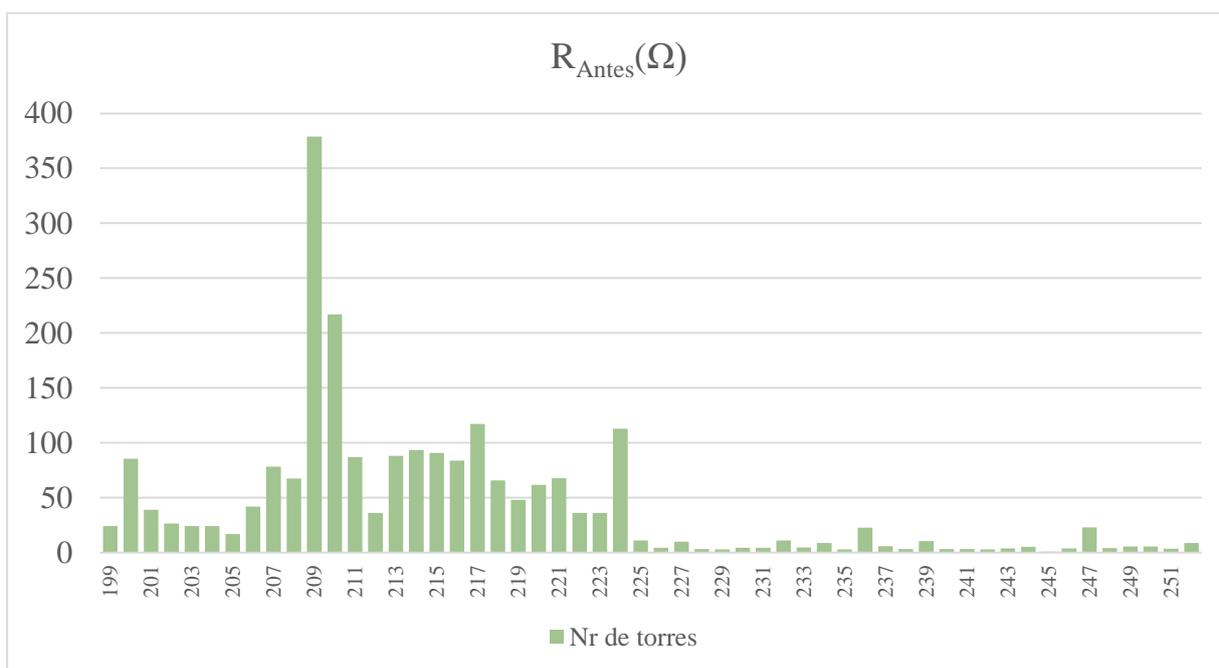


Figura 17: Medições das resistências entre a torre 199 até 251/ **Fonte:** Autor

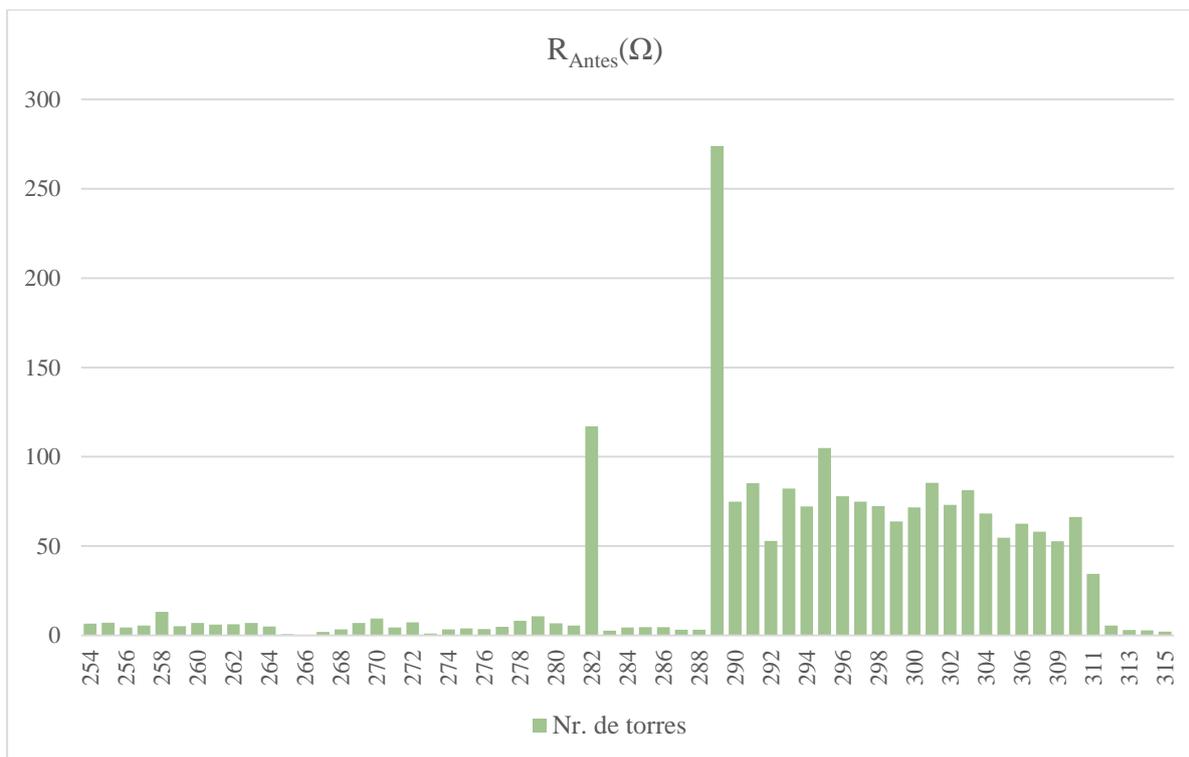


Figura 18: Medições das resistências entre a torre 254 até 315/ **Fonte:** Autor

3.2.3. Cálculo da Resistência de Aterramento

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

$$R = \frac{\rho_a}{\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L}{a'} \right) - 1 \right] \tag{3.1}$$

Onde:

a' = raio da seção recta do eletrodo

d = profundidade dos eletrodos

ρ = resistividade aparente (ρ_a)

L = comprimento do fio contrapeso em m

Tabela 11: Dados para cálculo da resistência (Fonte: Autor)

Tipo (Copperweld)	Fio de aço cobreado
Secção	4AWG- 28.75mm ²
Diâmetro total (d)	5.19 mm
Raio(r)	2.59mm
Profundidade de instalação (P)	0.4m
Distância entre cabos contrapeso (a ₁₂)	38m
a'	Calculado de acordo com a configuração adotada

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:

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times p \times r} \times \sqrt{a_{12} \times \sqrt{4 \times p^2 + a_{12}^2}}} \tag{3.2}$$

Modelo Real:

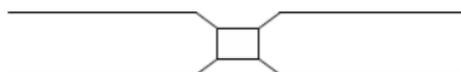


Figura 19: Modelo da malha de aterramento – 4 fios contrapeso (Fonte: Dos santos, 2013).

Modelo de Cálculo:

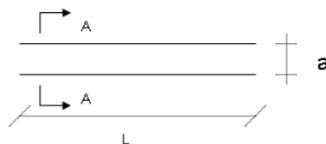


Figura 20: Fase L – Método de cálculo (Fonte: Dos santos, 2013)

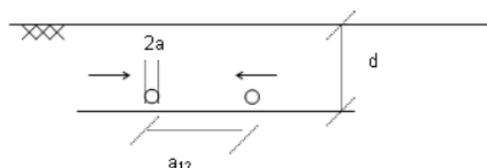


Figura 21 : Fio contrapeso – Vista perfil (Fonte: Dos santos, 2013)

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

3.2.3.1. 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 94, 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 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 electromagnéticas entre os condutores, portanto considera-se a fase 4 como o maior comprimento utilizado.

Tabela 12: Comprimento por fase (Fonte: Autor)

Fase	Comprimento (m)
1	16
2	40
3	80
4	150

3.2.3.2. Cálculo da resistência Torre 94: Configuração 4 fios contrapeso Cálculo da 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 elétrica.

Para o valor de resistência medido acima, considerando uma medição com espaçamento $a=2m$, a resistividade aparente será:

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R$$

$$\rho = 2 \times \pi \times 2 \times 293,5 = 3688,23 \Omega m$$

Cálculo do parâmetro a' : Sendo uma configuração de 4 contrapesos, este parâmetro será:

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times p \times r} \times \sqrt{a_{12} \times \sqrt{4 \times p^2 + a_{12}^2}}}$$

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times 0.4 \times 0.00259} \times \sqrt{38 \times \sqrt{4 \times (0.4)^2 + (38)^2}}}$$

$$a' = 1.31m$$

Com todos os parâmetros calculados é possível obter através da equação abaixo o valor da resistência na fase L=16m.

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

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 16} \left[\ln \left(\frac{2 \times 16}{1.31} \right) - 1 \right]$$

$$R = 161.02\Omega$$

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. Se a queda no valor final da resistência for suficiente, ou seja, aproximar do valor de referência, é então adotado esse valor no sistema de aterramento, caso contrário, utiliza-se outro método que será mostrado. Então para demonstração, é alterado o valor de a_{12} para 39m.

Assim:

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times 0.4 \times 0.00259} \times \sqrt{39 \times \sqrt{4 \times (0.4)^2 + (39)^2}}}$$

$$a' = 1.33$$

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

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 16} \left[\ln \left(\frac{2 \times 16}{1.33} \right) - 1 \right]$$

$$R = 159.94 \Omega$$

Com a alteração deste parâmetro não houve diminuição significativa no valor da resistência, mesmo porque o valor do parâmetro a' teve um aumento de 0,02. Assim

adopta-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 $L = 40m$, teremos:

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times p \times r} \times \sqrt{a_{12} \times \sqrt{4 \times p^2 + a_{12}^2}}}$$

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times 0.4 \times 0.00259} \times \sqrt{38 \times \sqrt{4 \times (0.4)^2 + (38)^2}}}$$

$$a' = 1.31m$$

Então:

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

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 40} \left[\ln \left(\frac{2 \times 40}{1.31} \right) - 1 \right]$$

$$R = 91.33\Omega$$

Ainda não conseguiu-se chegar ao valor de referência, mas é notório que utilizando este método do aumento de fase (L), houve uma queda de 69,7 Ω na resistência. Como o objectivo ainda não foi alcançado, será utilizada a fase 3, onde $L = 80m$.

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times p \times r} \times \sqrt{a_{12} \times \sqrt{4 \times p^2 + a_{12}^2}}}$$

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times 0.4 \times 0.00259} \times \sqrt{38 \times \sqrt{4 \times (0.4)^2 + (38)^2}}}$$

$$a' = 1.31m$$

Então:

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

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 80} \left[\ln \left(\frac{2 \times 80}{1.31} \right) - 1 \right]$$

$$R = 55.84\Omega$$

É feito o aumento do comprimento até conseguir o valor de referência de 20Ω , neste caso mesmo utilizando fase ($L = 80\text{m}$) ainda não foi obtido esse valor. Então considerando $L=150\text{m}$, teremos:

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times p \times r} \times \sqrt{a_{12} \times \sqrt{4 \times p^2 + a_{12}^2}}}$$

$$a' = \sqrt{\sqrt{2 \times 0.4 \times 0.00259} \times \sqrt{38 \times \sqrt{4 \times (0.4)^2 + (38)^2}}}$$

$$a' = 1.31\text{m}$$

Então:

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

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 150} \left[\ln \left(\frac{2 \times 150}{1.31} \right) - 1 \right]$$

$$R = 34.94\Omega$$

O valor da resistência pretendido para esta configuração, não foi alcançado, mas verificou-se que até a fase 4 houve uma diminuição significativa. Como para os valores de L , é considerado no máximo até 150m , pois, foi constatado em estudos, realizados, 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 com 6 fios contrapeso. Com

essa configuração a queda da resistência de pé de torre é muito grande. Os cálculos serão apresentados abaixo, ainda utilizando a estrutura Torre 94 para o estudo.

3.2.3.3. Cálculo da resistência Torre 94: Configuração 6 fios contrapeso

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.

$$a' = \sqrt[3]{\sqrt{2rp} \times \sqrt[3]{a_{12}\sqrt{4p^2 + a_{12}^2}} \times \sqrt[3]{a_{23}\sqrt{4p^2 + a_{23}^2}} \times \sqrt[3]{a_{13}\sqrt{4p^2 + a_{13}^2}}} \quad (3.3.)$$

Modelo Real:

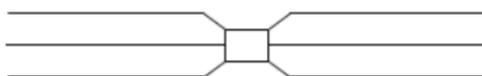


Figura 22: Modelo da malha de aterramento – 6 fios contrapeso (**Fonte:** Dos santos, 2013)

Modelo de cálculo:



Figura 23: Fase L – Método de cálculo (**Fonte:** Dos santos, 2013)

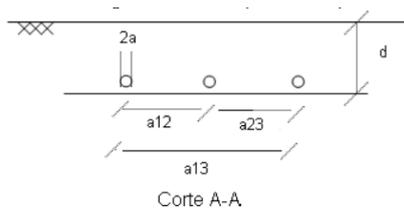


Figura 24: Fio contrapeso – Vista perfil (Fonte: Dos santos, 2013)

Dessa maneira conclui-se a modelagem de cálculo da resistência da malha de aterramento:

$$a' = \sqrt[3]{\sqrt{2rp} \times \sqrt[3]{a_{12}\sqrt{4p^2 + a_{12}^2}} \times \sqrt[3]{a_{23}\sqrt{4p^2 + a_{23}^2}} \times \sqrt[3]{a_{13}\sqrt{4p^2 + a_{13}^2}}}$$

a_{12} e a_{23} – Distância entre os fios contrapeso configuração utilizando 6 fios contrapeso, igual a 19m.

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

p – Profundidade de instalação dos fios contrapeso.

$$a' = \sqrt[3]{\sqrt{2 \times 0.00259 \times 0.4} \times \sqrt[3]{19\sqrt{4(0.4)^2 + (19)^2}} \times \sqrt[3]{19\sqrt{4(0.4)^2 + (19)^2}} \times \sqrt[3]{38\sqrt{4(0.4)^2 + (38)^2}}}$$

$$a' = 2.97m$$

Aproveitando os valores encontrados anteriormente, para a Fase 1: L=16m, teremos;

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

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 16} \left[\ln \left(\frac{2 \times 16}{2.97} \right) - 1 \right]$$

$$R = 101.02\Omega$$

Com o valor da resistência obtido, é constatado uma queda de 60Ω utilizando a mesma fase (L=16m) em relação ao contrapeso de 4 fios.

Dando continuidade aos cálculos, será apresentado para a próxima fase, considerando $L = 40\text{m}$.

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

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 40} \left[\ln \left(\frac{2 \times 40}{2.97} \right) - 1 \right]$$

$$R = 67.21 \Omega$$

Com o valor da resistência obtido, é constatado uma queda de 24.11Ω utilizando a mesma fase ($L=40\text{m}$).

Dando continuidade a sequência, será apresentado o cálculo para a fase 3 ($L=80\text{m}$)

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

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 80} \left[\ln \left(\frac{2 \times 80}{2.97} \right) - 1 \right]$$

$$R = 43,81 \Omega$$

Dando continuidade a sequência, será apresentado o cálculo para a fase 3 ($L=150\text{m}$) $R =$

$$\frac{\rho_a}{\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L}{a'} \right) - 1 \right]$$

$$R = \frac{3686.36}{\pi \times 150} \left[\ln \left(\frac{2 \times 150}{2.97} \right) - 1 \right]$$

$$R = 28,27 \Omega$$

Finalmente o valor da resistência a ser considerado nessa configuração foi conseguido, sendo que a aproximação do valor de referência na qual varia de 30Ω a 40Ω foi alcançado mas não foi obtido o valor desejável. Por este motivo foi importante calcular a resistência para todas as fases e com as diferentes configurações e será utilizado o método de tratamento químico do solo de modo a alcançar o valor desejável.

A seguir será apresentado a queda de resistência para todas as fases, da configuração usando 6 fios contrapeso e 4 fios contrapesos.

Tabela 13: valores de resistência e queda para as duas configurações (Fonte: Autor)

Fase	Valor da resistência com contrapeso de 4 fios(Ω)	Valor da resistência com contrapeso de 6 fios(Ω)	Queda(Ω)
L (16m)	161,02	91,33	60
L (40m)	91,33	67,21	24,12
L (80m)	55,84	43,81	12,03
L (150m)	34,94	28,27	6,67

Mediante a tabela acima, pode-se verificar que em todas as fases a configuração de 6 fios contrapesos apresenta uma menor resistência.

A tabela abaixo, demonstra os valores das resistências antes e os valores depois utilizando o método de fio de 4 contrapeso e fio de 6 contrapeso. Pode-se verificar que aplicando estes dois métodos, o valor da resistência na maior parte das torres é alcançado, pode-se também verificar na tabela abaixo que em algumas torres não foi alcançado o valor óptimo, daí a necessidade de utilizar outro método, na qual consiste no tratamento químico do solo.

Tabela 14: Tratamento dos dados das resistências lidas entre as torres 2 até 197 da linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

Nº Torre	R _{Antes} [Ω]	L [m]	R _{Depois} [Ω]	Nº Torre	R _{Antes} [Ω]	L [m]	R _{Depois} [Ω]	Nº Torre	R _{Antes} [Ω]	L [m]	R _{Depois} [Ω]
2	68.2	80.00	12.969	101	179.2	150	17.267	181	55.1	40	17.147
3	90.6	80.00	17.229	102	114	150	13.472	182	56.7	40	17.645
4	21.3	16.00	11.686	103	170.2	150	20.113	183	51.4	40	15.996
5	35.7	16.00	19.587	104	88.5	80	16.829	184	67.6	80	12.861
6	33	16.00	18.105	105	101.8	80	19.358	185	63.7	40	19.823
11	38.9	40.00	12.100	106	99.9	80	18.997	186	38	80	7.230
12	60	40.00	18.663	107	140.9	150	16.651	187	51.3	40	15.965
13	65.9	80.00	12.532	108	69.3	80	13.178	188	44.9	40	13.973
14	105.3	80.00	20.024	109	112.5	150	13.295	189	69.2	80	13.166
15	38.5	40.00	11.975	110	101	80	19.206	190	55	40	17.116
16	34.8	16.00	19.093	111	179.9	150	17.335	191	60	40	18.672
17	40.5	40.00	12.597	113	109	150	12.881	192	25.8	16	14.162
18	65	40.00	20.218	114	102	80	19.396	193	56.1	40	17.458
19	134.2	150.00	15.859	115	50.9	80	9.679	194	76.5	80	14.555
20	137	150.00	16.190	116	170	150	20.090	195	57.2	40	17.801
21	42.6	40.00	13.250	117	84.6	80	16.088	196	66.4	80	12.633
22	46.4	40.00	14.432	118	181.9	150	17.527	197	66.4	80	12.633
23	92.8	80.00	17.647	119	195.6	150	18.847	199	24.1	16	13.229
27	65.9	80.00	12.532	120	123.9	150	14.642	200	85.4	80	16.248
29	41	40.00	12.753	121	113.3	150	13.389	201	39	40	12.137
30	118.4	150.00	13.992	122	88	80	16.734	202	26.4	16	14.492
33	202	150.00	19.464	123	174.4	150	20.609	203	24.1	16	13.229
34	164	150.00	19.380	124	136.3	150	16.107	204	24.1	16	13.229
35	153.5	150.00	18.140	125	112.6	150	13.306	205	16.9	16	9.277

Tabela 15: Tratamento dos dados das resistências lidas entre as torres 36 até 295 da linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

36	62.3	40.00	19.378	126	74.4	80	14.148	206	41.8	40	13.008
37	71.6	80.00	13.616	127	214	150	20.620	207	78.1	80	14.859
38	145.46	150.00	17.190	128	58.1	40	18.072	208	67.4	80	12.823
40	110.4	150.00	13.046	129	75	80	14.262	209	379	150	36.538
42	203.4	150.00	19.599	130	135.8	150	16.048	210	217	150	20.920
44	88.6	80.00	16.848	131	69.9	80	13.292	211	87	80	16.552
45	36.8	40.00	11.446	132	129.5	150	15.303	212	35.9	16	19.706
46	63	80.00	11.980	133	125.7	150	14.854	213	88	80	16.743
48	23.6	16.00	12.948	134	122.3	150	14.453	214	93.3	80	17.751
49	97.6	150.00	11.534	135	60	40	18.663	215	90.7	80	17.256
50	98.4	80.00	18.712	136	80.7	80	15.346	216	83.8	80	15.944
51	95.8	80.00	18.217	137	73.3	80	13.939	217	117.3	150	13.869
53	126	150.00	14.890	138	102	80	19.396	218	65.7	80	12.500
56	32.3	16.00	17.721	139	45.1	40	14.028	219	48.1	40	14.969
59	109.8	150.00	12.975	140	38	80	7.226	220	61.6	40	19.170
66	24.6	16.00	13.497	141	40	40	12.442	221	67.8	40	21.099
68	88.1	80.00	16.753	142	91.4	80	17.381	222	36	16	19.761
69	146.3	150.00	17.289	145	22.8	16	12.516	223	35.9	16	19.706
70	171.3	150.00	20.243	146	19.6	16	10.759	224	112.8	80	21.461
71	240.4	150.00	23.164	147	36	16	19.761	289	274	150	32.396
72	126.2	150.00	14.914	148	57.1	40	17.770	290	74.9	80	14.250
73	104.2	80.00	19.815	149	24.2	16	13.284	291	85.3	80	16.229
74	89.9	80.00	17.095	150	70.1	80	13.337	292	52.9	40	16.462
75	47.4	40.00	14.743	151	93.4	80	17.770	293	82.1	80	15.620
76	52.7	40.00	16.392	152	79.2	80	15.068	294	72.2	80	13.737
77	112.2	150.00	13.259	153	87.2	80	16.590	295	104.8	80	19.939

Tabela 16: Tratamento dos dados das resistências lidas entre as torres 78 até 311 da linha de transmissão CL1 (Fonte: Autor)

78	167.9	150.00	19.841	154	74.5	80	14.174	296	77.9	80	14.821
79	179.6	150.00	17.306	155	69.5	80	13.223	297	74.8	80	14.231
80	184.4	150.00	17.768	156	65.8	40	20.477	298	72.3	80	13.756
81	89.1	80.00	16.943	157	47.5	40	14.782	299	63.8	80	12.138
89	48.6	40	15.117	158	58.2	40	18.112	300	71.6	80	13.622
90	76.7	80	14.585	159	79	80	15.030	301	85.4	80	16.248
91	20.4	16	11.192	160	75.3	80	14.326	302	73	80	13.889
92	109	80	20.728	161	49.1	40	15.280	303	81.3	80	15.468
93	103	80	19.587	162	80.8	80	15.373	304	68.3	80	12.995
94	293.5	150	28.281	163	16.49	16	9.052	305	54.6	40	16.992
95	90	80	17.114	175	81.7	80	15.544	306	62.5	40	19.450
96	111.5	150	13.176	176	54.1	40	16.836	308	58.1	40	18.081
97	100.8	80	19.168	177	80.7	80	15.354	309	52.7	40	16.400
98	219.5	150	21.150	178	74.1	80	14.098	310	66.2	80	12.595
99	78.4	80	14.909	179	163.6	150	19.343	311	34.4	16	18.883
100	186.7	150	17.990	180	79.1	80	15.049				

Legenda:

	Melhoramento da resistência com 4 fios contrapesos
	Melhoramento da resistência com 6 fios contrapesos
	Torres que devem ser melhoradas através do tratamento químico do solo

3.3. Tratamento químico do solo

Tomando como exemplo a torre 71, onde $\rho = 3019.424 \Omega \cdot m$, a faixa compreendida de K_t com base na resistividade é 0.18 à 0.29, a faixa compreendida da resistência de aterramento será.

$$R_{com\ tratamento} = K_t * R_{Sem\ tratamento}$$

$$0.18 \times 23.16 \leq R_{com\ tratamento} \leq 0.29 \times 23.16$$

$$4.170 \Omega \leq R_{com\ tratamento} \leq 6.718 \Omega$$

A tabela 11 mostra os cálculos a faixa da resistência com as torres correspondentes usando GEL como o produto para tratamento químico do solo.

Tabela 17: Faixa da resistência obtidas através do tratamento químico do solo (Fonte: Autor)

Nº Torre	R _{Antes} [Ω]	ρ [Ωm]	L [m]	R _{Depois} [Ω]	R _{Max} [Ω]	R _{Min} [Ω]
71	240.4	3019.424	150.00	23.16	6.718	4.170
94	293.5	3686.360	150.00	28.28	8.315	4.808
98	219.5	2756.920	150.00	21.15	6.345	6.218
209	379	4762.654	150.00	36.54	10.925	6.211
289	274	3443.186	150	32.40	9.719	5.507

Após o cálculo observou-se que das medições de resistência realizadas nas 277 torres de linha de transmissão SUL (CL1), empregando cabos de quatro (4) contrapeso com um comprimento máximo permitido de 150m e com 29% das torres que já estavam ótimas, 66% das torres terão resistência ótima com o uso desta técnica, 4% das torres estarão ótimas através do uso de seis (6) contrapesos e 2% através do tratamento químico do solo.

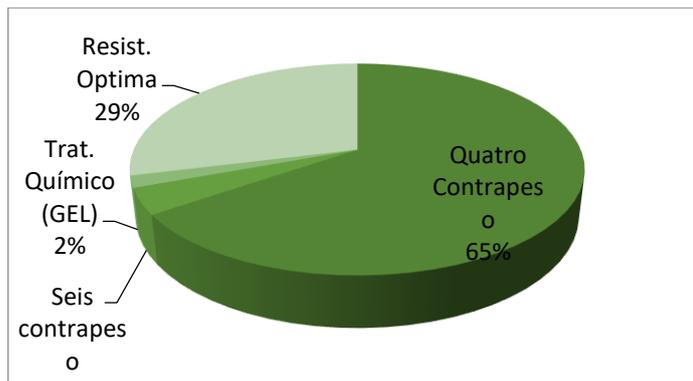


Figura 25: Representação percentual de número de torre do método/ **Fonte:** Autor

A figura mostra o comportamento do comprimento dos contrapesos em função da resistividade aparente do solo. Os locais cuja resistividade aparente é muito elevada, estas por sua vez necessitam de maior comprimento dos cabos de contrapeso e menor comprimento dos cabos contrapeso para locais com menor resistividade. Notou-se que mesmo com o aumento do comprimento e respeitando o limite máximo do comprimento, não foi satisfatório encontrar o valor óptimo da resistência em que necessitou da outra técnica para sua melhoria.

3.4. Ajuste da resistência de aterramento tendo em conta a temperatura

A resistividade do solo é afectada pela temperatura. A resistividade do solo tende a aumentar com a diminuição da humidade e da temperatura.

$$\rho_T = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Onde: ρ_T é a resistividade a uma temperatura T (em °C);

ρ_0 é a resistividade a uma temperatura de referência T_0 ;

α é o coeficiente de variação da resistividade com a temperatura;

T é a temperatura actual (em °C);

T_0 é a temperatura de referência (em °C).

Para o local onde se encontra a linha de transmissão CL1, temos uma temperatura de referência de 20 °C. Sendo que o material que utilizou-se para o melhoramento da malha na linha de transmissão é o cobre, o seu coeficiente de variação da resistividade com a temperatura é 0,0039 e uma temperatura actual de 30 °C, tem-se:

Para Torre 145:

$$\rho_{(30)} = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

$$\rho_{30} = 286,51 \times [1 + 0,0039 (30 - 20)]$$

$$\rho_{30} = 286,51 \times [1 + 0,0039 \times 10]$$

$$\rho_{30} = 286,51 \times [1 + 0,039]$$

$$\rho_{30} = 286,51 \times [1 + 0,039]$$

$$\rho_{30} = 286,51 \times [1,039]$$

$$\rho_{30} = 297,69 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}$$

Então, a resistência tendo em conta a temperatura para uma configuração de 4 fios contrapeso será:

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

$$R = \frac{297,69}{\pi \times 16} \left[\ln \left(\frac{2 \times 16}{1.31} \right) - 1 \right]$$

$$R = 12,96 \text{ }\Omega$$

A temperatura tem um impacto significativo na resistência de aterramento da linha de transmissão, que são:

- **Condutividade do Solo:** A resistência de aterramento é fortemente dependente da condutividade do solo ao redor da linha de transmissão. A temperatura pode afectar a humidade do solo, que, por sua vez, influencia sua condutividade. Em temperaturas mais altas, o solo pode secar, reduzindo sua condutividade e,

portanto, aumentando a resistência de aterramento. Em temperaturas mais baixas, o solo pode reter mais humidade, potencialmente reduzindo a resistência;

- **Corrosão e Oxidação:** As mudanças de temperatura podem afectar a taxa de corrosão e oxidação dos componentes do sistema de aterramento. Em temperaturas extremas, a corrosão pode acelerar, deteriorando a qualidade do aterramento e aumentando a resistência. A protecção adequada e a manutenção são essenciais para minimizar esse efeito;
- **Propriedades dos Eléctrodos:** A temperatura também pode influenciar as propriedades dos eléctrodos de aterramento, como sua resistência eléctrica. Alterações na temperatura podem afectar a eficácia dos eléctrodos ao longo do tempo.

3.5. Benefícios esperados do ponto de vista técnico na melhoria da malha de aterramento na linha de transmissão CL1

Do ponto de vista técnico, melhorar a malha de aterramento na linha de transmissão CL1 pode trazer benefícios tais como:

1. **Aumento da Segurança Operacional:** Com a malha de aterramento da linha de transmissão CL1 adequada, a segurança operacional é melhorada, pois o sistema é mais eficiente na detecção e no descarregamento de falhas de corrente para a terra, minimizando riscos de falhas eléctricas;
2. **Melhoria da Estabilidade do Sistema:** O aterramento eficiente na CL1 contribui para a estabilidade geral do sistema de transmissão ao assegurar que a corrente de falta seja rapidamente direccionada para a terra, facilitando a operação dos dispositivos de protecção e reduzindo a probabilidade de desarmamento inadequado dos disjuntores;
3. **Redução de Risco de Choque Eléctrico:** O sistema de aterramento desta linha reduz a possibilidade de choques eléctricos para trabalhadores e pessoal. Isso é fundamental em áreas onde a linha de transmissão passa por zonas habitadas ou acessíveis;
4. **Protecção de Equipamentos:** Com um bom aterramento nesta linha, vai ajudar a proteger os equipamentos de transmissão contra sobrecargas e descargas

eléctricas, como relâmpagos e sobretensões transitórias. Isso prolonga a vida útil dos equipamentos e reduz a necessidade de manutenção.

3.6. Benefícios esperados no ponto de vista económico na melhoria da malha de aterramento na linha de transmissão CL1

1. **Redução de Custos com Manutenção e Reparo:** Este sistema de aterramento reduz a incidência de falhas e danos em equipamentos e componentes. Isso leva a menores custos de manutenção e reparo, já que menos intervenções serão necessárias e a vida útil dos equipamentos é prolongada;
2. **Aumento da Vida Útil dos Equipamentos:** Equipamentos de transmissão e protecção que operam no sistema de aterramento desta linha, tendem a ter uma vida útil mais longa, resultando em economias significativas em substituições e investimentos em novos equipamentos;
3. **Melhoria da Confiabilidade do Serviço:** A redução de falhas e interrupções contribui para uma operação mais confiável, o que pode se traduzir em uma melhor reputação e, potencialmente, em um aumento na receita devido à satisfação do cliente e à capacidade de atender a uma demanda mais estável.
4. **Minimização de Custos com interrupções:** Melhorias no aterramento desta linha, ajudam a reduzir a frequência e a duração das interrupções operacionais, que podem ser dispendiosas tanto em termos de perda de receita quanto de custos associados ao restabelecimento do serviço.

CAPÍTULO IV: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

4.1. Custos de aquisição de material

Tabela 18: Custo de aquisição de material (Fonte: Autor)

Item	Produto	Qtd	Preço	
			Unitário	Total
1	Contrapeso (16m)	84	3.216,39	270.176,76
2	Contrapeso (40m)	164	8.040,97	1.318.719,08
3	Contrapeso (80m)	256	16.081,53	4.116.871,68
4	Contrapeso (150m)	188	30.153,22	5.668.805,36
5	Grampos de eléctrodo	880	4.496,22	3.956.673,60
6	Ligadores Paralelos	600	60	32.000,00
7	Liga de alumínio	800	60,57	48.456,00
8	Gel para tratamento do solo	72Kg	926,1(12Kg)	5.556,6
9	Total			15.411.702,48MZN

4.2. Custo de aquisição de Ferramentas

Tabela 19: Custo de aquisição de Ferramenta (Fonte: Autor)

Item	Produto	Qtd	Preço	
			Unitário,	Total
1	Motossera	3	28.808,00	83.424,00
2	Catana	20	150,00	3.000,00
3	Pás	25	395,00	9.875,00
4	Mala de ferramenta	10	10.000,00	100.000,00
5	Total			4.515.305,60MZN

4.3. Custo de Mão-de-obra

Tabela 20: Custo de Mão-de-obra (Fonte: Autor)

Mão-de Obra					
Item	Especificações	Qtd	Horas	Salário/Hora	Total
1	Engenheiro	2	1920	288,56	1.108.070,40
2	Técnico	9	1920	112,5	1.994.000,00
3	Auxiliares	26	1920	28,31	1.413.235,20

4	Total	4.515.305,60MZN
----------	--------------	------------------------

4.4. Custo de Transporte

Tabela 15: Custo de Transporte (Fonte: Autor)

Transporte					
Item	Especificações	Qtd	Horas	Salário/Hora	
1	Camião Grua	2	24	3.950,00	189.600,00
2	Camião	1	160	3.200,00	512.000,00
3	Total:				701.600,00MZN

Para melhor visualização, o gráfico a seguir mostra de forma lacónica os custos acima calculados dos materiais e bem como transporte.

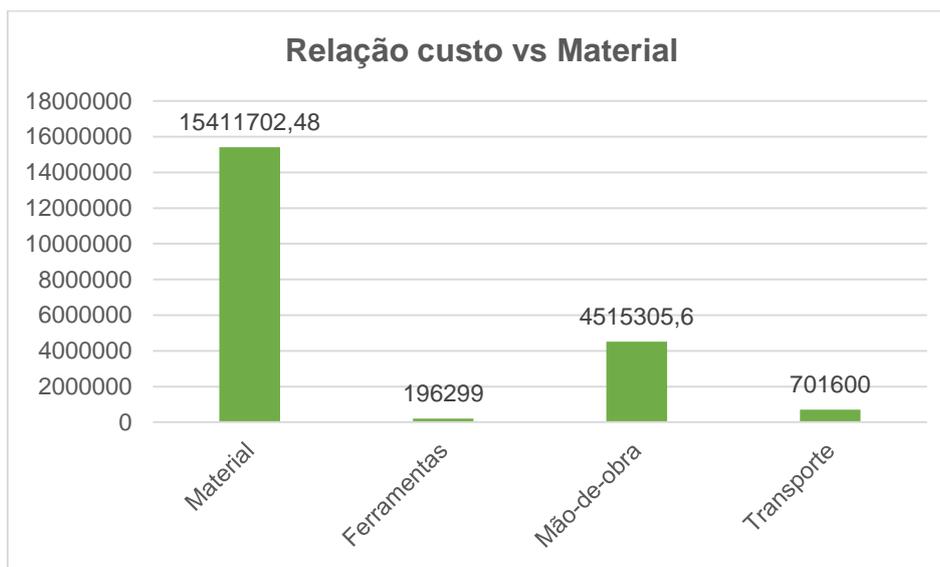


Figura 26: : Custos totais de aquisição dos materiais(Fonte: Autor)

A estimativa do custo do presente trabalho foi elaborado em função da aquisição do material e sua instalação. O custo apresentado no projecto não inclui o valor de IVA na aquisição de todos materiais envolvido, sendo que o total é **20824907.08 MZN**.

CAPÍTULO V: CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusão

A redução da resistência nas malhas de aterramento das estruturas de suporte das linhas de transmissão constitui um a importante técnica para melhoria do seu desempenho quando submetidas a eventos impulsivos. Das 315 torres que a linha possui, apenas foi possível medir 277 torres devido a dificuldade de acesso, das quais 63 torres apresentam valores óptimos, ou seja, valor de resistência abaixo de 20Ω e 214 torres estavam com valores de resistência acima do valor desejados.

Neste trabalho foi dada a proposta de algumas técnicas através dos cálculos para melhorias na malha de aterramento da linha de transmissão CL1. Foram medidas 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 factores que mais refletem nessa queda. Em relação à alternância da configuração, é possível uma queda de até 65% na utilização de 4 cabos de fio contrapeso e 4% na utilização de 6 cabos de fio contrapesos, dessa maneira, é comprovado a utilização apenas até a fase 4 onde $L = 150m$, pois, a partir deste comprimento a queda da resistência de pé de torre é insignificante.

Mas também optou-se pelo tratamento químico utilizando Gel e constatou-se que 2% das torres que não foi possível alcançar pelos métodos acima citados, foram obtidos os valores de resistência desejável.

5.2. Recomendações

- a) Antes da execução do projeto de aterramento, recomenda-se fazer um estudo afim de apurar a viabilidade do projecto bem como evitar o gasto do material de execução;
- b) Implementar uma ferramenta computacional capaz de simular o desempenho frente a descargas e identificar torres com problemas de aterramento ou resistividade do solo, a partir de informações levantadas. Deve-se salientar que a obtenção dessas informações em campo apresentam uma série de dificuldade inerentes a natureza do sistema.

CAPÍTULO VI: REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1]. KINDERMANN, G; CAMPAGNOLO, J. M.; Aterramento Elétrico. 3ª edição. Editora Sagra, DC Luzzatto, Porto Alegre, 1995.
- [2]. MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [3]. D'AJUZ, A., FONSECA, C.S., CARVALHO, F.M.S., FILHO, J.A., DIAS, L.E.N., PEREIRA, P.M., ESMERALDO, P.C.V., VAISMAN, R., FRONTIN, S.O. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento. Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão, FURNAS, Niterói, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF, Rio de Janeiro, 1987.
- [4]. VISACRO, Silvério; "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia", livro, Artiliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005
- [5]. SPOZITO JUNIOR, José Saverio, Sistema de aterramento com cabo contrapeso representado por linhas de transmissão implementado em matlab com circuitos em cascata de Pi- Tese de doutoramento. 2012.
- [6]. MODENA, J. SUETA, H. Procedimentos para Medição da Resistividade do Solo. Revista O Setor Elétrico. 2013. Disponível em: Acesso em 30 abr. 2019.
- [7]. SILVA, R. J, JUNIOR A. M. O, Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas e aterramento. 2004. 103p. Projeto Final apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2004.
- [8]. SANTOS, R. B. Apostila de Transmissão de Energia Elétrica 1. Recife- PE. 2002. SAMITRI S/A. Linha de transmissão 69kV, Morro agudo, Rio Piracicaba, Minas Gerais, 1994.

ANEXOS

Anexo A1: Especificações técnicas do cabo 4AWG- 28.75mm² (Fonte: FICHA TÉCNICA- INTELLI)



Características

Seção Nominal (mm²)	25
Seção Efetiva (mm²)	23,30
Características do Condutor	
Qtd. De Fios	7
Diâmetro dos Fios (mm)	2,06
Diâmetro do Cabo (mm)	6,18
Seção (AWG/MCM)	4
Parâmetros Físicos	
Área do Cobre (%)	14
Área do Aço (%)	86
Massa Específica (g/cm ³)	7,96
Características Mecânicas	
Peso Nominal (kg/km)	189,00
Módulo de Elasticidade (GPa)	190
Coef. de Dilatação Linear (1/°C)	1,77 E-05
Carga de Ruptura - LCA (daN)	683
Características Elétricas	
Coef. de Variação de Resistência (1/°C)	0,00378
Reatância Indutiva - 60Hz (ohms/km)	-
Reatância Capacitiva - 60Hz (ohms/km)	-
Capacidade de Corrente em Regime Permanente - 75°C (A)	-
Capacidade de Corrente em CC - 50ms (A)	-
Capacidade de Corrente em CC - 100ms (A)	-
Capacidade de Corrente em CC - 0,5s (A)	-
Resistência Máxima à 20°C em CC (ohms/km)	3,519

Figura A1-1: Especificações técnicas do cabo 4AWG- 28.75mm² (Fonte: FICHA TÉCNICA- INTELLI)

Anexo A2: Especificações técnicas do grampo de eléctrodo (FONTE: Solução)



Figura A2. 1-2: grampo de eléctrodo (FONTE: Solução)

ITEM	QUANT	UNID.	REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO	PESO KG
1	1	PÇ	-	Bastão de fibra 33 mm x 1,07 m de comprimento	2,6
-	1	PÇ	SE4474-5	Grampo de fixação pro torção com parafuso "T"	
-	-	m	SE25	Cabo de cobre extra flexível, secção nominal 25 mm ² com isolamento PVC transtarente	

Rua São Dimas, 12 | Industrial | CEP: 32230-165
 Contagem / MG | PABX: 55 31 3333.1412
www.sesolucao.com.br

Figura A2. 2-2: Especificações técnicas grampo de eléctrodo (FONTE: Solução)

Anexo A3: Especificações técnicas do GEL para aterramento (Fonte: TEL-Termotécnica)



PRODUTO	CÓDIGO	PESO
Gel Químico para Aterramento Saco 12KG	TEL-5812	12,0 kg

DESCRIPTIVO TÉCNICO

Produto não tóxico e não agressivo ao meio ambiente, de acordo com ensaios realizados em laboratórios especializados.

Apresenta pH neutro, o que evita a corrosão dos elementos.

Densidade: 0,000925 g/mm³ (seco).

Poder de inchamento proporcionando um maior e melhor contato entre haste/condutor a terra.

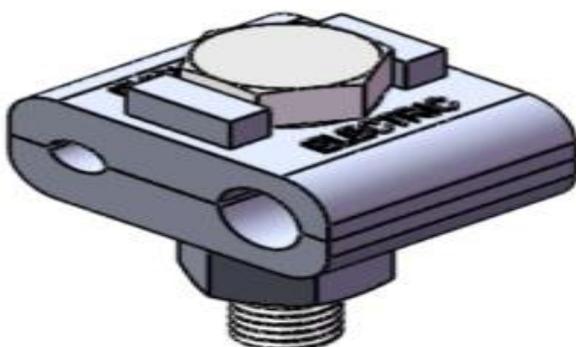
Baixa resistência e alta condutividade, podendo baixar a resistência do aterramento em até 75%.

Não é lixiviável, ou seja, não se dispersa na época de chuvas.

Figura A3-3: Especificações técnicas do GEL para aterramento (Fonte: TEL- Termotécnica)

Anexo A4: Especificações técnicas dos conectores de aterramento

(Fonte: Farukawa ELECTRIC)



Conector de Aterramento OPDC x Aterramento

Figura A4-4: conectores de aterramento (Fonte: Farukawa ELECTRIC)

Tabela A4-4 Especificações técnicas dos conectores de aterramento (Fonte: Farukawa ELECTRIC)

Conector Paralelo OPDC x OPDC:		
Diâmetro de aplicação OPDC / OPDC [mm / mm]	Material do corpo e tampa	Esforços mecânicos admissíveis [kgf]
8,6 / 8,6	Liga de alumínio	90
10,8 / 10,8	Liga de alumínio	90
10,2 / 10,2	Liga de alumínio	90
Conector de Aterramento OPDC x Cabo de Aterramento (Cobre):		
Diâmetro de aplicação OPDC / Aterramento [mm/mm]	Material do corpo e tampa	Esforços mecânicos admissíveis [kgf]
10,8 / 5,1	Liga de cobre estanhado	90
10,2 / 5,1	Liga de cobre estanhado	90
8,6 / 5,1	Liga de cobre estanhado	90