



METODOLOGIA DE ATERRAMENTO EM LINHA DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE ALTERNADA 550 kV NA AMAZÔNIA – UM ESTUDO DE CASO

Franklin Barbosa de Carvalho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Manoel Henrique Reis Nascimento

Belém

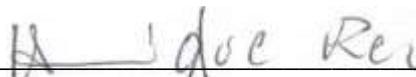
Junho de 2021

**METODOLOGIA DE ATERRAMENTO EM LINHA DE TRANSMISSÃO EM
CORRENTE ALTERNADA 550 kV NA AMAZÔNIA – UM ESTUDO DE CASO**

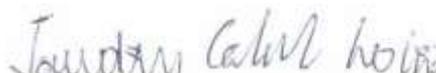
Franklin Barbosa de Carvalho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

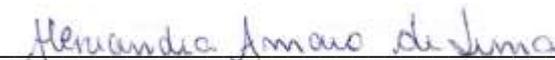
Examinada por:



Prof. Manoel Henrique Reis Nascimento, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Orientador)



Prof. Jandecy Cabral Leite, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



Prof.^a. Alexandra Amaro de Lima, Dra.
(UNIP-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

JUNHO DE 2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Carvalho, Franklin Barbosa 1986-
Metodologia de aterramento em linha de transmissão em
corrente alternada 550 KV na Amazônia - Um estudo de caso /
Franklin Barbosa Carvalho - 2021.

Orientador: Manoel Henrique Reis Nascimento

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal
do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Processos, 2021.

1. Descargas atmosféricas 2. Aterramento 3. Linha de
Transmissão, desligamentos I. Título

CDD 620.

*Dedico este trabalho a minha família,
pais e professores.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador pelo acompanhamento durante as pesquisas e pela assistência na elaboração desta dissertação.

Aos professores e colegas do PPGEP e o acolhimento da equipe do ITEGAM.

A Manaus Transmissora de Energia S.A, por fornecer a oportunidade de realizar este trabalho em suas instalações.

A Omega Brasil Operação e Manutenção S.A, pelo apoio na estrutura para realizar atividades práticas deste trabalho.

Agradeço a equipe de manutenção de linhas de transmissão em nome de Carlito Meneses de Araújo pelo suporte fornecido durante a execução das pesquisas de campo.

A minha esposa Maura Carvalho e o meu filho Franklin Filho que abdicaram de momentos em família em prol da realização do meu sonho.

A os meus pais Francisco Carvalho e Rita Carvalho pelas palavras de incentivo.

A meus irmãos Francisco Júnior de Carvalho e Rita Gláucia Vasconcelos pelo carinho e apoio.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

METODOLOGIA DE ATERRAMENTO EM LINHA DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE ALTERNADA 550 kV NA AMAZÔNIA – UM ESTUDO DE CASO

Franklin Barbosa de Carvalho

Junho/2021

Orientador: Manoel Henrique Reis Nascimento

Área de Concentração: Engenharia de Processos

As descargas atmosféricas são de grande importância para o setor elétrico, sendo frequentemente responsáveis por desligamentos de linhas de transmissão, as quais podem desencadear uma sequência de eventos que levem o sistema elétrico interligado ao colapso. O objetivo deste trabalho é propor uma nova metodologia para correção das resistências de aterramento da linha de transmissão LT Oriximiná/Silves CD 550kV de energia elétrica na Amazônia prospectando reduzir as ocorrências de desligamento por descarga disruptiva de retorno, ou *backflashover* mitigando os danos causados ao sistema elétrico, considerando os fatores de custo de implementação, viabilidade técnica ambiental, abrangência da solução para demais estrutura da linha, percentual de redução da implementação, concluiu-se que a solução mais adequada para implementar uma solução mais robusta de aterramento nas torres da linha de transmissão é a solução 03 testada na torre 585 com redução de 66,98%.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

**GROUNDING METHODOLOGY ON A 550 kV AC POWER TRANSMISSION
LINE IN THE AMAZON - A CASE STUDY**

Franklin Barbosa de Carvalho

June/2021

Advisor: Manoel Henrique Reis Nascimento

Research Area: Process Engineering

Lightning strikes are of great importance for the electricity sector, being frequently responsible for disconnections of transmission lines, which can trigger a sequence of events that lead to the interconnected electrical system to collapse. The objective of this work is to propose a new methodology to correct the grounding resistances of the LT Oriximiná / Silves CD 550kV electric power transmission line in the Amazon aiming to reduce the occurrences of shutdown by disruptive return discharge, or backflashover, mitigating the damages caused to the system. electrical, considering the implementation cost factors, environmental technical feasibility, abruptness of the solution for other line structures, percentage of implementation reduction, it was concluded that the most adequate solution to implement a more robust grounding solution in the towers of the line transmission is the 03 solution tested on the 585 tower with a 66.98% reduction.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	4
1.2 - OBJETIVOS.....	4
1.2.1 - Objetivo geral.....	4
1.2.2 - Objetivos específicos.....	5
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	5
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 - LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	7
2.2 - ATERRAMENTO ELÉTRICO DE LINHA DE TRANSMISSÃO.....	8
2.3 - DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	10
2.4 - ESTUDO DO SOLO.....	11
2.5 - DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	12
2.6 - DESEMPENHO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	14
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3.1 - MATERIAIS.....	16
3.2 - METODOLOGIA.....	16
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1 - PRINCIPAIS CAUSAS DOS DESLIGAMENTOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE AS IMPEDÂNCIAS DE ATERRAMENTO DO SOLO NA AMAZÔNIA.....	20
4.1.1 - Análise da resistividade do solo da linha Oriximiná-Silves CD.....	20
4.1.2 - Qualidade do aterramento das torres da linha de transmissão LT Oriximiná/Silves CD 550kV.....	23
4.1.3 - Implementar solução mais adequada visando o custo-benefício para correção de distorções encontradas nas medições.....	31
4.1.4 - Implementação de solução 01 torre 565.....	34
4.1.5 - Implementação de solução 02 torre 549.....	34
4.1.6 - Implementação de solução 03 torre 585.....	35

4.1.7 - Execução dos trabalhos em campo.....	36
4.2 - IMPLEMENTAR SOLUÇÃO MAIS ADEQUADA VISANDO O CUSTO- BENEFÍCIO PARA CORREÇÃO DE DISTORÇÕES ENCONTRADAS NAS MEDIÇÕES.....	39
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama unifilar do objeto de estudo da concessionária Manaus transmissora de energia S.A.....	7
Figura 2.2	Configuração das torres concessionária Manaus transmissora de energia S.A.....	8
Figura 2.3	Exemplo de impedância de impulso de aterramento configuração de medição o arranjo para medição de resistência de pé de torre em alta.....	9
Figura 2.4	Etapas de formação de uma descarga NS típica, desde a distribuição de cargas elétricas dentro da nuvem até a descarga de retorno.....	11
Figura 2.5	Danos por descargas atmosféricas na LT Oriximiná – Silves CD.	13
Figura 2.6	Estratificação dos desligamentos forçados no Brasil no ano de 2018 e evidência a relevância deste tema para o setor elétrico.....	14
Figura 2.7	Desligamentos forçados LT Oriximiná – Silves CD no período de 2014 a 2019.....	15
Figura 3.1	Detalhadamente a metodologia a ser implementada.....	17
Figura 4.1	Método utilizado para medição de resistividade do solo.....	21
Figura 4.2	Resistividade da linha Oriximiná – Silves CD.....	22
Figura 4.3	Arranjo de aterramento fase V torre auto portante LT Oriximiná – Silves.CD.....	26
Figura 4.4	Arranjo de aterramento fase V torre estaiada LT Oriximiná – Silves CD.....	27
Figura 4.5	Comprimento dos cabos de aterramento (contra peso) instalados e projetado LT Oriximiná – Silves CD.....	28
Figura 4.6	Classificação por Tipo de Aterramento - LT Oriximiná – Silves CD.....	30
Figura 4.7	Localização das torres da amostra da LT Oriximiná – Silves CD..	31
Figura 4.8	Comprimento dos cabos de aterramento real e o especificados no projeto da - LT Oriximiná – Silves CD.....	32
Figura 4.9	Projeto da solução 01 para torres estaiadas.....	34
Figura 4.10	Projeto da solução 02 para torres estaiadas.....	35

Figura 4.11	Projeto da solução 03 para torres estaiadas.....	35
Figura 4.12	Limpeza na área da torre de transmissão.....	36
Figura 4.13	Realização de ensaios de medição de resistência.....	37
Figura 4.14	Abertura das valas para implementação de cabos de aterramento.	37
Figura 4.15	Instalação de cabos e hastes de aterramento, terra gel.....	38
Figura 4.16	Fechamento das valas e compactação.....	38
Figura 4.17	Protocolo de medição de resistência de aterramento.....	39
Figura 4.18	Desempenho da implementação dos projetos de aterramento.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Medição de resistividade de pé de torre: LT 500 kV CD Oriximiná – Silves.....	19
Tabela 4.1	Medição de Resistividade de solo trecho: LT 500 kV CD Oriximiná – Silves 19/03/2011. Dados de medições copilados....	22
Tabela 4.2	Valores entrada programa FLASH.....	24
Tabela 4.3	Diretrizes de projeto de aterramento LT Oriximiná – Silves CD..	25
Tabela 4.4	Lista de material de aterramento LT Oriximiná – Silves CD.....	27
Tabela 4.5	Comprimento dos cabos de aterramento (contra peso).....	29
Tabela 4.6	Arranjo de aterramento das torres em estudo. LT Oriximiná – Silves CD.....	32
Tabela 4.7	Lista de material utilizado para implementar metodologia nas torres da amostra.....	33
Tabela 4.8	Tabela de análise de custo e viabilidade de implantação.....	40

NOMENCLATURA

ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
CA	CORRENTE ALTERNADA
CD	CIRCUITO DUPLO
C1	CIRCUITO 01
C2	CIRCUITO 02
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
INPE	INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
kHz	QUILO HERTZ
kV	QUILO VOLTS
LT	LINHA DE TRANSMISSÃO
ONS	OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA
PB	PAGAMENTO BASE
PIB	PRODUTO INTERNO BRUTO
PV	PARCELA VARÁVEL
SE	SUBESTAÇÃO
SIN	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL
SIPER	SISTEMA INTEGRADO DE PERTURBAÇÕES
ρ	RESISTIVIDADE
Ω	SIMBOLO (SI) DE RESISTÊNCIA EM OHM

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Descargas atmosféricas são fenômenos eletromagnéticos que ocorrem em grandes proporções, apresentando um comportamento absolutamente aleatório e imprevisível. Já dizia WARMI e MICHISHITA (2016), o Brasil é um dos países com as maiores incidências de raios no mundo, chegando a 100 milhões por ano.

As Tormentas têm a importância significativa no setor elétrico, sua colaboração são responsáveis por desligamentos de linhas de transmissão, que desencadeiam uma sequência de eventos que levam o sistema elétrico interligado ao colapso. As longas extensões de linhas de transmissão determinam uma probabilidade significativa de incidência direta de descargas atmosféricas (CASCARDO CARDOSO, 2017).

Diferentes mecanismos podem ser responsáveis por desligamentos intempestivos dos circuitos de transmissão de energia elétrica como : incidências nos condutores de fase, devido a falha de blindagem ou falta de fios de blindagem no qual poderá levar ao *flashover*, ocasionados nos isoladores e cabos para proteger os fios na faixa média em linhas com vãos muito longos podem causar a ocorrência de arcos elétricos no ar entre os fios da blindagem e condutores de fase. Descargas nas torres (ou para proteger os fios próximos à torre) podem gerar altas sobretensões nas cordas do isolador, levando eventualmente à ocorrência de *backflashover* (OLIVEIRA; VISACRO; GUIMARÃES, 2018).

Os desligamentos em linhas de transmissão por curtos-circuitos devem ser eliminados de forma rápida, assim podendo evitar danos elevados aos equipamentos que integram a rede elétrica. As ocorrências em linhas de transmissão representam 89% dos curtos-circuitos no setor elétrico, seguido de 6% na geração e 5% em subestações.

Os índices de ocorrência podem ser explicados em função das características das linhas de transmissão percorrer o país por diversos lugares, com terrenos e climas distintos, além dos elementos de construção, isto é, as ferragens, cabos e estruturas diminuem consideravelmente a confiabilidade (KINDERMAN, 2010).

Além dos transtornos causados pelo corte do fornecimento de energia, os elevados número de desligamentos intempestivos das linhas de transmissão, são causadores de prejuízos financeiros as concessionárias, sendo penalizadas no pagamento de multa por indisponibilidade PV (Parcela Variável), estas situações intempestivas podem chegar ao

fator K150 que se refere a 150 vezes o valor recebido pela mesma função de transmissão em regime normal, sendo os valores descontados no PB (Pagamento Base) recebido pelas concessionárias mensalmente após apuração das ocorrências pelo Operador Nacional do Sistema ONS (AQUINO, 2010).

Segundo PAULINO (2009), os desligamentos em linhas de transmissão por descargas atmosféricas no Brasil representam 65%, problema a ser encarado, pois a cada dia aumenta-se a confiabilidade exigida do sistema elétrico. No Relatório de Análise de Desligamentos Forçados da ANEEL edição 2018, cita que os desligamentos por descargas atmosféricas em linhas de transmissão como sendo a segunda maior causa de desligamentos do sistema interligado e rede básica. Neste cenário, reduzir a resistência do aterramento frente a impedância das torres de transmissão torna-se importante para melhorar o desempenho das linhas de transmissão no Brasil (CAETANO *et al.*, 2018).

Segundo WARMI e MICHISHITA (2016), investigaram na Indonésia desligamentos em linhas de transmissão de 150kV com alto índice de descargas atmosféricas, esta investigação apontou que existe correlação entre quantidade de desligamentos com os valores resistências de aterramentos das torres. Já VISACRO (2014) analisou comportamento transitório do sistema de aterramento sob um raio em linha de transmissão com relação a diferentes parâmetros, como a permissividade relativa do solo, a resistividade do solo e a condutividade e diâmetro do condutor, este citou que a redução da impedância de aterramento das torres de transmissão pode reduzir os backflashover em até 56%.

As possíveis causas de desligamentos segundo FENG e LU (2011), apontaram que para ocorre as causas de desligamentos de linhas de transmissão por descargas atmosféricas são: projeto; construção; condições de operações; manutenção e aspectos geológicos com complexidades de alta resistividade de solo, sendo que o desempenho da linha de transmissão sob descargas atmosféricas estão relacionadas com tensão de descarga do isolador, intensidade da descarga atmosférica e a impedância do sistema de aterramento.

Segundo o CHIHEB *et al.* (2019) analisou o comportamento da impedância de eletrodos de aterramento horizontais longos em função da frequência de vários valores de resistividade do solo. DEIN e YASSIN (2018), também narraram o assunto: que os desligamentos de linhas de transmissão dependem da impedância do eletrodo de aterramento e dos parâmetros elétricos do solo, frequência, pulso da corrente duração da falta.

No Brasil, ALIPIO *et al.*, (2016) apresentou arranjos de aterramento composto por eletrodos paralelos para melhorar resposta do aterramento de linha de transmissão sob descargas atmosféricas. Seguido CAETANO *et al.*, (2018), pesquisou no estado de Minas Gerais – BR, chegando a conclusão que a redução da resistividade do aterramento, ocorre através de condutores utilizados no aterramento de linha de transmissão. OLIVEIRA VISACRO; GUIMARÃES (2018) analisaram que alta frequência de 25kHz, ocorre a impedância de aterramento de torre de linha de transmissão utilizado com instrumento gerador. VASCONCELOS (2017), concluiu que aumentando do comprimento do cabo de aterramento, reduz a impedância de aterramento das torres e conseqüentemente atenua sobre as tensões nos isoladores.

Segundo o SANTOS (2016), que analisou os efeitos nocivos dos desligamentos de linhas de transmissão por descargas atmosféricas na Amazônia e FERREIRA (2014) apresentaram estudo densidade de raios e a ocorrência de flashover em linhas de transmissão de eletricidade na Amazônia.

DENTEL (2013) citou que as regiões Amazônicas sempre apresentam anomalias positivas de densidade de raios como as regiões de Belém e Manaus, bem como o estado do Tocantins que afetam significativamente as linhas de transmissão.

A perpetuação de estudo será a linha de transmissão de energia elétrica em corrente alternada com 332 km de comprimento denominada LT Oriximiná – Silves CD, que estava no Leilão 004/2008, contemplado através Contrato de Concessão n.º 010/2008, em Maio pela Aneel, pelo prazo de 30 anos, sendo concluído em 14 de março de 2013, no qual interligou o sistema isolado do Amazonas ao SIN (Sistema Interligado Nacional), ente de extrema importância para a indústria e ao população do Amazonas.

Em relação a função do elevado número de desligamentos, considerado a segunda causa de desligamentos em linhas de transmissão devido a especificidades da região amazônica, o trabalho em epigrafe tem a finalidade de desenvolver metodologia para correção das resistências de aterramento na linha de transmissão de energia elétrica na região Amazônia, prospectando reduzir as ocorrências de desligamento por descarga disruptiva de retorno, ou *backflashover* mitigando os danos causados ao sistema elétrico, assim, implantando melhorias a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

1.1 - MOTIVAÇÃO

O estado do Amazonas, com 1,6% do PIB brasileiro, tem no Polo Industrial de Manaus seu principal motor econômico, cuja concentração de sua atividade na capital do Amazonas coloca Manaus como o sexto PIB per capita entre as capitais do Brasil, perfazendo R\$ 51 bilhões de reais, segundo dados do IBGE de 2011.

A concentração de atividades no Polo Industrial de Manaus permitiu a preservação florestal de 98% da área territorial do estado, que na atualidade se constitui uma vantagem comparativa, pois o problema do aquecimento global colocou a Amazônia como uma região de prioridade no debate do desenvolvimento econômico mundial, onde sua preservação não se trata mais de uma questão particular ou localizada, mas de uma questão global (SYLVIO PEREIRA, 2014).

É elevada incidência de descargas atmosféricas no território brasileiro. Agregado ao fato de possuir um solo com características bem desfavoráveis, fator que tornam a incidência de raios sendo uma das causadoras da maioria dos curtos-circuitos e interrupções de serviço, não programadas das linhas de transmissão no Brasil (ARAÚJO, 2014). Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, através do seu grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) a região Amazônica possui a maior incidência de descargas atmosféricas do Brasil (INPE, 2011).

Os desligamentos por descargas atmosféricas é a segunda maior causadora de desligamento em linhas de transmissão de energia elétrica no Brasil, segundo o Relatório de Análise Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão de 2018 ANEEL (2018). Dados da concessionária Manaus Transmissora de Energia (SIPER-ONS), a segunda maior causa com desligamentos das linhas de transmissão tem como causa a incidência de descargas atmosféricas.

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo geral

Desenvolver uma nova metodologia para correção das resistências de aterramento da linha de transmissão de energia elétrica na Amazônia prospectando reduzir as ocorrências de desligamento por descarga disruptiva de retorno, ou *backflashover* mitigando os danos causados ao sistema elétrico.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Identificar as principais causas dos desligamentos da linha de transmissão frente as impedâncias de aterramento do solo na Amazônia;
- Avaliar a qualidade do aterramento de torres da linha de transmissão LT Oriximiná/Silves CD 550kV;
- Adaptar uma solução mais adequada visando o custo-benefício para correção de distorções encontradas nas medições;
- Classificar os resultados das medições de resistência de aterramento das estruturas que foram corrigidas.

1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Na região Amazônica será estabelecido diretrizes para mitigar as ocorrências para evitar os desligamentos intempestivos das linhas de transmissão, através da busca da determinação das causas dos desligamentos das linhas de transmissão de energia no qual transmitem grandes blocos de carga elétrica, pelo suporte das equipes de engenharia e operação das concessionárias de energia elétrica.

Com a redução dos cortes de fornecimento de energia elétrica em grande escala (Apagões), refletirá o aumentando a satisfação dos clientes e a confiabilidade para o processo produtivo do polo industrial de Manaus.

Contribuir com redução de prejuízos financeiros das concessionárias em função do pagamento de multa por indisponibilidade PV (Parcela Variável), visando a redução dos custos de manutenção, substituição de equipamentos por desgastes prematuros e reduzir o contingenciamento em tempo real.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Capítulo 1: O estudo iniciará com uma introdução que contextualiza de forma abrangente o tema, onde expõe a problemática, o objeto de estudo, o estado da arte no contexto mundial, nacional e regional, no qual definirá o objetivo que norteou o estudo em epígrafe.

Capítulo 2: apresentará o referencial teórico dos principais conceitos e publicações que irão sustentar as ideias apresentadas neste trabalho. Estes conceitos estão inseridos na temática: desligamentos em linhas de transmissão, descargas atmosféricas ocorridas na Amazônia, os efeitos das descargas nos sistemas elétricos, as melhorias nos sistemas de aterramentos e dentre outros.

Capítulo 3: Define a metodologia que será utilizada para alcançar os objetivos: geral e específicos, divididos entre materiais e métodos.

Capítulo 4: Discorre sobre os resultados e discussão de forma preliminar com análise dos dados investigados objetivando atingir os objetivos específicos do projeto de pesquisa.

Capítulo 5: Trata das considerações finais, nesta fase do projeto ainda de forma preliminar resume os resultados gerais obtidos no projeto de pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - LINHAS DE TRANSMISSÃO

A linha de transmissão é uma estrutura flexível típica de cabo suspenso que transporta blocos de cargas a longas distâncias.

A linha de transmissão de alta tensão é considerada um dos maiores desafios da engenharia devido sua relação de altura/largura feitas em aço exibe rigidez flexível, geralmente projetadas para serviços de longo prazo em ambiente natural exposto as intemperes, com base nas condições climáticas devem ser consideradas as particularidades no projeto de torres de energia elétrica (GAO *et al.*, 2020).

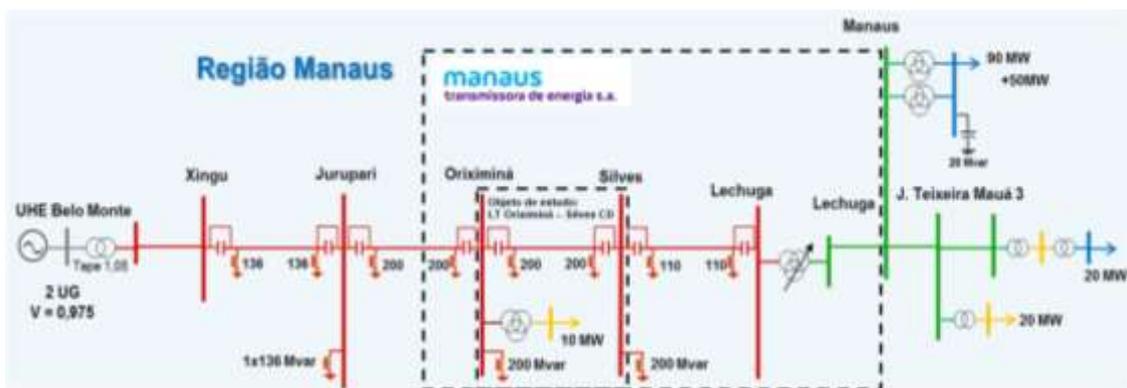


Figura 2.1 - Diagrama unifilar do objeto de estudo da concessionária Manaus transmissora de energia S.A.

Fonte: (ONS, 2016).

A Manaus Transmissora de Energia, do Lote C, do Leilão ANEEL 004/2008, cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 2.1, é a Transmissora de Energia S.A, com suas operações comerciais iniciadas no dia 13-07-2013. Concessionária de Serviço Público de Transmissão de Energia (Agente do SIN - Sistema Interligado Nacional), no qual o Sistema compreende duas Linhas de Transmissão: LT Oriximiná (PA) - Silves (AM) - Circuito Duplo 500 KV e LT Silves (AM) - Lechuga (AM) - Circuito Duplo 500 kV, com o total de 557,09 km sendo 1034 torres. O trabalho em a epígrafe é desenvolvido na LT Oriximiná (PA) - Silves (AM) - Circuito Duplo (CD) 500 KV - Distância aproximada de 333,34 km e 593 torres. (TRAMISSORA, 2019).

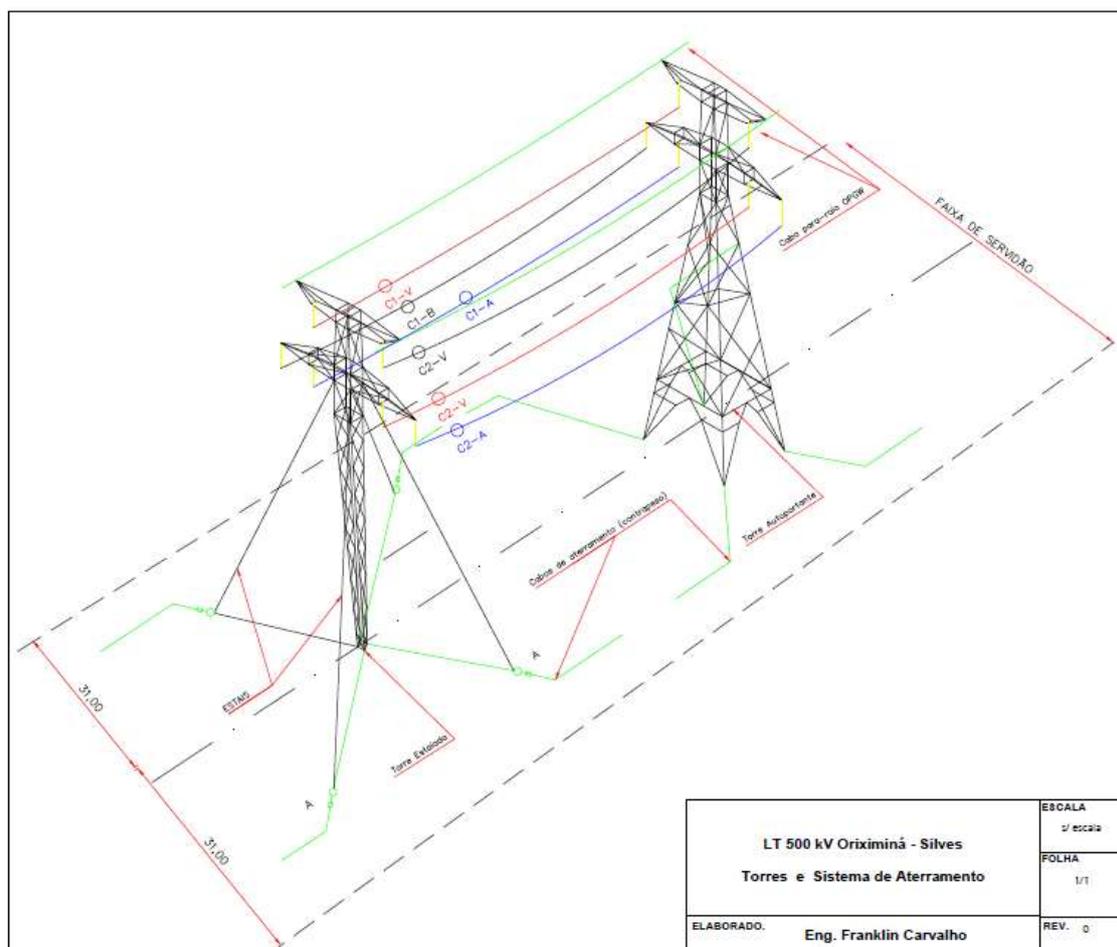


Figura 2.2 - Configuração das torres concessionária Manaus transmissora de energia S.A.

Fonte: (MANAUS TRAMISSORA, 2010).

A Figura 2.2, evidencia a diferença de dois modelos de estruturas predominantes na linha de transmissão estudada: torre estaiada e torre tipo autoportante. Mostra também as configurações dos aterramentos predominantes em ambos os circuitos de 550kV C1 e C2 e suas fases A, B e V além da faixa de servidão (TRAMISSORA, 2019).

2.2 - ATERRAMENTO ELÉTRICO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

No desempenho da linha de transmissão frente as descargas atmosféricas, a resposta do aterramento de pé de torre sujeitos a correntes impulsivas desempenham um papel fundamental (OLIVEIRA; VISACRO; GUIMARÃES, 2018).

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 projetados 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. Os aterramentos de linhas de transmissões são compostas basicamente de: cabos-guarda, ferragem da torre, eletrodos de aterramento verticais e cabos de aterramento (NASCIMENTO, JÚLIO A. S. DO; *et al.*, 2017).

A metodologia empregada nos ensaios de aterramento de pé de torre conforme Figura 2.3, foi realizada com instrumento terrômetro de alta frequência MEGABRAS TM-25m.

Segundo estudos (OLIVEIRA; VISACRO; GUIMARÃES, 2018), ressalta a importância da medição realizada por instrumentos de alta frequência, assim não há necessidade de desconexão do cabo de aterramento da torre, além de evitar desvios de corrente para as torres adjacentes assim como ocorre no ensaios de baixa frequência.

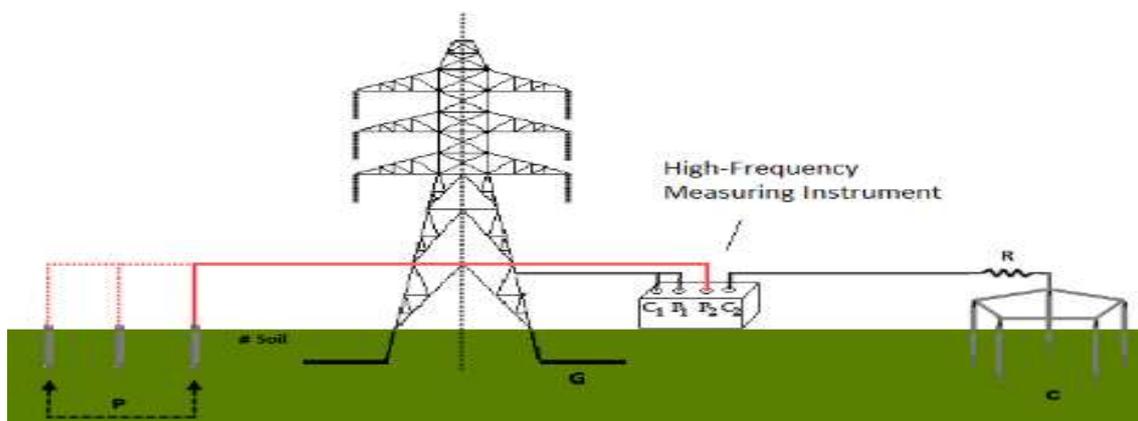


Figura 2.3 - Exemplo de impedância de impulso de aterramento configuração de medição o arranjo para medição de resistência de pé de torre em alta.
Fonte: (OLIVEIRA; VISACRO; GUIMARÃES, 2018).

Pesquisas de DEIN e YASSIN (2018), descrevem sobre alguns parâmetros devem ser considerados para determinar o comportamento do sistema de aterramento em transitório sendo que a impedância transitória é proporcional a resistividade do solo, dentre os pontos a serem observados temos: permeabilidade do solo, raio de grade do aterramento, resistividade do solo, comprimento e profundidade do cabo de aterramento, portanto com o aumento do eletrodo horizontal de aterramento há diminuição da impedância transitória, assim o mesmo concluiu que, a impedância do eletrodo de aterramento depende dos parâmetros elétricos do solo, frequência e intensidade e tempo de injeção da corrente no aterramento.

Esta impedância transitória de forma geral pode ser calculada pela Eq. (2.1), (DEIN; YASSIN, 2018).

$$z(t) = v(t)/i(t) (\Omega) \quad (2.1)$$

A impedância transitória pode ser expressa como razão de tensão e corrente em um ponto de alimentação, sendo $v(t)$ a tensão transitória no eletrodo de aterramento e $i(t)$ é a forma de onda de um raio que atinge o eletrodo de aterramento horizontal mais conhecido como cabo contrapeso (DEIN; YASSIN, 2018).

O impulso da descarga atinge o fio de aterramento sobre a torre, as correntes finalizam na através do sistema de aterramento. Entende-se que o sistema de aterramento desempenha um papel importante nos sistemas de proteção (LPS). Reafirmando o sistema de aterramento que deve ter baixa impedância para receber uma grande corrente de impulso de descarga no solo como dizem (DEIN; YASSIN, 2018).

As torre da linhas de transmissão está localizado em terrenos com alta resistividade do solo, o aperfeiçoamento dos sistemas de aterramento, reduz a impedância do aterramento e as sobre tensões elevadas na incidência de descargas atmosféricas (NASCIMENTO, JÚLIO A. S. DO; *et al.*, 2017).

O Brasil possui valores (típicos) de resistividade de solo muito elevados, assim os projetos de dimensionamento do sistema de aterramento ganham importância fundamental, principalmente a análise de sensibilidade para resposta do aterramento as configurações do aterramento e parâmetros do solo, como também uma estimativa de desempenho submetidos principalmente a surtos por descargas atmosféricas (VASCONCELLOS, 2017).

2.3 - DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A descarga atmosférica pode ser definida como uma descarga elétrica transitória de curta duração, com uma alta corrente associada, que usualmente atinge quilômetros 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 elétricas de forma a gerar campos elétricos que superam a rigidez dielétrica do ar

causando assim sua ruptura, podendo ser ascendentes ou descendentes para descarga nuvem solo (SANTOS, 2016), vejamos Figura 2.4 mostra ciclos de eventos climáticos.

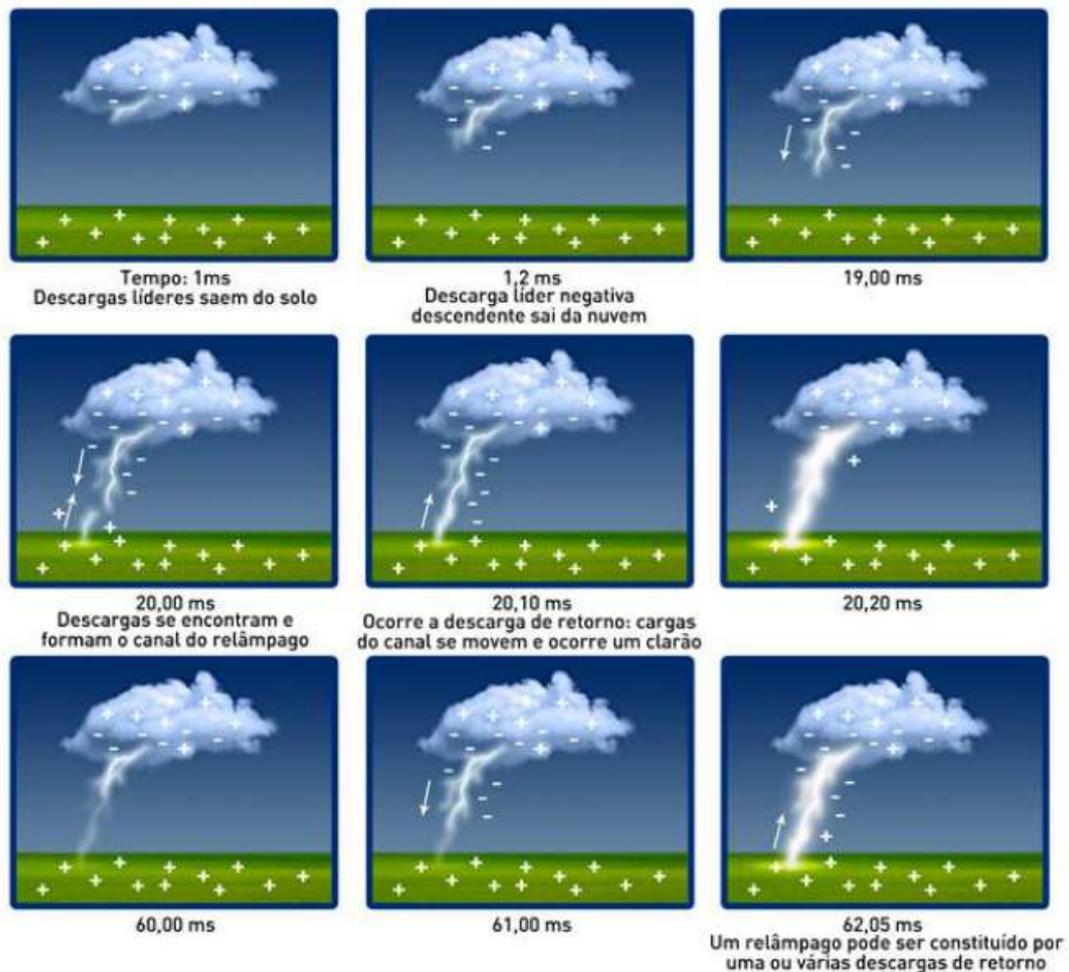


Figura 2.4 - Etapas de formação de uma descarga NS típica, desde a distribuição de cargas elétricas dentro da nuvem até a descarga de retorno.

Fonte: (DOS SANTOS, 2017).

As descargas podem ainda ser classificadas quanto a sua polaridade: polaridade positiva ou polaridade negativa, esta corresponde a 90% das descargas atmosféricas e mais prejudiciais as linhas de transmissão devido seu caráter destrutivo (SANTOS 2016 e 2017).

2.4 - ESTUDO DO SOLO

A permissividade e resistividade do solo, são parâmetros característicos do solo que está diretamente relacionado com o comportamento da linha de transmissão em transitório de descargas atmosféricas. Como os cabos nus de aterramento enterrados

entram em contato direto com o solo de resistividade alta 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 projeto 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.

2.5 - DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Os desligamentos de grande porte mais conhecidos como “apagões”, são ocasionados por um ou vários componentes de falha, dentre os mais significativos a linha de transmissão ocupa posição de destaque em função de sua vulnerabilidade e a prevenção de desligamentos intempestivos é de grande importância para reduzir os efeitos da perda de carga no sistema elétrico. As linhas de transmissão funcionam como um elo importante nas conexões elétricas transportando grandes blocos de cargas entre regiões, essas são as mais vulneráveis da rede elétrica (HU; FAN, 2020).

No Brasil, cerca de 70% dos desligamentos em linhas de transmissão são provocados pela incidência de descargas atmosféricas (NASCIMENTO *et al.*, 2017).

O Backflashover é o fenômeno causado por descarga disruptiva de retorno na linha de transmissão, este fenômeno ocorre quando a descarga atmosférica atinge o cabo para-raios da torre de linha de transmissão e está descarga atinge os cabos condutores rompendo a blindagem dos isoladores (VASCONCELLOS, 2017).



Figura 2.5 - Danos causados por descargas atmosféricas na LT Oriximiná – Silves CD.
Fonte: (TRAMISSORA, 2019).

Na Figura 2.5 mostra os danos causados por um evento de *backflashover* na LT Oriximiná-Silves C1 e C2 torre 568 causando desligamento simultâneo de ambos os circuitos com danos nos cabos e isoladores da linha de transmissão. Ocorrência se deu no dia 08/04/2018 no horário de 22:06:47seg.

No estudo de Berardo (2012) concluiu-se , quanto menor o tempo de incidência da descargas atmosférica na torre de linha de transmissão, maiores serão as sobretensões nas cadeias de isoladores das torres favorecendo o fenômeno do *backflashover*.

As ocorrências do SIN (Sistema Interligado Nacional), são consistidas no sistema eletrônico do ONS denominado SIPER (Sistema integrado de cadastramento de perturbações), este tem como objetivo de coletar, registrar e disponibilizar todas as informações a respeito das perturbações ocorridas no sistema interligado. Foi analisado com base nas informações do SIPER todas as ocorrências com descargas atmosféricas na linha Oriximiná-Silves CD no período de 2014 a 2019, servindo como referência para estratificação de dados importante tais como: quantidade de desligamentos e localização em quilometro de linha, período do ano em que estas ocorreram.

2.6 - DESEMPENHO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Falhas em linha de transmissão CA de alta tensão devem ser evitados, pois estes são os principais desafios do setor elétrico no que tange a interrupção do fornecimento, interrupção de linhas longas, tempo de recomposição, recursos necessários da concessionária e prejuízos a indústria, neste ponto implementar tecnologias para evitar as falhas e identifica-las de forma rápida se torna fundamental para sistemas complexos (SAHANI; DASH, 2019).

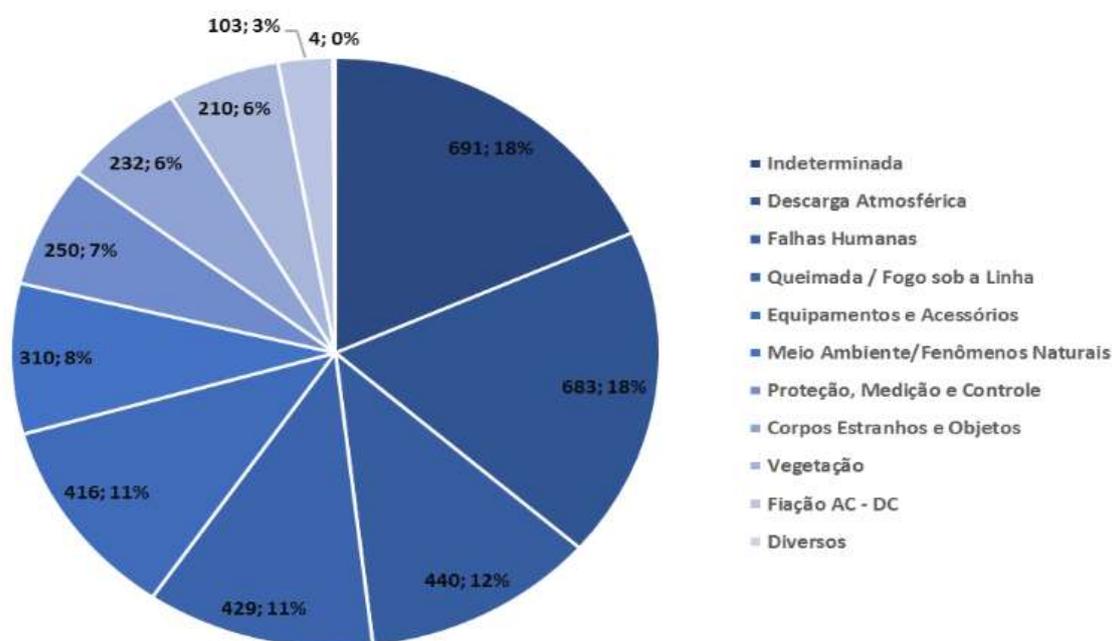


Figura 2.6 - Estratificação dos desligamentos forçados no Brasil no ano de 2018 e evidência a relevância deste tema para o setor elétrico.

Fonte: (ANEEL, 2018).

A Figura 2.6, mostra que os desligamentos por descargas atmosféricas no Brasil são a segunda causa de incidências dos desligamentos intempestivos do sistema elétrico. Estes desligamentos vêm aumentando ao longo dos anos, no ciclo de 2014 a 2018 teve um aumento de 11% no número de ocorrência por descargas atmosféricas, da mesma forma a Figura 2.7 a seguir mostra o índice de desligamentos no mesmo seguimento da concessionária.

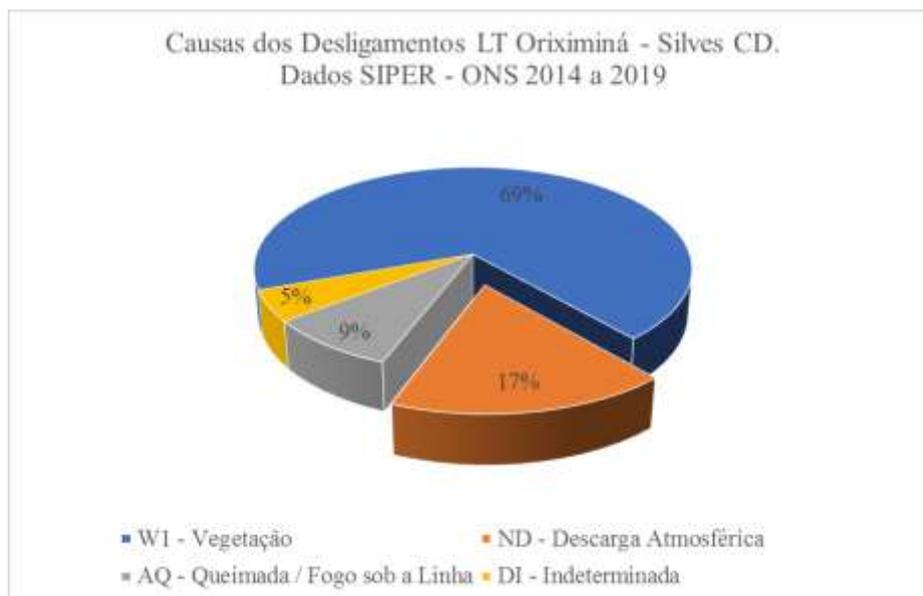


Figura 2.7 - Desligamentos forçados LT Oriximiná – Silves CD no período de 2014 a 2019.

Fonte: (ANEEL, 2019).

Seguindo a tendência do Brasil, a concessionária Manaus Transmissora também tem em seus registros a descargas atmosféricas como sendo a segunda maior causa de desligamentos forçados da linha de transmissão investigada com 17%.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAIS

Para implementar a metodologia descrita neste trabalho, foi utilizado as ferramentas a seguir:

- FASTGEL para tratamento natural para solos de alta resistividade: é um produto químico não tóxico e que não agride o meio ambiente que serve para realizar tratamento natural para solos de alta resistividade.
- Cabos de aterramentos (cabo contrapeso): são cabos de aço cobreado que servem para confeccionar malha de aterramento de torres de linhas de transmissão mediando seu lançamento sob o solo.
- Haste de aterramento: são varas de aço cobreado que servem para confeccionar malha de aterramento de torres de linhas de transmissão mediando sua fixação no solo.
- Termômetro de alta frequência MEGABRAS TM-25m: medidor de resistência de aterramento por alta frequência, instrumento adequado para a medição rápida da resistência de aterramento de cada torre de uma linha de transmissão em funcionamento, sem a necessidade de desconectar o cabo guarda.
- Máquina retro escavadeira: é um trator ou máquina de terraplenagem equipada com uma pá carregadeira (caçamba) montada na frente e uma pequena concha (caçamba) na traseira do veículo, este será utilizado para abrir as valas sob a linha de transmissão.
- Ferramental de manutenção de linha: as ferramentas diversas para conexão dos conectores (chaves combinadas, regulagem, dentre outros).

3.2 - METODOLOGIA

A presente dissertação será de pesquisa e perpassará por etapas. Que serão: a observação, estudos e levantamentos documentais, entrou em operação comercial em

Julho de 2013 e é composto pela LT Oriximiná/Silves/Lechuga, em 500 kV, passando pelos Estados do Amazonas e Pará, com extensão de 586 km, e as subestações: SE Silves 500/138kV e SE Lechuga 500/230kV (ANEEL, 2018).

Durante o processo de coletas de dados nos embasaremos em Richardson (2011, p. 261), que nos apoiará quanto ao uso de fotos, vídeos e falas, pois esclarece que estes por sua vez podem ser utilizados com a finalidade de compreender atitudes e interesses dos envolvidos.

A princípio foram explorados documentos dos órgãos oficiais disponíveis no ONS (Operador Nacional do Sistema), ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), bem como de documentações técnicas fornecida pela concessionária de transmissão de energia tais como: Projetos das estruturas, memorial de cálculo de projetos, projetos executivos, relatórios de ocorrências, relatórios de manutenção, dentre outros. Será implementado soluções amostrais para avaliar o desempenho do aterramento antes e depois de cada solução, assim estratificar dados suficientes para prospectar melhoria no aterramento.

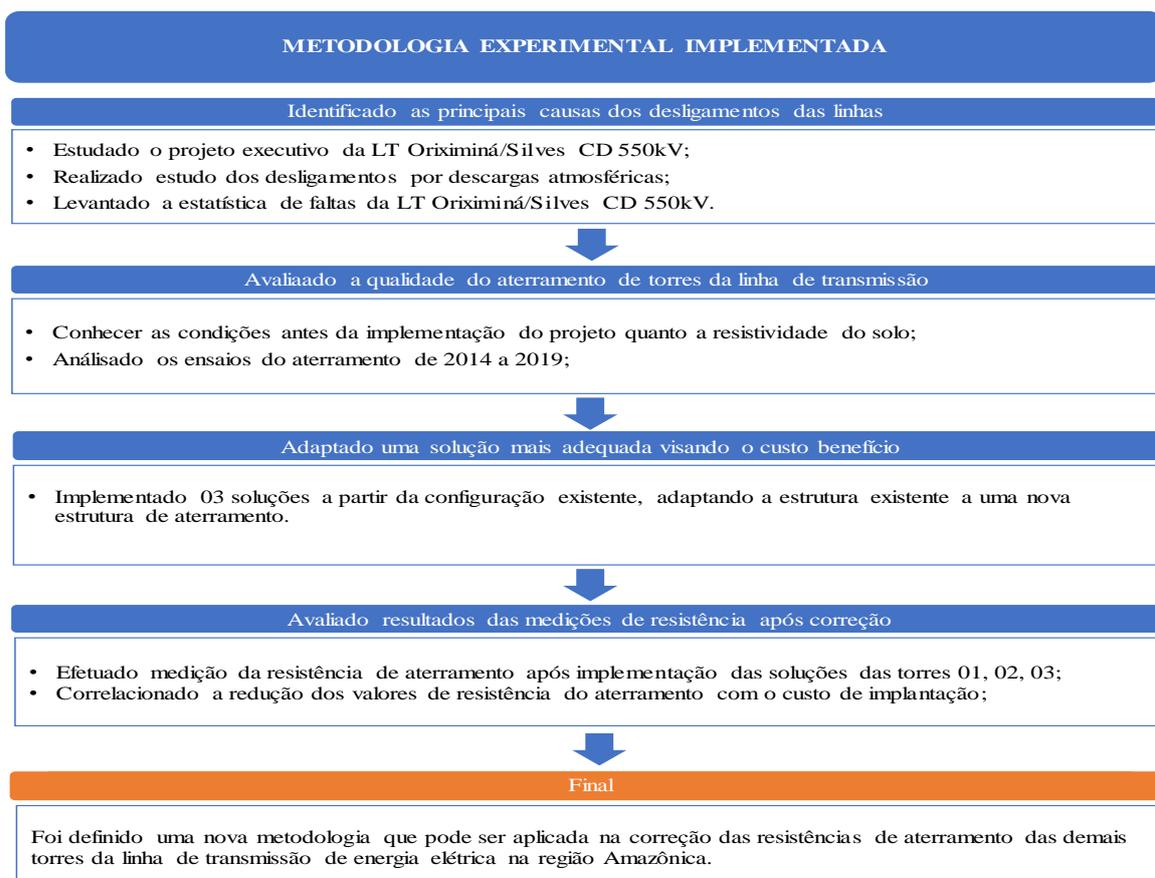


Figura 3.1 - Fluxograma metodológico detalhadamente a metodologia a ser implementada.

Para identificar as causas dos desligamentos em linhas de transmissão frente as impedâncias de aterramento, foi adotado as etapas a seguir:

- Analisar o projeto executivo da LT Oriximiná/Silves CD 550kV:
- Utilizar-se da base de dados fornecida pela concessionária contendo os projetos executivos, base de cálculos, planilhas de comissionamento dentre outros documentos, estes servirão de base para evidenciar as condições atuais do projeto.
- Levantar a estatística de faltas da LT Oriximiná/Silves CD 550kV:
- Avaliação da qualidade do aterramento de torres da linha de transmissão LT Oriximiná/Silves CD 550kV seguindo as seguintes etapas:
- Conhecer as condições antes da implementação do projeto quanto a resistividade do solo através da análise de resistividade;
- Análise dos ensaios do aterramento de 2014 a 2019;
- Efetuar medições amostral comparativas de antes e depois da qualidade do aterramento de torres da linha de transmissão LT Oriximiná/Silves CD 550kV das torres ,através do medidor de resistência de aterramento por alta frequência (25 kHz), para a qual a impedância indutiva do cabo de guarda, considerando um espaçamento padrão entre torres é razoavelmente alta, o que permiti reduzir o efeito das outras torres adjacentes àquela que está sendo medida.

Em função das diversas variáveis do processo de aterramento de linhas como: condições climáticas, condições geológicas, restrições ambientais, restrições de construção e custo, o problema admite mais de uma solução. Desta forma iremos tratar as variáveis de custo de implementação e o percentual de redução da resistência de aterramento, classificando as soluções testadas com o critério de melhor custo benefício.

Conforme Tabela 3.1, mostra as torres escolhidas foram as torres 549, 565 e 585 que seguindo os seguintes critérios: Localização próximas, mesmo modelo estaiadas, valores de resistência em baixa tensão aproximados, características de solos do tipo 04. Com o mapeamento das torres, será implementado uma solução prospectando a redução das resistências do aterramento, em uma amostra de quatro torres de modelo estaiada do tipo OCEME e OCEL, sendo que as características do solo são do tipo 04 que significa tipo seco conforme critério de medição da concessionária.

Tabela 3.1 - Medição de resistividade de pé de torre: LT 500 kV CD Oriximiná – Silves 2014.

ABENGOA BRASIL		Sistema de Gestão Integrado - SGI			
Medição de Resistência de Aterramento de Pé de Torre - LT Oriximiná-Silves CD					
Manaus Transmissora					
Empresa:	Omega				Atualização:
					11/04/2014
Estado do solo	Torre Estaiada	Localização	Seco 04	Baixa Frequência	
Torre	Tipo	Subsede	Solo	Resultado média (Ohms)	Observações
565	OCEME	Itapiranga-AM	4	54,55	Metodologia de correção Torre 01
549	OCEME	Itapiranga-AM	4	58,55	Metodologia de correção Torre 02
585	OCEL	Itapiranga-AM	4	79,15	Metodologia de correção Torre 03

Fonte: Dados de Projetos de Linha de Transmissão (MANAUS TRANSMISSORA, 2010).

Para a etapa final foi avaliado resultados das medições de resistência de aterramento das estruturas que foram corrigidas utilizando o medidor de resistência de aterramento por alta frequência (25 kHz), avaliado a diferença entre as medições "R0" realizada antes do início das atividades de implementação e posterior a implementação medido "R1", seguindo com o levantamentos dos custos de implementação a avaliação de viabilidade ambiental para aplicação em larga escala. Para execução em campo da metodologia proposta, será utilizado além dos materiais, mão de obra proveniente da equipe de manutenção da linha de transmissão.

Das condicionantes ambientais necessárias para a execução da implementação, umas das mais importantes é seguir são condicionantes da licença de operação ambiental emitida pelo IBAMA, este fornece diretrizes básicas operacionais quanto a necessidade de preservação ambiental durante a operação comercial do empreendimento. Esta Licença deverá ser publicada em conformidade com a Resolução CONAMA n°006/86, sendo que cópias das publicações deverão ser encaminhadas ao Ibama.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - PRINCIPAIS CAUSAS DOS DESLIGAMENTOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE AS IMPEDÂNCIAS DE ATERRAMENTO DO SOLO NA AMAZÔNIA

Foram efetuadas as análises dos dados de investigação documentações técnicas fornecida pela concessionária de transmissão de energia tais como: Projetos das estruturas, memorial de cálculo de projetos, projetos executivos, relatórios de ocorrências, relatórios de manutenção e dentre outros.

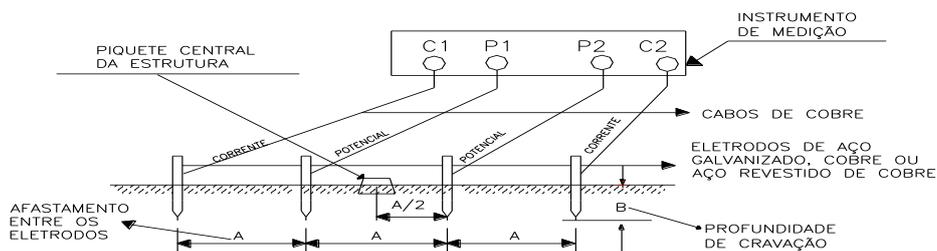
4.1.1 - Análise da resistividade do solo da linha Oriximiná-Silves CD

A análise dos ensaios de aterramento do período de 2014 a 2019 possibilitou o diagnóstico da resistência de aterramento por torre ao longo dos anos, além de determinar os trechos com maior resistência de aterramento; Através do procedimento MTS-800-23001-ET a concessionária descreveu um método para determinação da resistência do solo, nos locais em que serão instaladas as estruturas de uma linha de transmissão e medição da resistência elétrica de aterramento das estruturas após a instalação dos respectivos arranjos de aterramento ainda na fase de projeto em 03/12/2010.

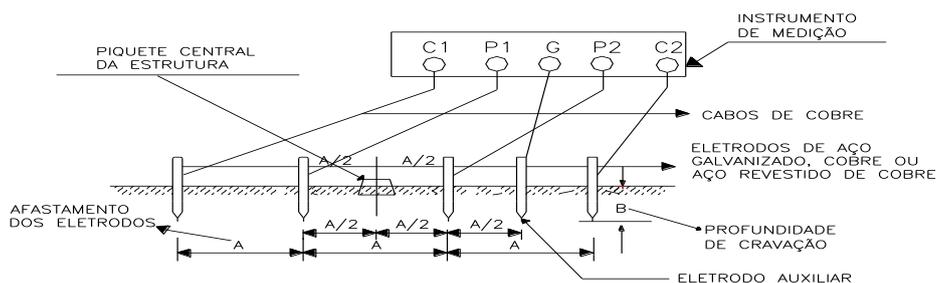
Localização e Quantidade de Ensaios de resistividade do solo deverão ser medida nos locais em que serão instaladas as estruturas, o mais próximo possível do piquete central delas. Conseqüentemente, só poderão ser executadas após a locação das estruturas no campo e antes da execução das fundações. Deverão ser executados dois ensaios, um no sentido longitudinal e outro no sentido perpendicular ao eixo da linha conforme Figura 4.1, para se ter uma melhor avaliação da homogeneidade do solo. Os eletrodos deverão ser obrigatoriamente cravados dentro da faixa de servidão (TRANSMISSORA, 2010).

No caso da estrutura ser instalada em rochas, rios ou banhados, ou quando as condições locais não permitirem a execução dos ensaios, tal fato deverá ser levado ao conhecimento da fiscalização e indicado no formulário padronizado “Medição da Resistividade do Solo” (TRANSMISSORA, 2010).

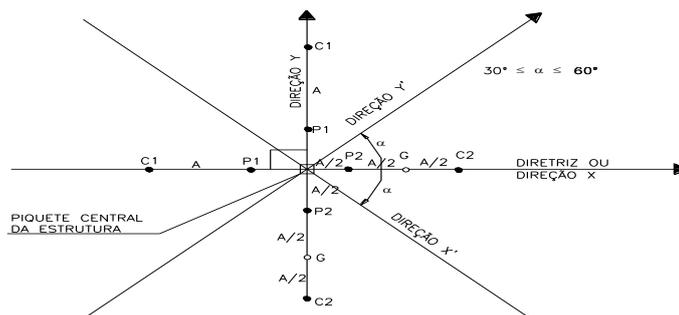
MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO



CONEXÃO USANDO APARELHO DE 4 TERMINAIS
FIGURA II



CONEXÃO USANDO APARELHO COM TERMINAL DE GUARDA
FIGURA III



DISPOSIÇÃO DOS ELETRODOS PARA OS ENSAIOS NAS DIREÇÕES X E Y OU X' E Y'
FIGURA IV

Figura 4.1 - Método utilizado para medição de resistividade do solo.
Fonte: Especificações Técnicas para Medições de Resistividade do Solo e de Resistência de Aterramento das Estruturas - MTS-800-23001-ET: (TRANSMISSORA, 2010).

Após realização das medições, foram conclusas que em 19/03/2011 as medições de resistividade que serviram de base para confecção dos projetos de aterramento obtiveram acentuação, como segue:

Tabela 4.1 - Medição de Resistividade de solo trecho: LT 500 kV CD Oriximiná – Silves 19/03/2011. Dados de medições compilados.

MANAUS CONSTRUTORA							
Medição de Resistividade de Solo							
Trecho: LT 500 kV CD Oriximiná - Silves							
N.º Torre	Tipo	Direção X					
		(a) Resistência Medida W					
		1	2	4	8	16	1
PORT1	PORT						
0-1	OCAT	174,50	224,00	159,10	110,60	54,80	192,70
0-2	OCEL	125,60	108,40	92,30	68,10	48,20	122,00
0-3	OCAT	40,60	29,70	30,70	24,40	24,90	30,90
0-4	OCEL	177,00	162,60	114,20	5,20	29,90	170,20
0-5	OCEL	126,30	95,70	62,80	19,60	9,90	96,60
100-1	OCEME	165,00	150,00	70,50	36,80	20,40	162,00

Fonte: Dados de Projetos de Linha de Transmissão (MANAUS TRAMISSORA, 2010).

Conforme dados compilado da Tabela 4.1 completa, foram encontrados registro e efetuadas medições de resistividade em 150 torres de um total de 593 torres, esta quantidade representa 25,30% do total de torres do trecho Oriximiná – Silves CD. No procedimento da concessionária MTS-800-23001-ET não especifica a quantidade mínima de torres para realizar o ensaio de resistividade.

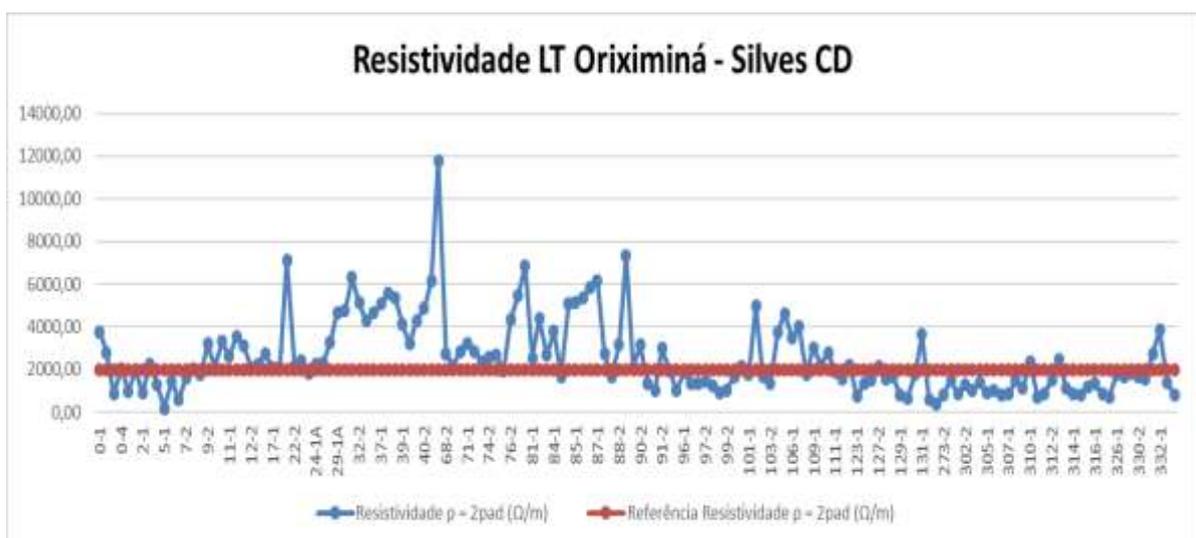


Figura 4.2 - Resistividade da linha Oriximiná – Silves CD.

De acordo com os dados da Tabela 4.2 e do Figura 4.2, pode-se verificar as seguintes constatações:

- A resistividade média das 149 torres é de 2.551,83 Ωm ;
- 46,67% das medições estão acima de 2.000 Ωm .

O projeto 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 ($\rho \leq 500 \Omega\text{m}$) é proporcionalmente baixa e solos com resistividades acima ($\rho \geq 2000 \Omega\text{m}$) é considerado elevado e requerem aterramentos complexos. NOGUEIRA (2002) citou que solos de baixa resistividade ($\rho < 700 \Omega\text{m}$), PAULINO (2009) cita que o limite técnico para utilização de cabos contrapeso é de ($\rho < 4400 \Omega\text{m}$), VASCONCELLOS (2017) discorreu sobre a importância de projetos de aterramentos que garantam o bom desempenho das linhas de transmissão considerando o valor médio de resistividade alta no Brasil em torno de ($\rho \leq 1000 \Omega\text{m}$), Segundo BERNARDO (2012), quando a resistividade do solo é menor que ($\rho \leq 500 \Omega\text{m}$) é considerado boa para aterramento de torres de linhas de transmissão corroborando com o NASCIMENTO e JÚLIO A. S. DO; *et al.*, (2017). (VISACRO e SILVEIRA (2016) apontam que a resistividade ($\rho \leq 300 \Omega\text{m}$) e ($\rho \geq 2000 \Omega\text{m}$) são consideradas baixas e altas respectivamente.

Diante das evidências podemos concluir que uma das principais causas dos desligamentos são em decorrência a alta resistividade do solo onde a linha de transmissão foi construída, CASCADO (2017) discorreu sobre a importância da incidência das descargas atmosféricas em função de serem a maioria dos curtos-circuitos em linhas de transmissão instaladas em várias partes do mundo. No Brasil esse problema é especialmente importante, em virtude da grande incidência de descargas atmosféricas, este conforme dados Grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE (2017) o estado do Amazonas é o segundo no Brasil em densidade descargas atmosférica sendo 15,8 raios por quilômetro quadrado (km^2), além do solo apresentar elevados valores de resistividade do solo.

4.1.2 - Qualidade do aterramento das torres da linha de transmissão LT Oriximiná/Silves CD 550kV

Segue análise de projeto dos aterramentos da linha Oriximiná-Silves CD. O relatório LT-452-008, tem como objetivo definir os parâmetros básicos para o

dimensionamento do isolamento da LT Oriximiná-Silves CD, dentre outros aspectos o desempenho da LT frente a descargas atmosféricas. Para avaliação do desempenho da LT quando submetida a surtos atmosféricos foi utilizado pela concessionária o programa IEEE Flash 2.0, este programa estima as taxas de *flashover* de raios nas linhas aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica, de acordo com as normas da IEEE. 1243 e 1410 (TRANSMISSORA, 2008).

Tabela 4.2 - Valores entrada programa FLASH para a linha de transmissão Oriximiná – Silves CD.

Valores entrada programa FLASH		
Itens de Entrada	Valores	Unidade
Vão médio	450	m
Altura da torre até o topo	52,4	m
Espaçamento horizontal entre fases	14	m
Espaçamento vertical entre fases	9,5	m
Espaçamento horizontal entre cabos pára-raios	15,6	m
Altura do condutor ao solo na torre, fase mais baixa	24,65	m
Altura do cabo pára-raios ao solo na torre	52,4	m
Distância fase-terra para cálculo do nível de isolamento	3,6	m
Flecha do cabo condutor	14,2	m
Flecha do cabo pára-raios	11,02	m
Nível cerâmico da região atravessada pelas LT's	100	-
Resistência de aterramento média das torres	12	Ω

Fonte: Projeto Básico de Coordenação do Isolamento LT-452-008.

A partir dos dados da Tabela 4.2 acima, foram calculado o desempenho da LT Oriximiná – Silves CD com intuito de atender à os seguintes valores expressos em número de descargas por 100km por ano sendo: Número de desligamento por descargas diretas $\leq 0,01$ (1 circuito) e $\leq 0,0001$ (2 circuitos), este parâmetro do procedimento da ANEEL-ONS (ANEEL, 2018). O total de desligamentos previstos é ≤ 1 por ano, sendo o que o valor médio de aterramento das torres de transmissão seja $\leq 12 \Omega$. Esta resistência (12Ω) é considerado conforme projeto o limite para a média das resistências de aterramento da totalidade das estruturas da linha Oriximiná – Silves CD (TRANSMISSORA, 2008).

Conforme PAULINO (2009), descreveu que para uma expectativa de desligamentos de linhas de transmissão com taxa que varia de 0,5 e 1,0 para cada 100km/ano é necessário que a resistência média de aterramento esteja na faixa de 7Ω a

12,5 Ω. Foi realizado verificando os valores pelo número de desligamentos por 100km por ano. Neste contexto a Eq. (4.1) abaixo demonstra o cálculo realizado:

$$Dlt = \frac{Nda}{L} \times 100 \quad (4.1)$$

A Eq. 4.1 foi utilizada para calculo de desempenho da LT Oriximiná-Silves CD onde: Dlt (Desempenho da linha de transmissão), Nda (Número de desligamento por ano), L (comprimento da linha em km). No período de 2014 a 2019, foram registrados 25 desligamentos por descargas atmosféricas, sendo uma média de 4,1 desligamentos por 100km com indice de Dlt médio de 1,28.

Segundo WU e SUN (2011) taxa de *flashover* aumenta com a variação dos seguintes parâmetros: Quanto maior a altura da torre, quanto maior a impedância de pé de torre, quanto maior a resistividade do solo e a baixa resistência dos isolamento. A taxa de *flashover* para cada 100km é de 0,787 para resistividade de até 500 Ωm, 0,808 para resistividade de até 1000 Ωm e 0,823 para resistividade de até 2000 Ωm.

Tabela 4.3 - Diretrizes de projeto de aterramento LT Oriximiná – Silves CD.

Configuração Aterramento das Torres				
Fase	Resistência de Terra (Ω)	Comprimento do Cabo de Aterramento (m)	Número de Cabos de Aterramento	Número de Hastes de Aterramento
I	R ≤ 12	30	4	0
II	12 < R ≤ 22	60	4	0
III	22 < R ≤ 31	90	4	0
IV	31 < R ≤ 41	120	4	0
V	R > 41	120	4	4

Fonte: Adaptado do projeto MTS-800-38001_R0_AP ELN-MTS_ Sist. de aterramento (MANAUS TRAMISSORA, 2010).

A Tabela 4.3 mostra um resumo das diretrizes de projeto conforme MTS-800-38001_R0_AP ELN-MTS_ Sist. de aterramento, dentre outras informações conforme segue:

- Os fios contrapesos deverão ser instalados dentro dos limites da faixa de servidão em valetas com profundidade de 0,80m;

- Onde houver restrição ambiental que impossibilite a instalação dos cabos contrapesos em função do corte de vegetação, estes deverão ser instalados dentro do limite da faixa permitida;
- O sistema de aterramento é constituído por quatro ramos de fio contrapesos conectados às cantoneiras de ancoragem do pé da torre auto portante e/ou dos mastros da torre estaiada, sendo o esquema apresentado na Figura 4.1 para torres autoportante e Figura 4.3 para torres estaiadas;
- Inicialmente deverá ser lançado a fase I em todas as estruturas da LT e medida a resistência de aterramento, não sendo obtido o valor da resistência de no máximo 12Ω deverá ser instalada as fases seguintes (II, III, IV e V) uma por vez especificados na Tabela 4.3. Em caso de não atingir o valor especificado de 12Ω a fiscalização da obra irá adotar medidas adequadas.

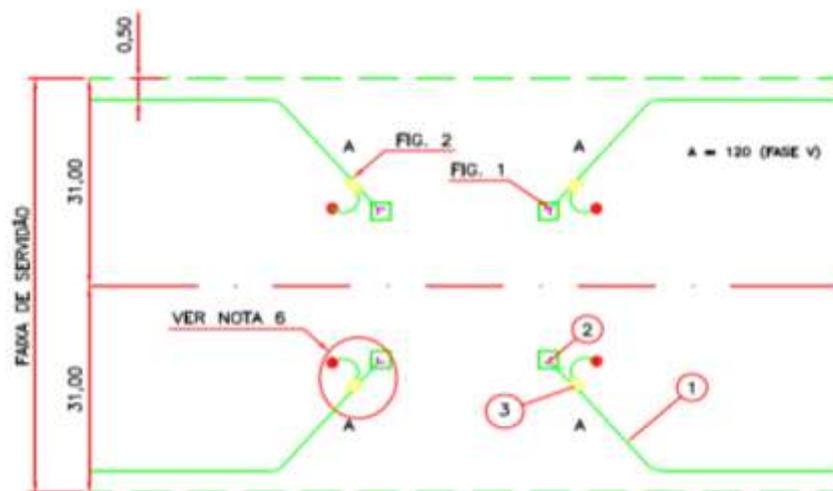


Figura 4.3 - Arranjo de aterramento fase V torre auto portante LT Oriximiná – Silves CD.

Fonte: Adaptado do projeto MTS-800-38001_R0_AP ELN-MTS_ Sist. de aterramento (MANAUS TRAMISSORA, 2010).

A Figura 4.3, nos mostra arranjo de aterramento na fase V, por sua vez mais completa a serem instaladas em regiões de resistividade do solo mais precárias para torres auto portante sendo as demais fases seguem o mesmo arranjo diferindo apenas no comprimento do fio contrapeso e no número de hastes de aterramento instalado conforme mostrado na Tabela 4.3. A especificação do material utilizado está listada na Tabela 4.4.

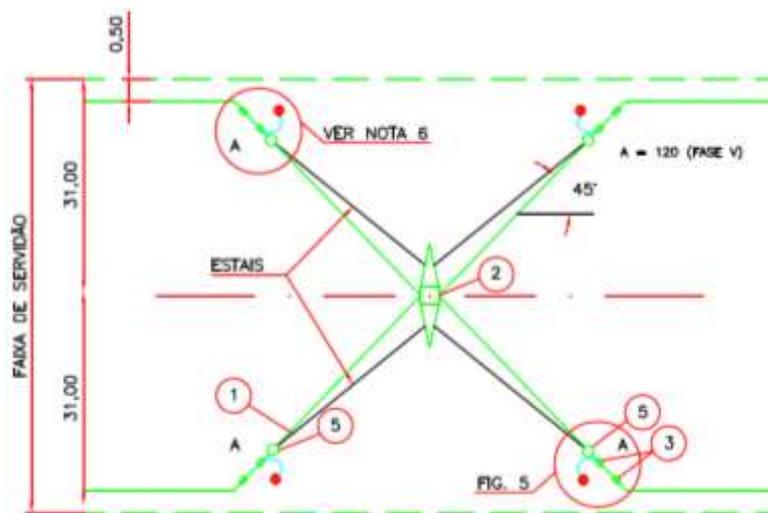


Figura 4.4 - Arranjo de aterramento fase V torre estaiada LT Oriximiná – Silves CD.
 Fonte: Adaptado do projeto MTS-800-38001_R0_AP ELN-MTS_ Sist. de aterramento (MANAUS TRAMISSORA, 2010), (BERARDO, 2012), (PAULINO, 2009).

Os modelos de arranjo mostrado nas Figuras 4.3 e 4.4 são largamente utilizados em linhas de transmissão, deste mesmo modelo citaram em trabalhos recentes: (YUTTHAGOWITH; KUNAKORN, 2018), (ANDERSON DE ARAUJO *et al.*, 2019).

A Figura 4.4, mostra arranjo de aterramento na fase V, por sua vez mais completa a serem instaladas em regiões de resistividade do solo mais precárias para torres estaiadas sendo as demais fases seguem o mesmo arranjo diferido apenas no comprimento do fio contrapeso e no número de hastes de aterramento instalado conforme mostrado na Tabela 4.4. A especificação do material utilizado está listada na Tabela abaixo:

Tabela 4.4 - Lista de material de aterramento LT Oriximiná – Silves CD.

Item	Descrição do Material		Descrição do Material				
			Quantidade total por fase e por torre				
			Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV	Fase V
1	Fio contrapeso de aço-cobre recozido 4AWG	-	120	240	360	480	~490
2	Conector paralelo para fixação do cabo contrapeso a torre (Pés ou Mastros)	Autoportante	4	4	4	4	4
		Estaiada	2	2	2	2	2
3	Conector paralelo para emendar dois cabos contra-peso 4AWG	Autoportante	-	4 (QDD Aplicável)	4 (QDD Aplicável)	4 (QDD Aplicável)	4+ (QDD Aplicável)

		Estaiada	4	4+ (QDD Aplic ável)	4+ (QDD Aplic ável)	4+ (QDD Aplic ável)	8+ (QD D. Apli cáve l)
4	Haste de aterramento de barra redonda prolongável de aço-cobreado diâmetro de 17,30mm, comprimento de 3000mm, com conector para fixação do fio contrapeso	Autoportante e/ou Estaiada	-	-	-	-	4
5	Grampo paralelo para emendar o cabo de estai ao cabo contrapeso	Estaiada	4	4	4	4	4
6	Pinos de rocha	-	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável

Fonte: Adaptado do projeto MTS-800-38001_R0_AP ELN-MTS_ Sist. de aterramento (MANAUS TRAMISSORA, 2010).

A Tabela 4.4 apresentam de forma resumida os principais materiais utilizados nos aterramento das torres da LT Oriximiná – Silves CD, estas especificação estão localizado no projeto executivo das torres, bem com as quantidade de materiais utilizados para cada fase dos aterramentos (MANAUS TRAMISSORA, 2010).

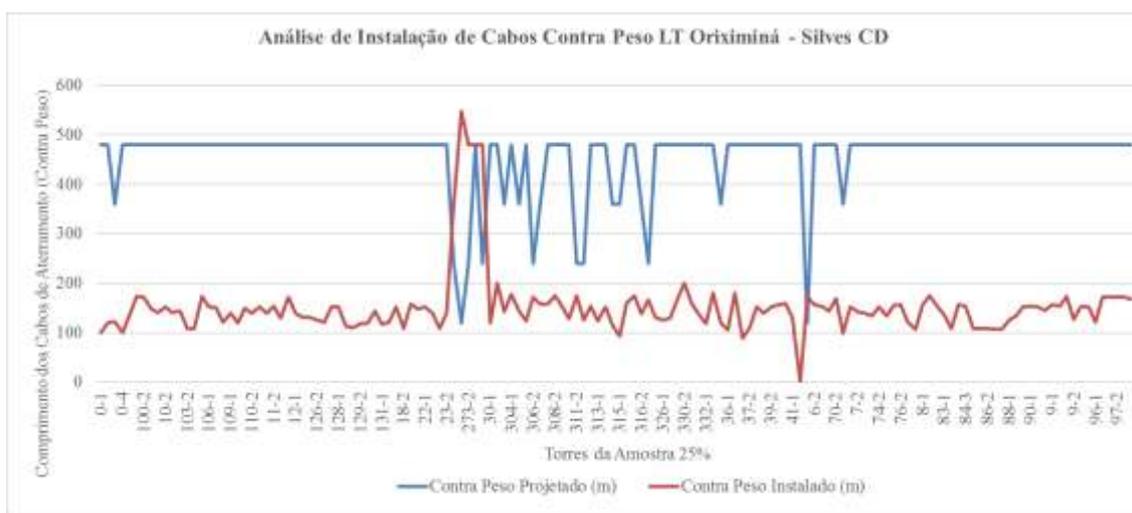


Figura 4.5 - Comprimento dos cabos de aterramento (contra peso) instalados e projetado LT Oriximiná – Silves CD.

A Figura 4.5, apresenta dados comparativos provenientes dos dados de como construído a LT Oriximiná – Silves CD. Na amostra são 149 torres analisadas correspondendo a 25% do total da linha, onde foram observados os valores de resistência ôhmica de aterramento para obter o tipo de aterramento projetado para cada estrutura, esta especificação de projeto tem por finalidade obter valor de resistência de aterramento de pé de torre menor do que 12Ω conforme especificado na Tabela 4.3.

Na análise dos dados da Figura 4.5 mostra que 95% dos aterramentos das torres que estão com comprimento abaixo do valor especificado em projeto, o que prejudica o desempenho da linha frente as descargas disruptivas provenientes de descargas atmosféricas. Segundo PAULINO (2009), o comprimento do cabo contrapeso está diretamente associado a resistência de pé de torre e a impedância de impulsiva e seus impactos nos valores de tensões que surgem nas cadeias de isoladores. Para altas resistividades do solo surgem picos ressonantes na descargas atmosféricas que são atenuados com o aumento do cabo contra peso escreveu, (CHIHEB *et al.*, 2019).

Foi identificado que no projeto da concessionária MANAUS TRANSMISSORA (2010) ,aplicou-se a metodologia em que não levou em consideração as medições de resistividade do solo efetuadas, e sim as medições feitas a partir do lançamento dos lançamentos da fase I conforme descrito no projeto MTS-800-38001_R0_AP ELN-MTS_ Sist. de aterramento: Inicialmente deverá ser lançado a fase I em todas as estruturas da LT e medida a resistência de aterramento, não sendo obtido o valor da resistência de no máximo 12Ω deverá ser instalada as fases seguintes (II, III, IV e V) uma por vez especificados na Tabela 4.4. Em caso de não atingir o valor especificado de 12Ω a fiscalização da obra irá adotar medidas adequadas. Na Tabela 4.5 mostra valores de referência para instalação de cabos de aterramento em função da resistividade de solo.

Tabela 4.5 - Comprimento dos cabos de aterramento (contra peso).

Resistividade do solo [$\Omega.m$]	Comprimento do contrapeso por perna [m]
Abaixo de 850	60
Entre 850 e 1.100	80
Entre 1.100 e 1.350	100
Entre 1.350 e 1.600	120
Acima de 1.600	Contínuo

Fonte: Estudo do aterramento dos pés de torres de linha de transmissão frente às descargas atmosféricas (BERARDO, 2012).

O BERARDO (2012), citou como referência do comprimento dos cabos de aterramento (contrapesos) conforme Tabela 4.5, segundo ele o comprimento do contrapeso por perna deverá lançado em função da resistividade do solo medida. Neste segtido a Figura 4.6 mostra a classificação em percentual de como o projeto deveria ter sido executado considerando as resistividades do solo. A Figura 4.6 mostra os valores percentuais encontrados nas medições de aterramento.

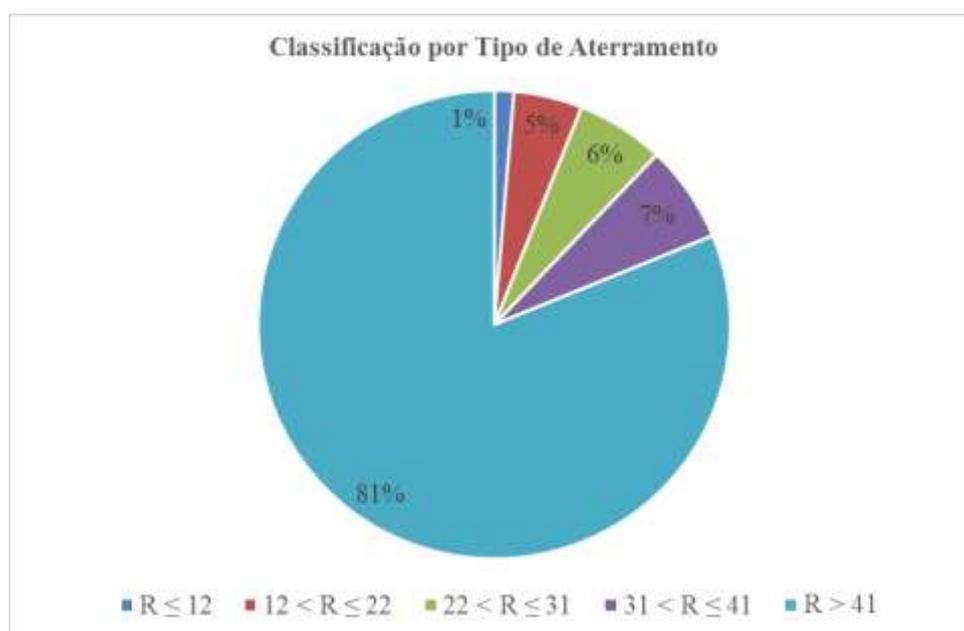


Figura 4.6 - Classificação por Tipo de Aterramento - LT Oriximiná – Silves CD.
 Fonte: Copilado pelo Autor - Medição de Resistividade de Solo Trecho: LT 500 kV CD Oriximiná – Silves 19/03/2011.

Os dados de compilação da Figura 4.6 foi estratificado do controle de Medição de Resistividade de Solo Trecho: LT 500 kV CD Oriximiná – Silves registrado em 19/03/2011. A amostra é de 149 torres de um total de 593 torre certa de 25%. O gráfico 05 mostra que 81% 121 torres possuem resistêcia superior a 41Ω, 7% 10 torres possuem resistêcia menor ou igual a 41Ω, 6% 09 torres possuem resistêcia menor ou igual a 31Ω, 5% 07 torres possuem resistêcia menor ou igual a 22Ω e 1% 02 torres possuem resistêcia menor ou igual a 12Ω esta ideal para atender ao número de desligamento por descargas diretas $\leq 0,01$ (1 circuito) e $\leq 0,0001$ (2 circuitos), este parâmetro do procedimento da ANEEL-ONS (ANEEL, 2018).

Considerando que as evidências coletadas, a resistividade média das 149 torres é de 2.551,83 Ωm sendo que 46,67% das medições estão acima de 2.000 Ωm considerada valor elevado e requerem aterramentos complexos, 81% das torres possuem resistêcia de

pé de torre superior a 41Ω que segundo o projeto requer aterramento do fase V conforme Figura 4.3 para torres alto portante e Figura 4.4 para torres estaiadas. O aterramento fase V é formado conforme projeto e mostrado nas Tabelas 4.2 e 4.3 de: 480 metros de cabos contra pesos sendo 120 metros por perna, 04 hastes de aterramento de 03 metros de comprimento sendo 01 haste por fio de contrapeso localizado a 30 metros da torre. No entanto conforme evidenciado na lista de construção, este responsável pelos registros de como construído o aterramento, foi mostrado no Figura 4.5 que 95% dos aterramentos das torres amostradas estão com comprimento abaixo do valor especificado em projeto, o que prejudica o desempenho da linha frente as descargas disruptivas provenientes de descargas atmosféricas.

4.1.3 - Implementar solução mais adequada visando o custo-benefício para correção de distorções encontradas nas medições

Nesta fase, foram analisadas as torres da amostra 549, 565 e 585 localizadas no município de Silves no estado do Amazonas, conforme mostra o mapa da Figura 4.7. Assim, implementado a metodologia mostrada e com os comprimentos dos cabos a ser definidos conforme limitações ambientais do local.

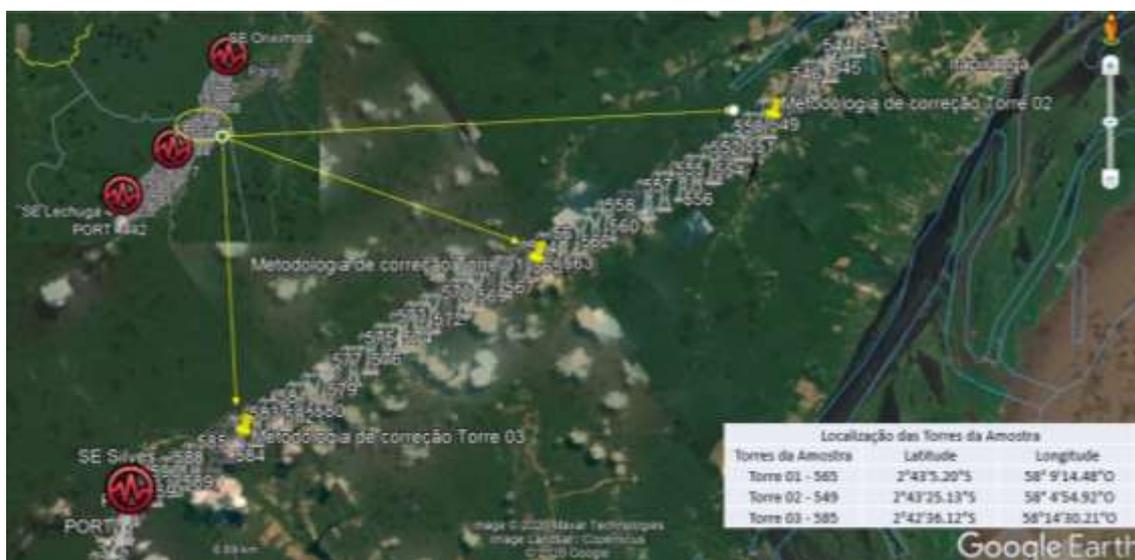


Figura 4.7 - Localização das torres da amostra da LT Oriximiná – Silves CD.

A Figura 4.7 mostra a localização no mapa com as coordenadas onde será implementada as correções conforme metodologica já apresentada, estas torres apresentam solos tipo 4 que segundo a metodologica da concessionária é do tipo seco. A

região é de fácil acesso com a utilização de máquinas, equipamentos e veículos traçados 4x4.

Na Tabela de construção fornecida pela concessionária, retrata a situação final de como construído o aterramento, em que consta os comprimentos dos cabos de aterramento das torres em estudo (565, 549 e 585), conforme mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Arranjo de aterramento das torres em estudo. LT Oriximiná – Silves CD.

Operação	Fio Contrapeso							Total	Data
	Torre	Tipo	Pés/Estais						
			A	B	C	D			
565	Torre 01	OCEME	50,00	50,00	50,00	50,00	200,00	26/05/11	
549	Torre 02	OCEL	32,20	31,50	32,50	33,00	129,20	28/04/11	
585	Torre 03	OCEME	36,90	44,00	45,00	41,33	167,23	09/05/11	

Conforme projeto TRANSMISSORA (2010), as torres estaiadas são compostas por 04 estais denominado como: perna A, perna B, perna C e perna D, sendo que os cabos de aterramento seguem da base da torre com ângulo de 45° de abertura com lançamento do cabo de aterramento até a fundação do estai, seguindo em linha reta dentro dos limites da faixa de servidão da linha, os comprimentos de cada perna, estão mostrados na Tabela 4.6.



Figura 4.8 - Comprimento dos cabos de aterramento real e o especificados no projeto da - LT Oriximiná – Silves CD.

A Tabela 4.6, mostra as medições de aterramento de pé de torre com valores de $R(\Omega)$ maior do que 41Ω , portanto as torres 549, 565 e 585 da amostra deveriam ter sido construída conforme dados do projeto mostrado na Tabela 4.7, ou seja fase V, sendo: 480 metros de cabos de aterramento e 04 hastes de aterramento de 03 metros. A Figura 4.8 evidência que em média as torres foram construídas com 67,48% a menos de cabos de aterramento em comparação ao especificado no projeto.

O arranjo da torre 01, tem característica compacta para atender a locais em que o espaço é reduzido, seguido da torre 02 que possui distribuição ao centro da faixa, já o projeto do arranjo 03 possui incremento de tratamento de solo na distribuição dos cabos de aterramento e instalação de cabos perpendicular a faixa de servidão. Na Tabela 4.7 mostra os detalhes dos materiais utilizados na execução das soluções. A Tabela 4.7 a seguir detalha a quantidade de material utilizado em cada solução testada.

Tabela 4.7 - Lista de material utilizado para implementar metodologia nas torres da amostra.

Descrição do Material					
Item	Descrição do Material	Quantidade total por experimento e por torre			
		Torre 01	Torre 02	Torre 03	Total
1	Fio contrapeso de aço-cobre recozido 4AWG	210	120	120	450
2	Conector paralelo para fixação do cabo contrapeso a torre (Pés ou Mastros)	8	2	8	4
3	Conector paralelo para emendar dois cabos contra-peso 4AWG	8	2	8	14
4	Haste de aterramento de barra redonda prolongável de aço-cobreado diâmetro de 17,30mm, comprimento de 3000mm, com conector para fixação do fio contrapeso	8	0	8	16
5	Grampo paralelo para emendar o cabo de estai ao cabo contrapeso	4	0	4	12
6	Terra gel para tratamento do solo	0	0	72Kg	72Kg

4.1.4 - Implementação de solução 01 torre 565

Foi implementado na torre 565 a instalação de 08 hastes de aterramento interligadas por cabos de aterramento com comprimento total de 210 metros, conforme Figura 4.9, solução 01 para torres estaiadas. Para implementar esta solução há necessidade de realizar limpeza em toda a extensão da área da torre, aproximadamente de 3600 m² para implementar de forma circular os cabos de aterramento.

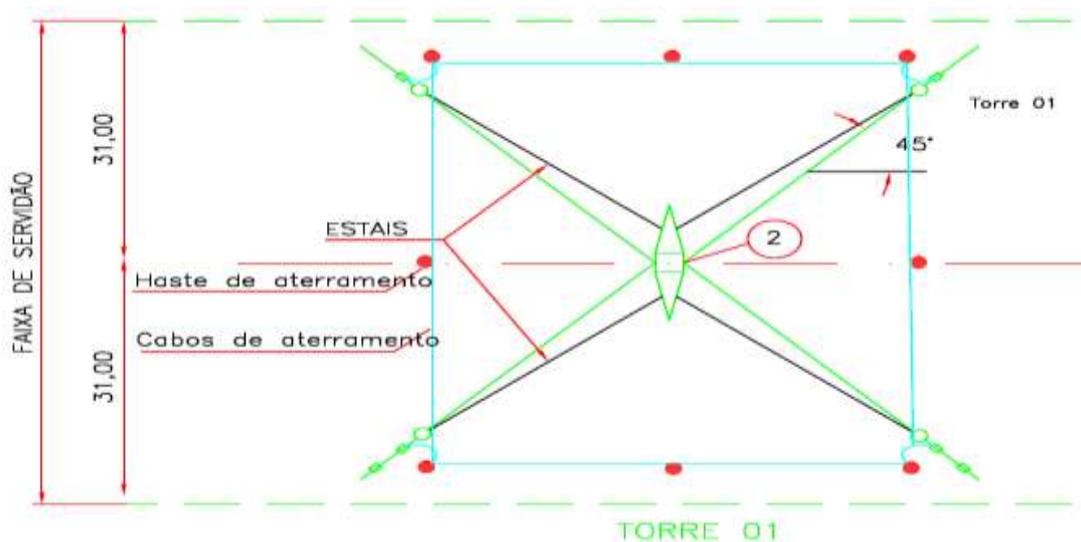


Figura 4.9 - Projeto da solução 01 para torres estaiadas.

4.1.5 - Implementação de solução 02 torre 549

Foi implementado na torre 549 a instalação de cabos de aterramento com comprimento total de 120 metros, conforme Figura 4.10 ,solução 02 para torres estaiadas. Implementar esta solução é de extrema complexidade em função da necessidade de área plana de 1500 m², neste aspecto o relevo predominante no traçado da linha é bastante acidentado.

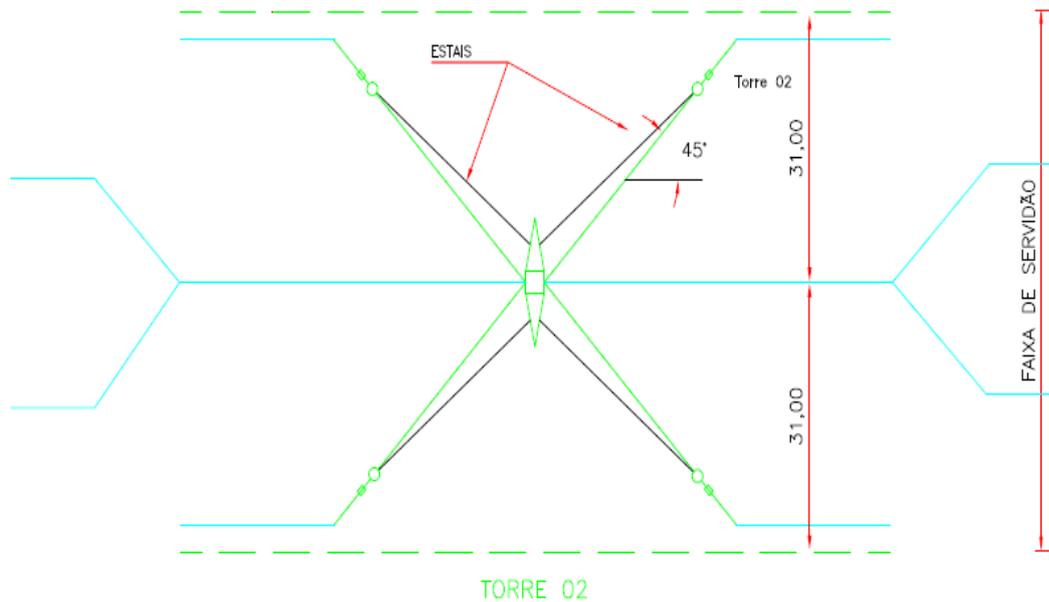


Figura 4.10 - Projeto da solução 02 para torres estaiadas.

4.1.6 - Implementação de solução 03 torre 585

Foi implementado na torre 585 a instalação de 08 hastes de aterramento interligadas por cabos de aterramento em formato radial, com comprimento total de 120 metros conforme Figura 4.11 solução 03 para torres estaiadas. Para implementar a solução foram necessários efetuar limpeza de uma área de 500 m², este arranjo possibilitou maior agilidade na instalação, mesmo sendo uma solução que demanda maior quantidade de material.

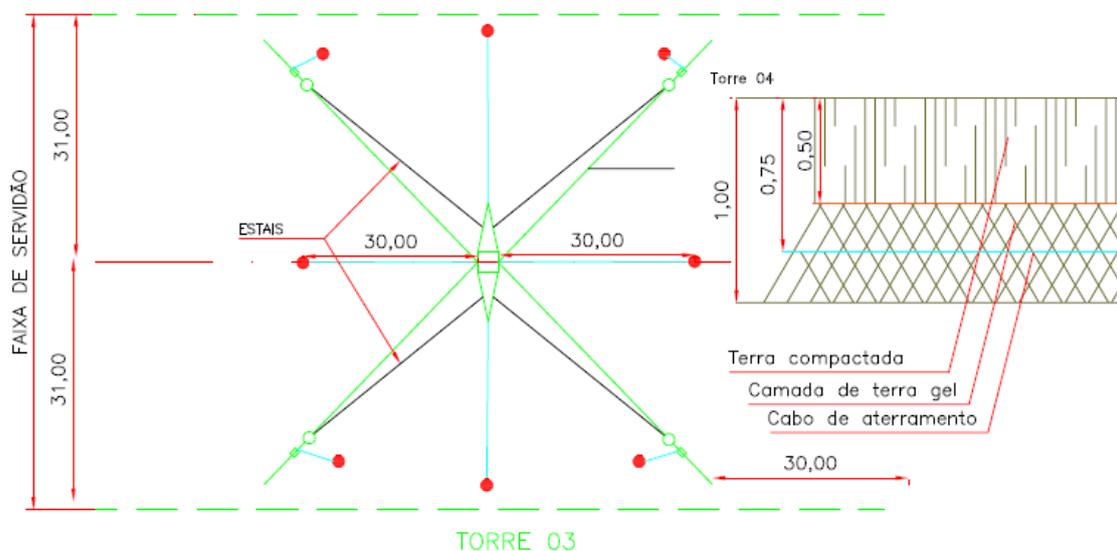


Figura 4.11 - Projeto da solução 03 para torres estaiadas.

4.1.7 - Execução dos trabalhos em campo

O acesso as torres em plena floresta amazônica é um desafio, assim como o transporte de maquinas, equipamentos e instrumentos para realizar os trabalhos. A equipe disponibilizada pela concessionária era composta por 06 colaboradores, 02 caminhonetes 4x4 e 01 retro escavadeira. O detalhamento do material utilizado está listado na Tabela 4.1. Os trabalhos foram realizados dentro dos limites da faixa de servidão respeitando os limites da licença de operação do empreendimento emitido pelos órgãos ambientais.

Limpeza foi realizada apenas da área da torre com a utilização da máquina retro escavadeira conforme mostra:



Figura 4.12 - Limpeza na área da torre de transmissão.

Na sequência a Figura 4.13, mostra a fase de realização de ensaios de resistência de aterramento antes de iniciar a implementação, assim como ao término da implementação da solução as medições foram realizadas novamente.



Figura 4.13 - Realização de ensaios de medição de resistência.

A Figura 4.14, mostra abertura das valas para instalação dos cabos de aterramento, as valas foram abertas de acordo com as dimensões a seguir: 1,0 m de profundidade por 0,3m de largura.



Figura 4.14 - Abertura das valas para implementação de cabos de aterramento.

Instalação dos cabos de aterramento, haste de aterramento e terra gel de acordo com a especificação em cada solução conforme segue:



Figura 4.15 - Instalação de cabos e hastes de aterramento, terra gel.

Fechamento das valas após a instalação dos cabos e hastes de aterramento conforme Figura 4.16, o solo foi compactado e semeado o solo com cements para recuperar o solo exposto.



Figura 4.16 - Fechamento das valas e compactação.

4.2 - IMPLEMENTAR SOLUÇÃO MAIS ADEQUADA VISANDO O CUSTO-BENEFÍCIO PARA CORREÇÃO DE DISTORÇÕES ENCONTRADAS NAS MEDIÇÕES

Efetuada medições antes de implementação das soluções do aterramento das torres 549, 565, e 585 da linha de transmissão LT Oriximiná/Silves CD 550kV, foi utilizado o medidor de resistência de aterramento por alta frequência (25 kHz) modelo Megabrás TM25m com certificado de calibração válido. Abaixo na Tabela 4.8 mostra os resultados das medições em ohm e o percentual de redução.

As medições foram registradas no protocolo de medição conforme Figura 4.17, estas segue a metodologia de medição por alta frequência, sendo os valores validados considerando uma variação entre os valores de S1, S2 e S3 seja menor do que 5%. A seguir na Figura 4.17 detalhes das medições antes e depois “R0” e “R1” respectivamente.

Teste Medição Resistência de Aterramento							
N°	N° Torre	Projeto	Teste	Valores Encontrados em (Ohms)			
				S1	S2	S3	Média
1	565	Solução Torre 01	R0 - Inicial	7,09	6,80	5,71	6,53
			R1 - Final	5,23	5,29	5,22	5,25
2	549	Solução Torre 02	R0 - Inicial	15,31	15,57	15,18	15,35
			R1 - Final	12,18	12,60	12,24	12,34
3	585	Solução Torre 03	R0 - Inicial	26,80	27,20	29,40	27,80
			R1 - Final	9,55	9,60	8,40	9,18

Disposição das Hastes de Medição											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Conexões</th> <th>Distância (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>S1</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>S2</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>S3</td> <td>70</td> </tr> </tbody> </table>	Conexões	Distância (m)	H	100	S1	50	S2	60	S3	70
	Conexões	Distância (m)									
	H	100									
	S1	50									
S2	60										
S3	70										
<p>--- Limite da faixa de sensibilidade E Eletrodo de conexão aterramento H Eletrodo de Injeção de Corrente S Eletrodo de Medição</p>											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Instrumento Utilizado</th> <th>Modelo</th> <th>N° Série</th> <th>Data Calibração</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Terrômetro Alta Frequência Megabrás</td> <td>TM 25m</td> <td>807087/19</td> <td>01/11/2019</td> </tr> </tbody> </table>	Instrumento Utilizado	Modelo	N° Série	Data Calibração	Terrômetro Alta Frequência Megabrás	TM 25m	807087/19	01/11/2019			
Instrumento Utilizado	Modelo	N° Série	Data Calibração								
Terrômetro Alta Frequência Megabrás	TM 25m	807087/19	01/11/2019								

Figura 4.17 - Protocolo de medição de resistência de aterramento.

A Figura 4.18 a seguir mostra o desempenho do sistema de aterramento implantando. Fica evidente a diferença entre as medições de resistência de pê de torre utilizando os métodos de baixa “R” e alta frequência “R0” e “R1”, sendo a mais

recomendada para análises posteriores a medição de alta frequência, método este desenvolvido neste experimento, o gráfico a seguir mostra o desenvolvimento das medições de resistência de terra durante a execução dos ensaios.

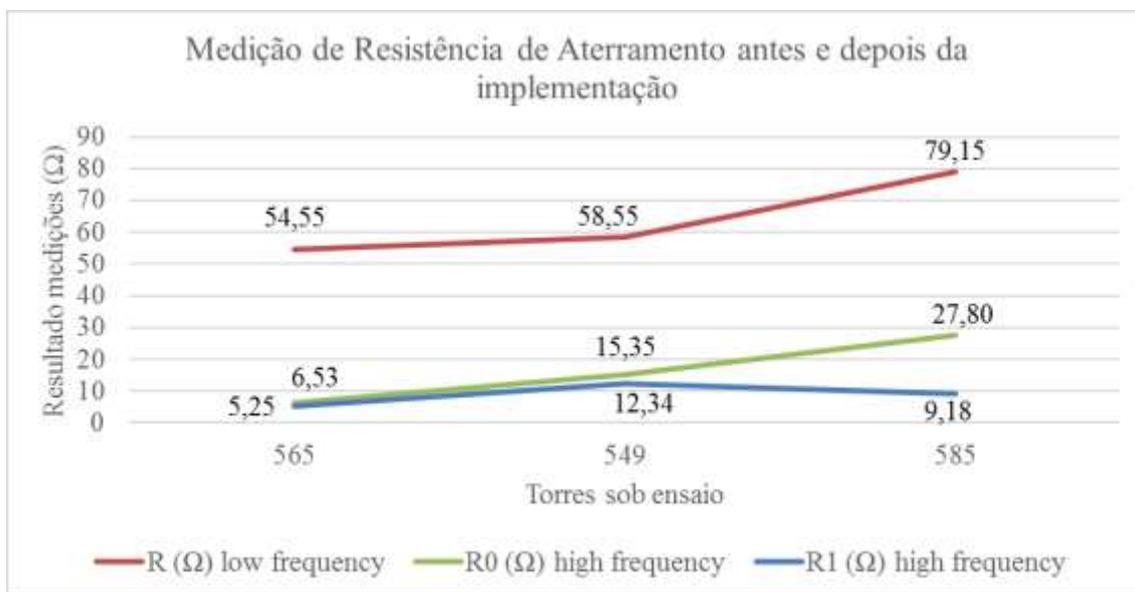


Figura 4.18 - Desempenho da implementação dos projetos de aterramento.

Seguindo análise dos dados, o gráfico 07 mostra os valores medidos de resistência de aterramento antes de efetuar a implementação da solução “R0”, bem como a medição posterior “R1”, nota-se uma redução expressiva, mesmo que os valores finais de “R1” com destaque para a solução da torre 585. A Tabela 4.8 mostra o custo e redução da resistividade de cada solução.

Tabela 4.8 - Tabela de análise de custo e viabilidade de implantação.

Medição de resistência de aterramento antes e depois da implementação				
N° Operação	Resistência Inicial (Ω)	Resistência Final (Ω)	Redução (Ω)	Percentual redução (%)
565	42,0	10	32	76,19
549	55	7	48	87,27
586	56	8	48	85,71
585	46	9	37	80,43

Além do custo de implantação que considerou os gastos com materiais, máquinas e mão de obra. Conforme Tabela 4.8, a solução da torre 565, referente a implantação de cabos de aterramento apenas, teve uma redução percentual de 19,60%, no entanto

necessita de uma área plana com necessidade de limpeza local maior do que as demais soluções o que dificulta a implementação em larga escala.

A solução implementada na torre 549 é mais compacta do que a anterior, assim sendo a área da base da torre suficiente para instalação, uma vez que os limites de instalação estão entre os estais da torre A, B, C e D. No entanto é necessário efetuar a limpeza de toda a vegetação da base da torre para possibilitar abertura das valas de forma circular, o custo de implanta é mais baixo em função da quantidade de material e o percentual de redução da solução foi de 19,61% bem próximo a solução anterior.

Para a solução da torre 585, foi implementado cabos de aterramento de forma radial partindo da base da torre no sentido da faixa de servidão e longitudinal a faixa de servidão com hastes no final de todos os cabos, foi adicionado nos cabos novos tratamento de solo com terra gel. Esta implementação teve resultado com redução de 66,98%, o melhor resultado entre as soluções, aliado a este a área de limpeza da vegetação é somente o caminho de lançamento dos cabos, assim facilitando a sua implementação. Os comprimentos dos cabos de aterramento estão no limite dos estais da torre A, B, C e D, esta é uma área existente em todas as torres, assim possibilita a instalação em larga escala.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais causas dos desligamentos da linha de transmissão frente as impedâncias de aterramento do solo investigado, são decorrentes as altas resistividades do solo onde a linha de transmissão foi construída, a mesma apresenta 46,67% das resistividades do solo consideradas críticas e necessitam de aterramento especiais.

A qualidade do aterramento de torres da linha de transmissão LT Oriximiná/Silves CD 550kV, após instalados apresentaram 81% das torres possuem resistência de aterramento superior a 41Ω que segundo o projeto requer aterramento da fase V, no entanto conforme evidenciado na lista de construção, este responsável pelos registros de como construído do aterramento, 95% dos aterramentos das torres estão com aterramentos inadequados, o que prejudica o desempenho da linha frente as descargas disruptivas provenientes de descargas atmosféricas.

Ficou constatado que as torres da amostra: 549, 565 e 585 que foi diagnosticada com valores de resistência de aterramento elevados pela manutenção da concessionária e na fase de análise de projeto ficou evidente que as mesmas deveriam ter sido aplicado na sua construção aterramento da fase V, o que não ocorreu, este uma das causas do elevado valor de resistência de aterramento das referidas torres.

Para implementação de aterramento na linha de transmissão na floresta amazônica, um dos critérios é a viabilidade de implantação do solo, sendo o mesmo bastante irregular, dessa forma favorece a implantação de sistemas de aterramentos mais compactos que demandam de pouco espaço e área placa para implantação. A questão ambiental também se torna fator preponderante, uma vez que a concessionária tem obrigações legais regidas pela licença de operação que delimita a área de manutenção das torres, desta forma são vedadas quaisquer intervenções que violem os limites das faixas de servidão, além disso existe a necessidade de intervenção mínima na vegetação da faixa de servidão.

Considerando os fatores de custo de implementação, viabilidade técnica ambiental, abrangência da solução para demais estruturas da linha e percentual de redução da implementação, conclui-se que a solução mais adequada para implementar uma solução mais robusta de aterramento nas torres da linha de transmissão é a solução 03 testada na torre 585 com redução de 66,98%.

Para continuidade deste trabalho, recomenda-se teste e implantação em estruturas alto portante do projeto e de outras linhas de transmissão. Há necessidade também de implementar teste de continuidade dos cabos de aterramento existentes, uma vez que eles podem não estar em bom estado de funcionamento ou até mesmo não ter sido instalado de forma adequada na fase de construção da linha de transmissão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIPIO, R. *et al.* Grounding modeling using transmission line theory: Extension to arrangements composed of multiple electrodes. **2016 33rd International Conference on Lightning Protection**, 2016.

ANDERSON DE ARAUJO, R. J. *et al.* Lightning-induced surge in transmission towers calculated using full-wave electromagnetic analysis and the method of moments. **2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2018 - Proceedings**, p. 943–948, 25 jan. 2019.

ANEEL. **Relatório de Análise de Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão - Edição 2018.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília - Brasil: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 25 de junho de 2020, 16h.

AQUINO, R. M. DE. **Parcela Variável das Funções de Transmissão da Rede Básica e o seu Impacto na Operação do Sistema Elétrico.** [s.l: s.n.].

ARAÚJO, A. R. J. **Uma proposta de representação de torres de linhas de transmissão diretamente no domínio do tempo.** [s.l: s.n.].

BERARDO, B. L. **Estudo do aterramento dos pés de torres de linha de transmissão frente às descargas atmosféricas.** [s.l: s.n.].

CAETANO, C. E. F. *et al.* A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding: Full-scale measurements. **34th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2018**, 2018.

CASCARDO CARDOSO, M. **Determinação em tempo real dos riscos de desligamentos em linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas.** Rio de Janeiro, Brazil: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2 out. 2017.

CHIHEB, S. *et al.* Impedance nature of long horizontal grounding electrode employing TLM. **Proceedings of 2018 3rd International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2018**, p. 1–4, 2019.

DEIN, A. Z. E.; YASSIN, S. The frequency effect on transient impedance of horizontal grounding electrode. **2017 19th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2017 - Proceedings**, v. 2018-Febru, n. December, p. 1177–

1182, 2018.

DENTEL, L. M. *et al.* **Modelagem de sistemas de detecção de descargas atmosféricas na Amazônia.** [s.l: s.n.].

DOS SANTOS, A. P. P. **Eventos extremos de descargas atmosféricas no estado de São Paulo: casos observados e cenários futuros.** [s.l: s.n.].

FENG, Z.; LU, L.; FENG, J. Research on reducing grounding resistance of transmission line tower grounding grid. **2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2011 - Proceedings**, p. 1216–1219, 2011.

GAO, S. *et al.* Numerical analysis of the dynamic effects of wine-cup shape power transmission tower-line system under ice-shedding. **Structures**, v. 24, n. December 2019, p. 1–12, 2020.

HU, P.; FAN, W. L. Mitigation strategy against cascading failures considering vulnerable transmission line in power grid. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 540, p. 123230, 2020.

LIU, Y.; ZITNIK, M.; THOTTAPPILLIL, R. An improved transmission-line model of grounding system. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 43, n. 3, p. 348–355, ago. 2001.

MANAUS TRANMISSORA. **Projeto de Linhas de Transmissão**, 2010.

NASCIMENTO, JÚLIO A. S. DO, D. M. F.; *et al.* Redução de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas na Cadeia de Isoladores de Torres de Transmissão Através de Melhorias no Sistema Aterramento e do uso de Falsos-Estais. **XXIV SNPTEE**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2017.

NOGUEIRA, P. J. C. **Influência da estratificação do Solo na impedância” “impulsiva de aterramentos de linhas de transmissão.** Minas Gerais: [s.n.].

OLIVEIRA, C. H. D.; VISACRO, S.; GUIMARÃES, M. Experimental impulse response of transmission-line tower-footing electrodes. v. 1, n. 1, p. 234–237, 2018.

ONS. Acompanhamento de manutenção : visão geral. **Procedimentos de Rede**, p. 1–6, 2016.

PAULINO, J. O. S. Melhoria do desempenho de linhas de transmissão de alta tensão através da utilização de malhas de aterramento de baixo valor de impedância. 2009.

PEREIRA, C. S. *et al.* **Processo de attachment, densidade de raios e a ocorrência de flashover em linhas de transmissão de eletricidade.** [s.l: s.n.].

SAFAIE, E. *et al.* **Otimização da detecção de Formas de onda de campos eletromagnéticos emitidos por descargas atmosféricas.** [s.l: s.n.].

SAHANI, M.; DASH, P. K. Fault location estimation for series-compensated double-circuit transmission line using parameter optimized variational mode decomposition and weighted P-norm random vector functional link network. **Applied Soft Computing Journal**, v. 85, n. xxxx, p. 105860, 2019.

SANTOS, L. S. DOS *et al.* **Estudos dos efeitos das descargas atmosféricas nos índices de desempenho da subestação de Vila do Conde e subestação de Marabá.** [s.l: s.n.].

SYLVIO PEREIRA, L. B. O Emprego Industrial na Região Norte: O caso do Polo Industrial de Manaus. v. 28, n. 81, p. 141–154, 2014.

TRAMISSORA, M. **Relatório Técnico - Manaus Transmissora S.A.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.evoltz.com.br/>> Acesso em: 14 de outubro de 2020, 15h45mim.

TRAMISSORA, M. **Projeto Básico de Coordenação do Isolamento LT-452-008.** [s.l: s.n.].

TRAMISSORA, M. **Especificações Técnicas para Medições de Resistividade do Solo e de Resistência de Aterramento das Estruturas - MTS-800-23001-ET.** [s.l: s.n.].

VASCONCELLOS, F. M. **Avaliação e dimensionamento de sistemas de aterramento para redução de desligamentos de linhas de transmissão por backflashover.** [s.l: s.n.].

VISACRO, S. Lightning Performance of Grounding of Overhead Power Distribution Lines. **IEEEJ Transactions on Power and Energy**, v. 134, n. 2, p. 91–94, 2014.

VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires.

IEEE Transactions on Power Delivery, v. 31, n. 4, 2016.

WARMI, Y.; MICHISHITA, K. **Investigation of lightning tripouts on 150-kV transmission lines in West Sumatra in Indonesia****IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering** John Wiley and Sons Inc., , 1 set. 2016.

WU, S.; SUN, W. **Back flashover protection performance analysis of 220kV double circuit transmission line**. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC. **Anais...**2011.

YUTTHAGOWITH, P.; KUNAKORN, A. **Design of counterpoise grounding electrodes for transmission towers in high soil resistivity area**. 34th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2018. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 23 out. 2018.