

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Faculdade de Engenharia de Bauru

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

ESTUDO DO ATERRAMENTO DOS PÉS DE
TORRES DE LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE
ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

BENÍCIO LUIZ BERARDO

Bauru

2012

BENÍCIO LUIZ BERARDO

ESTUDO DO ATERRAMENTO DOS PÉS DE
TORRES DE LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE
ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Dissertação apresentada como requisito final
à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós –
Graduação em Engenharia Elétrica, da
Faculdade de Engenharia de Bauru, da
Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. ANDRÉ CHRISTÓVÃO PIO MARTINS
Co-orientador: Prof. Dr. ANDRÉ NUNES DE SOUZA

Bauru
2012

Berardo, Benício Luiz.

Estudo do Aterramento dos Pés de Torres de Linhas
de Transmissão frente às Descargas Atmosféricas /
Benício Luiz Berardo, 2012

58 páginas

Orientador: André Christóvão Pio Martins

Dissertação - Universidade Estadual Paulista.

Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2012

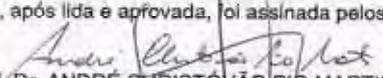
1. Linha de Transmissão 2. Descargas Atmosféricas

3. Contrapesos I. Universidade Estadual Paulista.

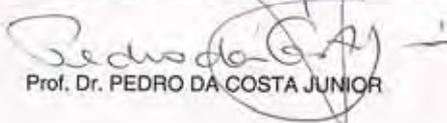
Faculdade de Engenharia de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE BENÍCIO LUIZ BERARDO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de fevereiro do ano de 2012, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRÉ CHRISTÓVÃO PIO MARTINS do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta - UNESP, Prof. Dr. PEDRO DA COSTA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de BENÍCIO LUIZ BERARDO, intitulado "COMPORTAMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE 88KV FRENTE À INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. ANDRÉ CHRISTÓVÃO PIO MARTINS


Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA


Prof. Dr. PEDRO DA COSTA JUNIOR

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

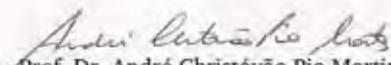
A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO ALUNO: **BENÍCIO LUIZ BERARDO**

DE: "COMPORTAMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE 88 KV FRENTE À INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS"

PARA:

ESTUDO DO ATERRAMENTO DOS PÉS DE TORRE DE LINHA
DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Bauru, 03 de fevereiro de 2011


Prof. Dr. André Christóvão Pio Martins
Orientador

Dedico este trabalho com todo carinho
à minha esposa e aos meus filhos que
sempre me incentivaram para que eu
alcançasse este objetivo.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por estar sempre comigo, me dar forças e me guiar nos momentos cruciais de minha vida.

Agradeço imensamente ao professor André Christóvão Pio Martins, meu orientador, por sua significativa participação neste texto, por transferir seu valioso conhecimento desde o primeiro dia de aula deste mestrado, por sua dedicação em me orientar, por sua paciência, e por estar sempre me incentivando a alcançar este objetivo.

Agradeço muito ao professor André Nunes de Souza, meu co-orientador, por sua orientação, por sua disponibilidade em me atender, principalmente na elaboração final de meu artigo e por ter sempre uma palavra de incentivo.

Também agradeço ao professor Paulo Sérgio da Silva pela sua contribuição durante o exame de qualificação.

Meus agradecimentos aos professores Oscar A. M. Astorga, Pedro da Costa Jr. pelas importantes considerações quando da minha defesa.

Não poderia deixar de agradecer ao meu vizinho e amigo Alfredo Ulson que foi um dos primeiros a me incentivar a fazer este mestrado.

Meus agradecimentos aos professores Paulo Serni, Leonardo Nepomuceno, Paulo Aguiar e Bento Rodrigues da Pós Graduação de Engenharia Elétrica que também contribuíram numa etapa deste mestrado.

Meus agradecimentos aos funcionários das secretarias do Departamento e da Pós Graduação de Engenharia Elétrica da UNESP Bauru que sempre me atenderam com carinho e dedicação.

Meus Agradecimentos aos amigos de mestrado Luis Fabiano, Ricardo Torrezan, André Vergílio, Maria Cláudia, Caio Cesar, Danilo, Manoel Porcino, Lino Timóteo, Rodolfo Biazon, Antônio Carlos Sartin, Edson Luciano.

Também merece um agradecimento especial meu amigo Fernando Fraissat que foi quem inicialmente me incentivou a fazer este mestrado.

Agradeço ao meu gerente e amigo Gianfranco pelo apoio e compreensão que foram muito importantes para que pudesse concluir esta Pós graduação.

Meus agradecimentos ao Fabiano por sua valiosa contribuição neste trabalho.

Agradeço também ao Wladimir por seu apoio e contribuição neste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos Alexandre, Adão, José Raimundo, José Sérgio, Leandre, Marcos Cezar e Paulo Sérgio que me ajudaram nas medições em campo.

Agradeço ao José Eduardo pelas contribuições neste trabalho.

Agradeço também as pessoas que de alguma forma me ajudaram a alcançar este objetivo.

Agradeço muito minha mãe Ofélia e minha irmã Leda Maria por sempre me incentivarem e acreditarem em minha capacidade.

Agradeço ao meu pai Pedro Berardo pelos seus ensinamentos, pelo amor ao próximo e por sua ética que sempre nortearam minha vida.

Não poderia deixar de agradecer meus filhos: Benício Júnior, Bruno e Pedro Guilherme pelo carinho e compreensão nos momentos de ausência.

Agradeço imensamente minha esposa Maria pelo amor, dedicação, incentivo e cumplicidade, que foram fundamentais para que eu alcançasse este objetivo.

Resumo

Este trabalho mostra o estudo de uma linha de transmissão onde ocorreram desligamentos causados por descargas atmosféricas. Esse estudo foi feito a partir de informações de desligamentos de linhas de transmissão da concessionária e dados extraídos de um sistema de análise e monitoramento de descargas atmosféricas. Para esse trecho da linha de transmissão foram identificadas incidências de descargas atmosféricas que causaram desligamentos, bem como descargas que não causaram desligamentos. Baseados nestas informações foram efetuadas medições em campo da resistência de aterramento dos contrapesos e da resistividade do solo, onde foi possível constatar através dos resultados que algumas torres apresentaram valores que ultrapassaram os valores normatizados. O levantamento dessas informações é o principal foco deste estudo, que visa fornecer subsídios para a identificação de torres problemáticas. Uma proposta clássica utilizada para melhorar o desempenho desta linha de transmissão frente à incidência de descargas atmosféricas foi testada mas seu resultado não foi muito satisfatório.

Palavras-chave: Linha de Transmissão, Contrapesos, Descargas Atmosféricas, Resistividade do Solo, Resistência de Aterramento.

Abstract

This paper shows the study of a transmission line where outages occurred because of lightnings. The study was made from information that came from the power utility transmission line disconnection and data obtained from lightnings analyses and monitoring system. For this part of the transmission line it was identified incidence of lightning that caused outages, as well as incidences that did not cause outages. Based on this information, it was performed field measurements of ground resistance counterpoise and soil resistivity where it was possible to find, trough the results that some of the towers present numbers trespassed the normal values. Coming up with this information is the main goal of this study that aims to offer aids to identify the towers that contains problems. A classical proposal used to improve the performance of this transmission line facing the incidence of lightnings was tested but the result wasn't very satisfactory.

Keywords: Transmission Line, Counterpoise, Lightning, Soil Resistivity, Ground Resistance,

Lista de Ilustrações

Figura 3.1. Descargas atmosféricas atingindo o solo ou componentes da LT	29
Figura 4.1. Torre SS (Suspensão)	33
Figura 4.2. Disposição dos contrapesos	34
Figura 4.3. Diagrama da LT	35
Figura 4.4. Percurso da linha PRP/ASS	38
Figura 4.5. Descargas atmosféricas ocorridas no período de 17/01/11 a 21/01/11 nas proximidades da linha PRP/ASS	39
Figura 4.6. Descargas atmosféricas próximas a linha de transmissão	41
Figura 4.7. Esquema de ligação dos eletrodos para medição de resistência de aterramento	44
Figura 4.8. Esquema de ligação em instrumento para medição de resistência de aterramento	45
Figura 4.9. Esquema de ligação dos eletrodos para medição de resistividade do solo	49
Figura 4.10. Equipe executando medições de resistência de aterramento e resistividade de solo	52
Figura 4.11. Acessórios utilizados nas medições em de resistividade de solo e resistência de aterramento	52
Figura 4.12. Haste conectada ao contrapeso	53
Figura 4.13. Haste instalada na torres 452	53

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 Comprimento do Contrapeso	28
TABELA 4.1 Ranking de níveis isocerânicos dos municípios percorridos pela LT	36
TABELA 4.2 Desligamentos na LT de 88 kV PRP/ASS	40
TABELA.4.3 Descargas atmosféricas em 2011 que não provocaram o desligamento da linha de transmissão.....	42
TABELA 4.4 Descargas atmosféricas que não provocaram o desligamento da LT	43
TABELA 4.5 Resultados das medições de resistência de aterramento vãos 452 a 465	47
TABELA 4.6 Resultados das medições de resistência de aterramento vãos 340 a 348	48
TABELA 4.7 Resultados das medições de resistividade do solo próximo a torre 452	50
TABELA 4.8 Resultados das medições de resistividade do solo próximo a torre 463	51

Abreviaturas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LT - Linha de Transmissão de Energia Elétrica

ONS - Operador Nacional do Sistema

SIN - Sistema Interligado Nacional

Sisraios - Sistema Integrado de Monitoramento e Análise de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

SIMEPAR - Instituto Tecnológico do Paraná (Sistema Meteorológico do Paraná)

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Motivação	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivo	17
2	Pesquisa bibliográfica	19
3	Sistema de aterramento em torres de linhas de transmissão	27
3.1	Dinâmica dos desligamentos em linhas de transmissão causados por descargas atmosféricas	28
3.1.1	Incidência indireta	30
3.1.2	Incidência direta	30
3.2.3.1	<i>Flashover</i>	30
3.2.3.2	<i>Bachflashover</i>	31
4	Análises da linha de transmissão	32
4.1	Introdução	32
4.2	Linha de transmissão de 88 kV Presidente Prudente/Assis	32
4.3	Contrapeso	33
4.4	Diagrama da LT	34
4.5	Níveis isocerânicos	35
4.6	Sistema integrado de monitoramento e análise de descargas atmosféricas em linhas de transmissão	36
4.6.1	Aplicação do SisRaios	37
4.6.2	Desligamentos provocados por descargas atmosféricas	39
4.6.3	Descargas atmosféricas que não provocaram desligamento da LT	41
4.7	Medições de resistência de aterramento	44
4.7.1	Procedimento utilizado	44
4.7.2	Preparativos para medições	45
4.7.3	Procedimentos para medições	46
4.7.4	Resultados das medições de resistência de aterramento	46
4.8	Medições de resistividade do solo	48
4.8.1	Método utilizado	48
4.8.2	Resultados das medições de resistividade do solo torre 452	50

4.8.3	Resultados das medições de resistividade do solo torre 463	50
4.9	Resultado da medição de resistência de aterramento após a instalação de hastes de aterramento na torre 452	51
4.10	Fotos das medições efetuadas em campo	52
5	Considerações finais e trabalhos futuros	54
	Referências	55

1. Introdução

1.1 Motivação

A CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista é a maior concessionária privada de transmissão de energia elétrica em atuação no País, responsável pela transmissão de quase 100% da energia elétrica produzida no estado de São Paulo, o que corresponde a cerca de 30% da energia transmitida pelo Sistema Interligado Nacional (SIN). O sistema elétrico da CTEEP, por sua vez, é composto por uma rede com 12.283 quilômetros de linhas aéreas. Esse sistema possibilita o transporte de energia desde os pontos de conexão com as empresas geradoras e interligações com outras transmissoras até a rede das concessionárias distribuidoras, que atendem aos consumidores finais de energia elétrica (CTEEP 2012).

O Brasil é, atualmente, o país com a maior incidência de raios no mundo, de acordo com o ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Caem no Brasil, em média, cerca de 50 milhões de raios por ano. Estas descargas atmosféricas causam um prejuízo em torno de R\$ 500 milhões a R\$ 600 milhões por ano ao setor elétrico brasileiro, segundo apurou o ELAT. As concessionárias de energia elétrica são atingidas por danos em seus equipamentos, por indenizações e penalizações as quais estão sujeitas pelos órgãos reguladores.

O Brasil é um país com grande extensão territorial e a principal matriz energética é hidráulica, e geralmente, estas fontes geradoras estão situadas bem distantes dos grandes centros consumidores. A consequência disso é a necessidade de construção de linhas de transmissão bastante extensas para transportar a energia gerada até as grandes cidades de nosso país.

A conjunção destes dois fatores: linhas de transmissão extensas e grande números de incidência de descargas atmosféricas tem se tornado de fundamental importância para estudos sobre a influência dos aterramentos das linhas de transmissão frente à incidência de descargas atmosféricas, bem como a busca incessante pela melhoria contínua de desempenho e confiabilidade do setor elétrico no Brasil.

1.2 Justificativa

A necessidade de modernização do sistema de transmissão tem levado as concessionárias do setor elétrico nacional a executar a recapacitação ou recondutoramento em suas linhas de transmissão. Estas medidas visam melhorar as condições de operação destas linhas de transmissão, seja nos aspectos de carregamento e desempenho destas diante da ocorrência de faltas, entre as quais, as provenientes de descargas atmosféricas.

Na CTEEP existem algumas linhas que não passaram por este processo de modernização, enquanto isto não ocorre medidas podem ser adotadas para melhorar seu desempenho. Uma dessas linhas é a Presidente Prudente – Assis de 88 kV, que será abordada nesse estudo.

A linha de transmissão estudada possui 131,5 km de extensão, 496 torres, passando por nove municípios, iniciando-se no município de Presidente Prudente e terminando em Assis. Nesta linha de transmissão existem algumas torres que possuem resistência de aterramento acima do valor normatizado de 20 Ohms, isto pode ter ocorrido por deterioração do material ao longo dos anos, por análise inadequada das camadas do solo na fase inicial de projeto ou ainda na fase final de comissionamento.

Existem ocorrências de desligamentos ao longo da linha de transmissão em que não é possível identificar a causa exata, mesmo após a análise no sistema de monitoramento de descargas atmosféricas e execução de inspeções em campo. Isto torna mais difícil a adoção de medidas adequadas para sanar ou até mesmo prevenir problemas futuros.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados do estudo da influência dos valores de resistividade de solo e resistência de aterramento, nos desligamentos de uma linha de transmissão quando da ocorrência de descargas atmosféricas. Com esta finalidade será feita uma análise dos valores encontrados e do mapeamento de descargas atmosféricas ocorridas nas proximidades das torres da linha de transmissão. Através dos valores da corrente de descarga atmosférica, da distância à linha das torres mais próximas, além dos valores medidos ou fornecidos para a melhoria de desempenho, que apesar de conhecidos, ficam justificados pelas medições. Este estudo servirá para levantamento de referências para o desenvolvimento de técnicas inteligentes (sistemas especialistas, redes neurais, etc.) que

permitam localizar as torres problemáticas e tomar medidas de readequação de suas resistências de aterramento. Uma ferramenta que permita identificar com precisão as torres problemáticas é bastante conveniente dado a quantidade de torres (33.000 torres apenas da CTEEP) e as possíveis dificuldades de acesso às mesmas.

2. Pesquisa bibliográfica

DWIGHT(1930) apresentou cálculo bem conhecido do grau de proteção de uma linha de transmissão pelos cabos de aterramento na hipótese de desaparecimento repentino do gradiente potencial vertical causado por uma nuvem carregada. Serão apresentadas fórmulas para o índice de proteção devido a um e dois cabos para-raios. É mostrado que para qualquer número de cabo para-raios, não é necessário calcular a carga sobre os condutores de energia.

FORTESCUE (1934) mostrou que os contrapesos são recomendados para a proteção de linhas de transmissão de energia elétrica contra danos causados por descargas atmosféricas onde outros métodos não reduzem a impedância contra surtos nos pés das torres a níveis desejados. Os contrapesos paralelos a linha de transmissão demonstraram ser mais eficientes. Além disso, três princípios foram estabelecidos: configuração adequada dos cabos para-raios para blindagem dos cabos condutores contra a incidência direta de descargas atmosféricas; a importância de manter em valores baixos a resistência dos pés de torres ou impedância contra surtos em todas as torres; coordenação de isolamento com distância adequada entre torre e condutor considerando a deflexão causada pela ação do vento, ou seja, distância suficiente no meio do vão entre os cabos condutores e os cabos para-raios para prevenir arco entre estes quando ocorrer uma descarga atmosférica no meio do vão.

HOLBECK e LANTZ(1934) apresentaram alguns dos problemas encontrados na determinação de correntes de falta desequilibrada e os resultados incomuns que podem ser esperados em sistemas com linhas paralelas. Uma correção de resultados é necessária para que os estudos de coordenação e aplicação de relés possam ser realizados. Estudos de faltas devem ser feitos e constantemente revistos, uma vez que mudanças no sistema de potência e expansões ocorrem frequentemente.

HANSSON e WALDORF (1942) mostraram que a proteção contra descargas atmosféricas, envolve a instalação de cabos para-raios e a coordenação de isolamento da resistência de aterramento das torres, podendo desta forma serem eficazes na prevenção de *flashovers* frente às descargas atmosféricas.

Em seu artigo DWALIBI e BAISHIKI(1984) destacam trechos recentes e principais do Projeto de Pesquisa em Aterramento de Linhas de Transmissão do EPRI. Um método generalizado para analisar aterramento da linha de transmissão é descrito. O programa de computador capaz de fazer a manipulação de cenários complexos de aterramento é introduzido. Resultados computacionais estão de acordo com dados reais simulando medições, falha e teste realizado no âmbito do escopo deste trabalho de investigação. Uma abordagem generalizada para aterramento de linhas de transmissão foi desenvolvida. Sistemas complexos de aterramento enterrados em duas camadas de solos podem ser analisados, usando o programa interativo de computador ou uma série de curvas de projeto baseado no desenho com configurações padrão. Os resultados típicos e exemplos de projeto foram apresentados para ilustrar a aproximação. Por fim, é mostrado que os resultados teóricos estão em boa concordância com medições realizadas nos testes.

FARIA (1992) investigou se a não-uniformidade da condutividade do solo e resistências em pés de torres ao longo da linha de transmissão de energia pode levar à supressão dos efeitos de ressonância. A simulação dos resultados obtidos apontam para uma conclusão negativa. Um estudo recente demonstrou que os efeitos da ressonância de alta frequência, devido ao escudo formado pelos cabos para-raios, são suprimidos quando a não-uniformidade de comprimentos é levada em conta. Neste trabalho, a existência ou não de outros tipos não-uniformes existentes também podem causar a supressão de ressonância. Resultados de simulação mostram que flutuações na condutividade elétrica do solo e resistência do pé de torre ao longo da linha, sozinho, por si só, não destroem os efeitos de ressonância.

DVORAK (1997) avaliou métodos básicos utilizados em manutenção de linhas de transmissão. Os resultados foram avaliados para verificar a efetividade dos métodos de aterramento, além de determinar os cuidados necessários para mitigar os perigos advindos do choque elétrico, que pode existir durante faltas fase-terra nas atividades em campo. Uma maneira de mitigar os riscos elétricos é evitar o máximo possível contato com qualquer estrutura aterrada ou de sistemas de aterramento. Manter afastadas as pessoas não autorizadas das estruturas aterradas ou dos sistemas de aterramento durante a execução de trabalhos em campo.

De acordo com HE et al (1998) que analisaram a relação entre as curvas da resistividade do solo e a resistência de aterramento, estas curvas podem ser divididas em três regiões de acordo com a resistividade do solo. Quando a resistividade do solo é menor que

500 Ω .m, o solo tem boa condutividade, e a resistência de aterramento quando submetida a impulso que cresce rapidamente e linearmente com a resistividade do solo. Na região de resistividade do solo entre 500 Ω .m a 3.000 Ω .m, a resistência de aterramento a impulso aumenta lentamente com a resistividade do solo e a relação entre estes não é linear. Quando a resistividade é maior que 3.000 Ω .m a resistividade do solo aumenta lentamente e a relação entre eles é linear. A resistência de aterramento a impulso tem uma saturação. Quando a resistividade do solo é menor que 500 Ω .m temos a melhor condutividade do solo e, conseqüentemente, a corrente se dispersa para a terra mais facilmente.

Em CHOWDHURI et al (2003) foram apresentados dados estatísticos de diversos pesquisadores dos parâmetros mais importantes de descargas atmosféricas. Entre eles foram citados: corrente de pico, forma de onda e velocidade de retorno da descarga atmosférica. As descargas atmosféricas podem ser positivas ou negativas. As primeiras descargas atmosféricas negativas têm sido consideradas as mais prejudiciais a isolação de uma linha de transmissão. As descargas negativas subsequentes possuem as mais baixas correntes de pico, mas as mais curtas frentes de onda. Estas descargas podem causar danos ao sistema de isolação em determinadas situações, principalmente quando há baixa resistência de aterramento e as torres são mais altas. Descargas positivas têm aproximadamente um mesmo valor médio de corrente que as primeiras descargas negativas e frentes de onda mais longas. Entretanto os valores extremos da corrente das descargas positivas tendem a ser mais altos que as negativas. As descargas positivas também podem causar danos devido à maior corrente e conseqüentemente maior aquecimento devido ao efeito joule.

KUROKAWA et al (2005) mostraram em seu artigo o processo genérico de redução do contrapeso para uma linha de transmissão aérea específica de 440 kV. Em seguida, a influência do processo de redução do contrapeso considerando-se duas situações: primeiro, considerando a independência da frequência e depois quando estes parâmetros são considerados como dependentes da frequência. Este trabalho mostrou que a presença de contrapeso contínuo com fios longitudinais altera os parâmetros das linhas de transmissão aéreas.

A influência dos contrapesos foi inicialmente apresentada para uma linha de transmissão genérica assumindo tensão zero ao longo do contrapeso. A longitudinal por unidade da matriz de impedância foi obtida após a redução dos contrapesos considerando uma representação implícita destes e é denominada matriz de impedância reduzida. Mostrou se matematicamente os resultados que a representação implícita dos contrapesos altera a matriz

de impedância longitudinal por unidade onde inicialmente os contrapesos foram explicitamente representados. O cálculo da matriz reduzida de uma linha de transmissão hipotética, onde o solo tem uma condutividade infinita e a fase e os contrapesos são condutores ideais, mostraram que a representação implícita dos contrapesos transformam parâmetros de frequência independente em parâmetros de frequência dependente. Neste caso, há também o aspecto das resistências mútuas que não estavam presentes quando a representação explícita dos contrapesos foi considerada.

De acordo com HE et al (2005) quando uma corrente de impulso alta atinge o sistema de aterramento de uma torre, esta pode provocar a ionização do solo através de seus condutores de aterramento. Esta corrente possui características tipicamente não-lineares.

SOARES et al (2005) apresentaram algumas simulações computacionais com transitórios eletromagnéticos causados por descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Neste trabalho foram considerados diferentes comprimentos dos contrapesos e diferentes valores de resistividade de solo, demonstrando assim, a acentuada eficácia dos contrapesos. Foi demonstrado que uma maior amplitude de sobretensão pode acarretar o rompimento da isolação através da cadeia de isoladores superior ou inferior, dependendo do comportamento dos pés da torre em relação à incidência de descargas atmosféricas. Além disso, foi constatada a pouca influência das torres adjacentes para a mitigação de sobretensões na torre central.

ZENG et al (2006) constataram que os sistemas de aterramento são simplesmente tratados como resistências aglomeradas com valores constantes na análise de transitórios causados por descargas atmosféricas em uma subestação tradicional. Um modelo linha de transmissão conectada propõe-se a analisar o processo real dos transitórios da rede elétrica, da malha de aterramento da subestação e os dispositivos de aterramento das torres de transmissão. Um modelo de perdas da linha de transmissão com parâmetros de tempo variável é proposto para calcular as características transitórias de sistemas de aterramento sob descargas atmosféricas, onde o fenômeno de ionização do solo em torno dos condutores de aterramento é considerado. Os resultados analisados pelo modelo proposto têm grandes diferenças com aqueles obtidos pelo método tradicional simplificado. As características transitórias de sistemas de aterramento têm forte influência sobre descargas transitórias no processo da subestação.

YADEE e PREMRUDEEPREECHACHARN (2007) estudaram os efeitos da resistência de aterramento dos pés de torres quando ocorre *backflashover* em cadeia de

isoladores. Este estudo incluiu a amplitude e o tempo de frente de onda das descargas atmosféricas em torres de linhas de transmissão. Os resultados obtidos comprovam que um menor tempo de frente de onda de descargas atmosféricas causa maior sobretensão na cadeia de isoladores das torres. Quando a amplitude da descarga atmosférica for superior a 50 kA o arco (*flashover*) tem grande possibilidade de ocorrer independentemente da resistência dos pés das torres. Os resultados de simulações mostraram que quando há alta resistência de aterramento dos pés das torres, existe mais propensão a *backflashover* em suas cadeias de isoladores.

ULLAH et al (2007) realizaram uma investigação da distribuição de corrente de uma descarga atmosférica sobre torres de linhas de transmissão sob condições de falta. Um circuito equivalente modelo de 400kV circuito duplo de linha de transmissão foi estabelecida utilizando EMTP , sendo que dois modelos de diferente complexidade foram desenvolvidos. A falta à terra de alta frequência foi simulada por curto-circuito em um condutor fase-terra, enquanto condições de descargas atmosféricas foram simulados, injetando um impulso tipo corrente à terra e também para a um condutor fase. A corrente e o potencial de distribuição através da torre da linha foram examinados para diferentes locais de falta e os efeitos das variações de resistividade solo e resistência dos pés das torres foram quantificados. Para impulsos diretamente injetados sobre o aterramento um fluxo de corrente de amplitude muito alta fluirá através das torres à terra, próximo ao ponto de injeção. Se a injeção ocorre diretamente em uma torre, uma elevada percentagem do total injetado fluirá através da torre. Como resultado, uma tensão muito alta é desenvolvida entre as torres e à terra. A atenuação da corrente na torre é muito rápida, em cada lado do ponto de injeção. Para injeção de um impulso no condutor fase, correntes de alta amplitude fluirão também por torres próximas ao ponto de injeção, embora de amplitude menor do que para o caso de injeção direta ao aterramento. No caso de faltas de alta frequência uma pequena proporção da corrente fluirá diretamente à terra através da torre e no ponto de falta devido à impedância da cadeia inferior da torre da linha de transmissão. No entanto, tensões muito elevadas serão ainda desenvolvidas entre as torres e à terra. A atenuação da corrente nas torres mais distantes do ponto de injeção é menos rápida em comparação ao impulso de corrente, e ambas as amplitudes serão afetadas significativamente pela resistividade do solo.

Em seu estudo HAYASHI et al (2008) descrevem os resultados de cálculo em computador em relação ao efeito da aplicação de para-raios em linhas de transmissão, assumindo parâmetros típicos de uma linha de transmissão de 77 kV no Japão. Como resultado, os para-raios podem efetivamente evitar as falhas de descargas atmosféricas em

uma área de alta resistência nos pés da torres. Para a linha de transmissão de 77 kV com um único para-raios: se forem instalados para-raios de linha de transmissão nas três fases na torre de circuito duplo, com alta resistência de aterramento, as faltas podem ser completamente evitadas. O total de faltas por descargas atmosféricas podem diminuir com a instalação de para-raios. A taxa de falha por descarga atmosférica em uma torre com para-raios com resistência de aterramento entre 50 a 70 Ohms é praticamente a mesma de uma torre com 13 Ohms e sem para-raios.

LIU et al (2008) apresentaram um procedimento sistemático no estudo de desempenho de linhas de transmissão UHVDC frente às descargas atmosféricas com característica não-linear da resistência do pé da torre, o nível suportável da descarga atmosférica diminuirá linearmente com o aumento da resistência do pé da torre. A simulação digital usando PSCAD pode levar muito tempo para obter o resultado desejado, ao passo que com Rede Neural Artificial poderia ser utilizada a avaliação de desempenho de descarga atmosférica para reduzir o tempo de simulação por meio de ajuste entre a função de resistência de aterramento e a corrente crítica da descarga com dados parciais da simulação em PSCAD.

TRELP et al (2009) trata em seu artigo de cálculos do campo elétrico nas proximidades de uma linha aérea de transmissão de alta tensão. Fórmulas analíticas que não podem ser usadas para calcular o campo elétrico nos casos em que a superfície do solo sob a linha de transmissão não é plana ou há corpos condutores localizados sob a mesma, utilizando método de elementos finitos (FEM) para esta finalidade. Uma comparação gráfica de campo elétrico de intensidade E e a 1 m acima da superfície do solo foi analisado. O objetivo deste trabalho foi analisar um caso mais realista, o ideal pressupõe uma superfície plana, sob uma linha de transmissão. Os resultados da análise revelam claramente um forte impacto da configuração da superfície do solo e a presença de corpos sob a linha de transmissão na distribuição de campo elétrico.

SHESHYKANI et al (2009) propuseram uma técnica de modelagem para analisar a resposta de uma linha de transmissão terminada por para-raios conectados a um sistema de aterramento enterrado em um terreno com perdas. Nesta técnica, a linha de transmissão é modelada na frequência de domínio com o auxílio de equações, enquanto o aterramento do sistema no qual os para-raios estão conectados é tratado com uma abordagem geral eletromagnética. Esta abordagem baseia-se nas soluções para as equações de Maxwell obtidas utilizando o método do momento no domínio da frequência. Para analisar o desempenho da técnica de modelagem proposta, os resultados numéricos são apresentados

para uma única linha de transmissão com o condutor conectado a um para-raios típico. Os resultados são comparados com base em um primeiro aterramento simples, com a configuração de uma haste vertical e com aqueles obtidos através do conhecido programa de transitórios eletromagnéticos, mostrando a validade da técnica proposta. A generalidade da técnica é, então, demonstrada através do estudo dos resultados de um caso mais complexo de uma malha de aterramento típico. É mostrado que o tempo inicial de respostas a sobre tensões das descargas são afetadas pela impedância do sistema de aterramento.

No trabalho de GATTA et al (2009) foi pesquisado o fenômeno de *backflashover* em linhas aéreas de transmissão de alta tensão com aterramento de torres utilizando contrapesos extensos, sendo estes tipicamente utilizados em solos de alta resistividade. Embora contrapesos extensos sejam efetivos na redução da impedância do sistema de aterramento, sua resposta a impulsos de alta frequência pode ter um desempenho menor frente à ocorrência de *backflashover* em linhas de transmissão. O estudo focou o aprimoramento do desempenho de linhas de transmissão quando submetidas a descargas atmosféricas, adicionando-se uma pequena quantidade de hastes verticais de aterramento aos contrapesos horizontais existentes. A adição de uma determinada quantidade de hastes verticais de aterramento em situações que o contrapeso é mais extenso pode significar um meio eficiente de melhorar o desempenho frente ao *backflashover* em linhas de transmissão.

ALÍPIO et al (2010) pesquisaram a modelagem de aterramentos elétricos para fenômenos de alta frequência, utilizando uma metodologia que resulta em técnicas de integração, incluindo acoplamentos eletromagnéticos entre os diversos elementos do aterramento, aspecto de fundamental importância na análise de fenômenos transitórios de alta frequência. Este estudo considerou os efeitos de propagação, que são fundamentais no caso de ocorrências transitórias; além de permitir a inclusão dos efeitos causados pela ionização do solo, tais como elevação de potencial no ponto de injeção e distribuição da corrente de dispersão ao longo da malha. Esta ferramenta desenvolvida pode ser um instrumento de grande valor no auxílio ao estudo, análise e projeto de aterramentos, sobretudo quando é avaliado o desempenho e o comportamento dos mesmos frente a ocorrências transitórias, como descargas atmosféricas.

RAHMAN et al (2011) constataram que uma grande porcentagem de desligamentos em linhas de transmissão tem como principal causa as descargas atmosféricas, mais especificamente, com *backflashover*. Investigações anteriores indicaram que a resistência de aterramento dos pés das torres é um dos principais fatores na redução da ocorrência de

backflashover. É proposto um método prático de otimização baseado em dados de medições de resistividade do solo. O processo é apresentado através de um procedimento que inclui a medição principal e as etapas do projeto. Isso permite que diferentes projetos padrão possam ser selecionados para se adequar ao tipo de estrutura do solo no local proposto para a torre de transmissão. Sempre que as medições indicam uma camada de alta resistividade com resistividade do solo subjacente baixa, um projeto com mais hastes verticais é utilizado. Por outro lado, um projeto utilizando eletrodo horizontal, onde seriam selecionadas a estrutura do solo de baixa resistividade foram utilizados e os resultados preliminares indicam significativa melhoria no desempenho frente a descargas atmosféricas.

3. Sistema de aterramento em torres de linhas de transmissão

O sistema de aterramento de uma linha de transmissão é composto pela interligação com a malha terra das subestações, para-raios de linhas, cabos para-raios e pelo aterramento dos pés de torres, sendo que estes podem ser constituídos por hastes e/ou cabos enterrados no solo, são os denominados contrapesos. A resistividade do solo é uma das principais responsáveis pelo desempenho do sistema de aterramento de uma linha de transmissão, sendo este influenciado pelos seguintes fatores: tipo de solo, teor de umidade, temperatura, composição química, concentração dos sais da água retida, estratificação e compactação do solo.

O sistema de aterramento de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica geralmente é composto pelas seguintes partes, (KINDERMANN,1995):

- Todos os elementos metálicos que compõe a torre e que mantém contato com o solo ou com o concreto das fundações, inclusive vergalhões, grelhas, stubs, parafusos, etc.
- Qualquer dispositivo de aterramento, tais como: hastes de aterramento, anéis horizontais, contrapesos, ou ainda qualquer combinação destes que estejam enterrados no solo.

Eletródos ou hastes de aterramento suplementar podem ser de dois tipos básicos:

- Concentrado (haste vertical no solo, condutor cilíndrico horizontal, condutor cilíndrico em anel fechado).
- Prolongado ou contínuo: Também conhecido como contrapeso contínuo, constituído de um e, às vezes, de vários condutores cilíndricos contínuos enterrados no solo ao longo da linha de transmissão e conectados nos pés de cada torre.

Dentre os principais objetivos de um sistema de aterramento podemos citar:

- Tornar a resistência de aterramento mais baixa possível para as correntes provenientes de falta à terra;
- Manter potenciais produzidos por correntes de falta entre valores que não provoquem a fibrilação do coração humano;
- Fazer com que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e atuem de forma a isolar rapidamente as faltas à terra;
- Propiciar um caminho adequado para escoar à terra descargas atmosféricas.

As torres (suportes) de uma linha de transmissão devem ser aterradas de maneira a tornar a resistência de aterramento compatível com o desempenho desejado e a segurança de terceiros. O aterramento deve se restringir a faixa de segurança da linha de transmissão e não

interferir com outras instalações existentes e com atividades desenvolvidas dentro da faixa. Os materiais empregados nos aterramentos devem ser resistentes à corrosão e sua durabilidade no solo deve ser, sempre que possível, compatível com a vida útil da linha de transmissão. (NBR 5422/1985)

A resistência de aterramento R de um condutor enterrado horizontalmente no solo é dada pela seguinte expressão:

$$R = \frac{\rho a}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{2L^2}{rp}\right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{p}{L}\right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (1)$$

Da equação (1) temos que: p [m] é a profundidade do condutor enterrado, L [m] é o comprimento total do condutor, r [m] é o raio equivalente do condutor e ρa [$\Omega.m$] é a resistividade aparente do solo. (KINDERMANN, 1995)

O comprimento do contrapeso por perna deverá ser em função da resistividade do solo, conforme TABELA 3.1:

TABELA 3.1 Comprimento do Contrapeso

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: Adaptada de TR-035/80 CTEEP)

3.1 Dinâmica dos desligamentos em linhas de transmissão causados por descargas atmosféricas

Ter conhecimento da dinâmica dos desligamentos das linhas de transmissão de energia elétrica causados por descargas atmosféricas permite selecionar e implementar ações mais eficazes na busca pela melhoria contínua do desempenho destas linhas de transmissão.

Os índices que expressam o desempenho de linhas de transmissão, em termos de qualidade de energia elétrica entregue a cargas consumidoras, levam em conta o tempo de duração (DREQ) e a frequência de desligamentos (FREQ) em cada linha de transmissão.

Pode-se definir descarga atmosférica como um fenômeno 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. Apesar de existirem diferentes variações de descargas atmosféricas nuvem-solo, a de maior interesse em proteção de linhas de transmissão são as descargas negativas descendentes, que constituem cerca de 90% do total que atinge o solo, sendo que estas descargas podem ser as descargas negativas únicas e as múltiplas. (UMAN, 1987)

Em linhas de transmissão as descargas atmosféricas podem ocorrer de maneira indireta, ou seja, quando atingem o solo nas proximidades da linha de transmissão; ou direta, quando estas atingem diretamente as torres, cabos condutores ou para-raios, conforme mostra a Figura 3.1.

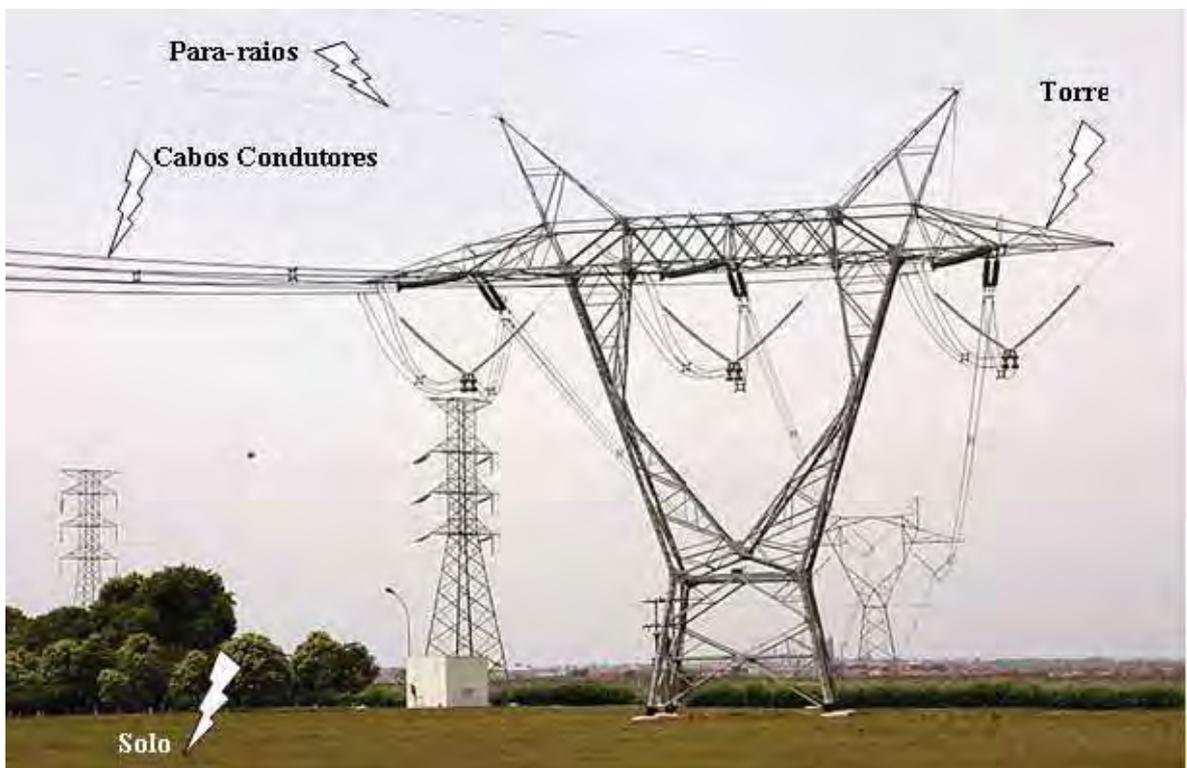


Figura 3.1 Descargas atmosféricas atingindo o solo ou componentes da LT.

3.1.1 Incidência indireta

Quando uma descarga atmosférica incide próxima a uma linha de transmissão e provoca seu desligamento, denomina-se descarga por incidência indireta, também conhecida como tensão induzida ao longo de seu percurso. Nestas linhas de transmissão, também associada à onda de tensão induzida, existe uma onda de corrente que trafega pelos condutores energizados da linha de transmissão. Dois fatores podem influenciar na amplitude da tensão induzida por correntes de descargas atmosféricas: a característica da onda de corrente (o tempo de frente e o valor de pico), e a distância do ponto de incidência até a linha de transmissão (SILVA, 2007).

A presença de cargas ao longo do canal isoladamente já é capaz de gerar um campo elétrico estático. Com o início do fluxo de cargas durante a descarga deste canal, temos a presença de uma corrente associada e, conseqüentemente, um campo magnético em conjunto com o campo elétrico. Como a variação de corrente ao longo do canal é bem acentuada, este fenômeno gera a irradiação de campo eletromagnético e a conseqüente superposição destes fenômenos é responsável pela tensão induzida. (MASTER, 1983).

3.1.2 Incidência direta

3.1.2.1 Flashover

A Descarga Disruptiva Direta ou *Flashover* é a falha no isolamento que pode ser associada à incidência de uma descarga atmosférica em um condutor energizado de uma linha de transmissão. Este tipo de incidência pode ocorrer em uma situação na qual a linha de transmissão não possui cabos para-raios dispostos adequadamente.

Em situações deste tipo de incidência de descarga tem-se o estabelecimento de elevados níveis de sobretensões entre os condutores energizados da linha de transmissão e à terra.

Na maioria das vezes, o valor de sobretensão ao qual é submetido o isolador é suficiente para causar o rompimento do isolamento da linha de transmissão e estabelecer um arco elétrico (*flashover*) que liga o condutor energizado à torre aterrada. Este arco geralmente possui caráter superficial, através do ar nas proximidades do isolador, e em alguns casos pode danificar um ou mais isoladores da cadeia. A sustentação deste arco configura um curto-circuito entre os condutores energizados e à terra, desta forma o sistema

de proteção é sensibilizado por este fluxo de corrente, comandando o desligamento da linha de transmissão.

O procedimento mais aplicado na proteção contra o *flashover* é a instalação de cabos para-raios sobre os condutores energizados (fases). Também conhecidos como cabos de blindagem de uma linha de transmissão, os cabos para-raios são diretamente ligados às torres aterradas ao solo através do sistema de aterramento (VISACRO, 2006).

3.1.2.2 Backflashover

Mesmo com a proteção, ainda há a possibilidade de ocorrer falha no isolamento quando uma descarga atmosférica incide nos cabos para-raios ou condutores de blindagem. Este mecanismo é conhecido como descarga disruptiva de retorno ou *Backflashover*.

A descarga atmosférica ao incidir sobre o cabo para-raios, além da onda de corrente proveniente desta descarga propaga também uma onda de tensão cuja amplitude é dada aproximadamente pelo produto entre a amplitude da onda de corrente a e impedância de surto da linha ($Z \times I$). A descarga atmosférica propaga-se nos condutores de blindagem, buscando descarregar-se ao solo através das diversas torres aterradas (SILVA, 2007).

4. Análises da linha de transmissão

Neste capítulo é estudada a influência do aterramento em trechos de uma linha de transmissão de energia elétrica frente à incidência de descargas atmosféricas que causaram seu desligamento intempestivo. Para saber a localização aproximada destas descargas atmosféricas, utilizou-se o auxílio de um sistema de monitoramento de descargas atmosféricas em linhas de transmissão da CTEEP. Em seguida foram executadas diversas medições em campo com o intuito de constatar as condições de resistência de aterramento e resistividade do solo em determinados trechos da linha de transmissão onde ocorreu maior número de desligamentos por descargas atmosféricas.

4.1 Introdução

A principal malha do Sistema Interligado Nacional (SIN) é composta por 89,2 mil quilômetros de linhas de transmissão – nas tensões 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 750 kV – que formam a Rede Básica. Constituídas por linhas e equipamentos que operam em tensões inferiores a 230 kV, ou seja, 11,5 kV a 138 kV, as DITs (Demais Instalações de Transmissão) pertencem às transmissoras e não integram a Rede Básica do SIN.(CTEEP,2012)

A linha de transmissão estudada interliga as subestações dos municípios de Presidente Prudente a Assis.

4.2 Linha de transmissão de 88 kV Presidente Prudente / Assis

Os Cabos Condutores desta linha de transmissão da SE PRP até a torre nº 466 é composto por um cabo condutor por fase do tipo 266,8MCM (Partridge) (diâmetro:16,28 mm); da torre 466 até a SE ASS é composto por um cabo 636MCM (Grosbeak) (diâmetro: 25,15 mm). O cabo para-raios é 5/16” da SE PRP a torre 466; e da torre 488 até a SE ASS 3/8”.

Com relação às características elétricas da linha de transmissão temos: resistência de sequência positiva: 37,879%; resistência de sequência zero: 85,834%; resistência de

acoplamento mútuo: 0,4714%; reatância sequência positiva: 80,59; reatância de sequência zero: 313,84%; reatância de acoplamento mútuo: 2,182%; admitância de sequência zero: 2,18MVAR; admitância de sequência positiva: 3,56MVAR.(CTEEP).

A Figura 4.1 mostra configuração da torres mais frequentes (Tipo “SS”), torres de suspensão, utilizada nesta linha de transmissão com as principais distâncias.

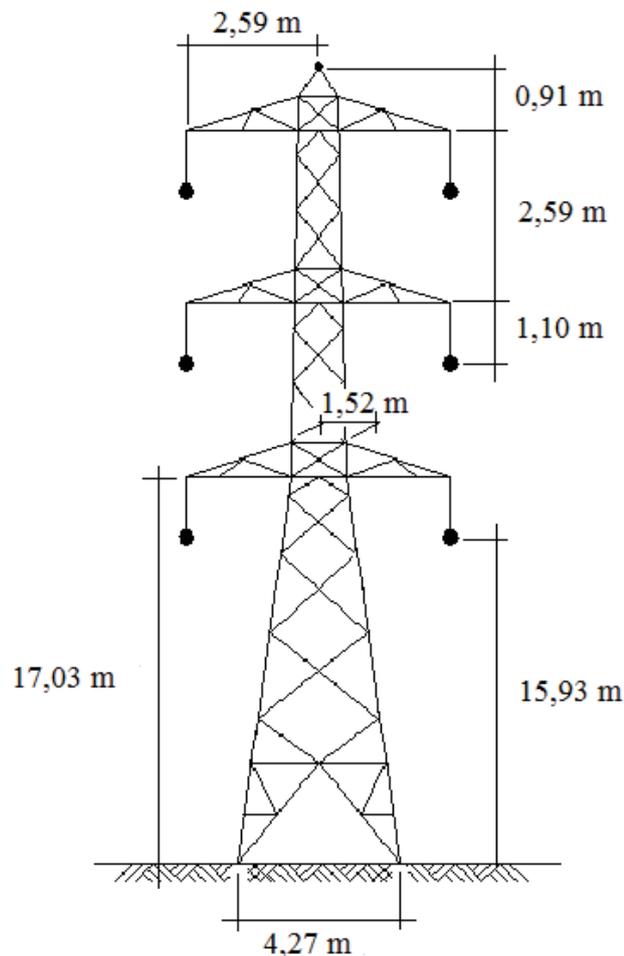


Figura 4.1 Torre SS (Suspensão) Fonte: Dados de projeto da LT - CTSEP.

4.3 Contrapeso

O contrapeso, também conhecido como aterramento dos pés de torres, é composto por fio recoberto com cobre e está conectado aos pés das torres de uma linha de transmissão. Tem como função escoar as descargas atmosféricas que atingem as linhas de transmissão e evitar acidentes com pessoas e animais (tensão de toque e tensão de passo). As características do contrapeso são: composto de aço recoberto de cobre - Copperweld, bitola:

4AWG, formação: 1 fio, seção total: 21,16mm², diâmetro total: 5,19mm, massa: 0,172kg/m e carga de ruptura: 1.145daN.

A Figura 4.2 representa a disposição dos contrapesos em cada torre da linha de transmissão.

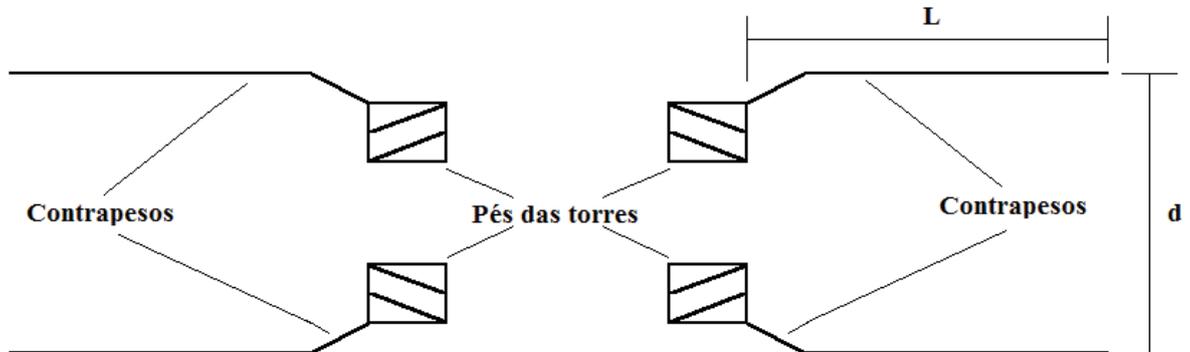


Figura 4.2 Disposição dos contrapesos (Fonte: CTEEP)

Os contrapesos nesta linha de transmissão são instalados a uma profundidade de 0,80 m a 1 m da superfície do solo, com 50 a 60 m de comprimento (**L**) em cada pé de torre e a aproximadamente 5,2 m de distância (**d**) um do outro.

4.4 Diagrama da LT

A LT 88 kV Presidente Prudente / Assis tem 131 km, 496 torres, dois circuitos e sete Ramais ao longo de seu percurso, conforme mostra a Figura 4.3.

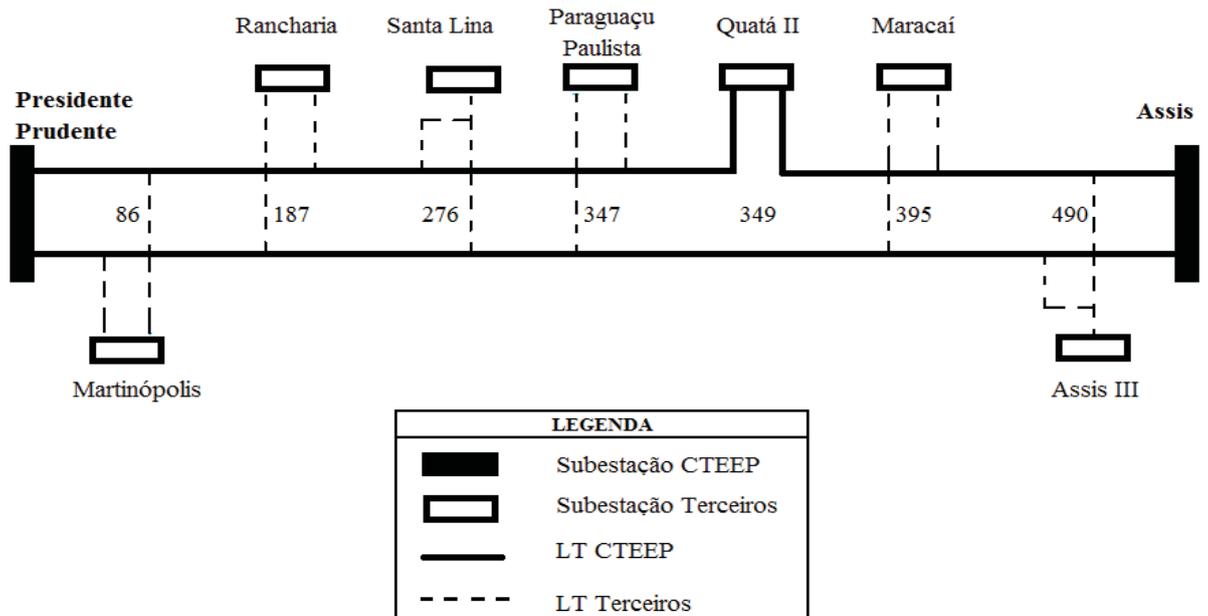


Figura 4.3 – Diagrama da LT.

4.5 Níveis Isoceráunicos

Níveis Isoceráunicos representam o número médio de dias de trovoadas por ano, correspondem ao número de relâmpagos por área em km².

Tempestade é considerada o dia em que, pelo menos, um trovão é ouvido. Para criar mapas úteis como uma referência sobre a probabilidade de queda raios / relâmpagos, é utilizado um desenho de linhas isoceráunicas, que são as linhas que definem áreas territoriais ceráunicas de um mesmo nível.

A linha de transmissão estudada percorre nove (nove) municípios da região oeste do estado de São Paulo. A TABELA 4.1 mostra o *ranking* de níveis isoceráunicos destes municípios no estado de São Paulo.

TABELA 4.1. *Ranking* dos níveis isocerânicos dos municípios percorridos pela LT

Município	Ranking em SP 2005/2006	Densidade raio/km ² .ano	Ranking em SP 2007/2008	Densidade raio/km ² .ano	Variação (%)	Área (km ²)
Presidente Prudente	340	2,8879	435	1,8430	- 36,2	562
Regente Feijó	132	3,8704	367	1,9831	- 48,8	265
Indiana	140	3,8141	297	2,1493	- 43,6	128
Martinópolis	203	3,4797	424	1,8572	- 46,6	1.253
Rancharia	267	3,1728	524	1,6372	- 48,4	1.585
João Ramalho	309	3,0030	458	1,8045	- 39,9	416
Quatá	227	3,3387	425	1,8566	- 44,4	653
Paraguaçu Paulista	106	4,0702	250	2,3131	- 43,2	1.001
Assis	146	3,7860	190	2,5807	- 31,8	462

(Fonte:ELAT - 2010)

4.6 Sistema Integrado de Monitoramento e Análise de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

O Sistema Integrado de Monitoramento e Análise de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão da CTEEP, denominado SisRaios é um aplicativo de utilização para monitoramento, análise e previsão de tempestades desenvolvido pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR. O software SisRaios é um programa de acesso pela Internet que exibe informações de descargas atmosféricas com localização das coordenadas (latitude e longitude), corrente de pico, polaridade da corrente. As torres das linhas de transmissão da Concessionária são todas geo-referenciadas e estão inseridas no banco de dados do Sisraios. Este Sistema tem instalado 22 sensores nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, tendo uma abrangência de aproximadamente 2.240.000 m². O SisRaios pode ser utilizado para investigar as causas dos desligamentos, verificando tratar-se ou não de desligamento advindo de descarga atmosférica (BENETTI, 2003).

Dentre os recursos que o SisRaios dispõe, podemos citar os seguintes:

- Mostra informações sobre descargas atmosféricas para monitoramento de tempestades e previsão do tempo;
- Visualizam dados sobre descargas atmosféricas: tempo, localização coordenadas (latitude, longitude ou UTM), corrente de pico, polaridade, tempo de ascensão, multiplicidade e outras informações;
- Manipulam dados para geração de mapas de densidade: densidade total, percentual de descargas positivas/negativas, níveis isoceráunicos para um período e região selecionados;
- Análise de eventos: correlação entre descargas atmosféricas e perturbações em linhas de transmissão de energia elétrica da Concessionária;
- Recuperam dados históricos e em tempo real armazenados em banco de dados.
- Grava e imprime imagens.
- Previsão do tempo de curto prazo e alertas de tempestades iminentes em áreas pré-definidas pelo usuário.

4.6.1 Aplicações do SisRaios

No período de 17 a 21 de janeiro de 2011, ocorreram aproximadamente 1.200 descargas atmosféricas em todo o estado de São Paulo e em parte de Minas Gerais e Paraná, conforme Figura 4.4. Provavelmente, uma destas descargas provocou o desligamento da linha de transmissão de 88 kV Presidente Prudente a Assis. O estudo a seguir, através da ferramenta SisRaios, procura evidências que comprovem e/ou identifique qual destas descargas atmosféricas efetivamente causaram os desligamentos da referida linha de transmissão.

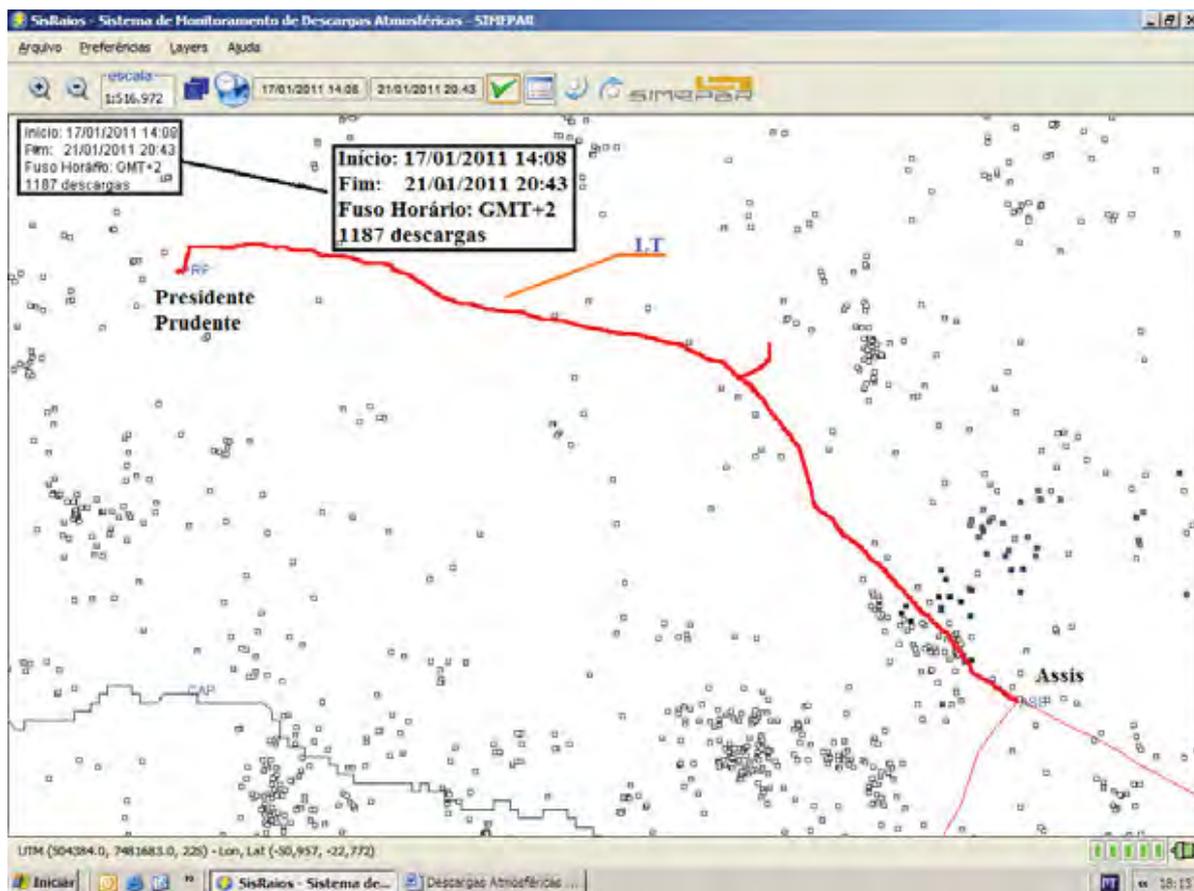


Figura 4.4 – Descargas atmosféricas ocorridas no período de 17/01/11 a 21/01/2011 nas proximidades da linha PRP/ASS.

A Figura 4.5 mostra mais detalhadamente o caminho percorrido pela linha de transmissão estudada, dentro do estado de São Paulo, sendo esta uma tela do SisRaios.

TABELA 4.2 Desligamentos na LT de 88 kV PRP/ASS

Data do Desligamento	Hora do Desligamento	Circuito da LT	Distância à Torre (km)	Torres mais próximas	Corrente (KA)	Resistência Aterramento
05/12/2011	17:53:42	2	0,008	351	-18,0	
25/10/2011	14:15	1	0,088	323	20,0	
31/08/2011	04:55	1	11,787	434	20,0	
26/02/2011	16:38	1	0,029	199 e 200	-15,0	
18/02/2011	17:43	1	0,019	287 e 288	-36,0	
23/01/2011	19:43	1	0,745	454	-36,0	31,9
			0,766	456		13,9
			0,774	457		12,5
21/01/2011	20:42	2	0,246	460	-94,0	
21/01/2011	20:42	2	0,492	463	-33,0	98,1
			0,554	464		18,0
19/01/2011	17:16	1	0,313	452	- 63,0	178,5

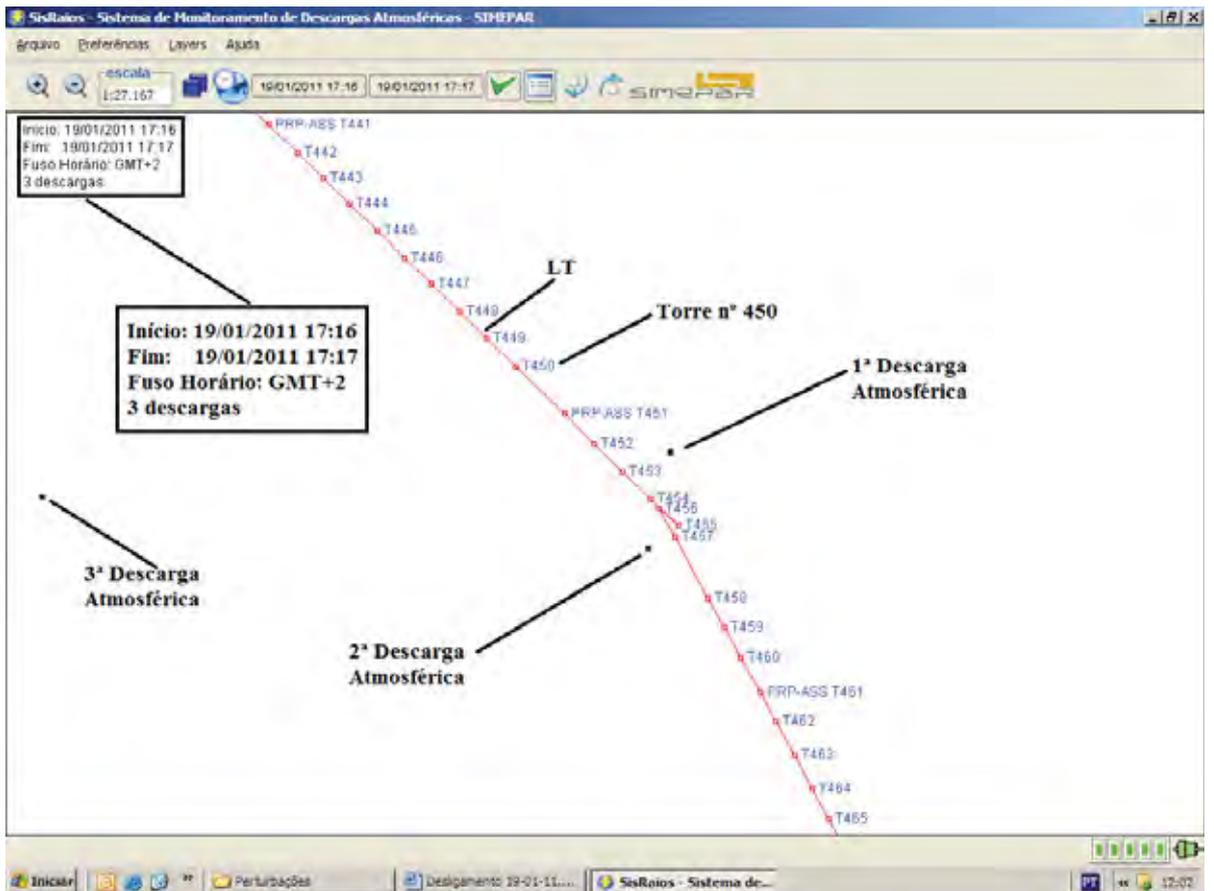


Figura 4.6 Descargas atmosféricas próximas a linha de transmissão

4.6.3 Descargas atmosféricas que não provocaram desligamento da LT

A TABELA 4.3 apresenta uma relação de descargas atmosféricas ocorridas próximas à linha de transmissão. Esta tabela mostra dados extraídos ao longo de 2011 do SisRaios, tais como: data da ocorrência, latitude e longitude da torre mais próxima da descarga atmosférica, I: Intensidade de Corrente, além da latitude e longitude das torres adjacentes (anterior e posterior) à torre mais próxima da descarga atmosférica.

TABELA 4.3 Descargas atmosféricas em 2011 que não provocaram o desligamento da LT.

Data	Torre mais próxima da descarga atmosférica		I (kA)	Torres Adjacentes			
	Latitude	Longitude		Anterior		Posterior	
				Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
04/01	-22°16'17"	-50°45'36"	-34	-22°15'45"	-50°45'24"	-22°15'49"	-50°45'15"
06/01	-22°23'15"	-50°36'50"	-47	-22°23'10"	-50°36'35"	-22°23'17"	-50°36'32"
21/01	-22°36'58"	-50°24'35"	-94	-22°36'50"	-50°24'32"	-22°36'55"	-50°24'28"
12/04	-22°17'56"	-50°38'39"	45	-22°17'20"	-50°39'18"	-22°17'17"	-50°39'13"
13/04	-22°34'39"	-50°24'26"	-79	-22°35'37"	-50°25'39"	-22°35'44"	-50°25'34"
25/04	-22°25'31"	-50°36'07"	-36	-22°25'21"	-50°35'54"	-22°25'30"	-50°35'52"
27/04	-22°32'00"	-50°29'12"	-56	-22°32'05"	-50°29'31"	-22°32'10"	-50°29'25"
09/06	-22°39'37"	-50°20'48"	79	-22°39'41"	-50°20'57"	-22°39'45"	-50°20'51"
19/07	-22°32'11"	-50°30'09"	22	-22°31'48"	-50°29'50"	-22°31'53"	-50°29'45"
19/07	-22°33'30"	-50°26'42"	-47	-22°33'54"	-50°27'32"	-22°33'59"	-50°27'26"
22/07	-22°34'58"	-50°27'11"	66	-22°34'38"	-50°26'42"	-22°34'44"	-50°26'37"
10/08	-22°15'17"	-50°48'39"	22	-22°15'08"	-50°48'36"	-22°15'09"	-50°48'27"
09/10	-22°29'20"	-50°32'48"	-31	-22°29'12"	-50°32'44"	-22°29'18"	-50°32'38"
09/10	-22°28'49"	-50°33'51"	-33	-22°28'32"	-50°33'25"	-22°28'39"	-50°33'18"
13/10	-22°30'17"	-50°31'08"	-11	-22°30'20"	-50°31'26"	-22°30'25"	-50°31'20"
14/10	-22°27'57"	-50°33'46"	-77	-22°27'58"	-50°34'01"	-22°28'03"	-50°33'55"
05/12	-22°25'08"	-50°36'49"	-21	-22°24'58"	-50°36'02"	-22°25'05"	-50°35'59"

A TABELA 4.4 apresenta várias descargas atmosféricas ocorridas próximas à linha de transmissão, que não provocaram desligamento. Os dados apresentados nesta tabela são: data e intervalo das descargas atmosféricas, circuito mais próximo, torres mais próximas, distância das descargas atmosféricas à torre mais próxima, intensidade de corrente e resistência de aterramento dos contrapesos.

TABELA 4.4 Descargas atmosféricas que não provocaram o desligamento da LT

Data da Descarga Atmosférica	Intervalo da Descarga Atmosférica	Circuito da LT	Distância às Torres (km)	Torres mais próximas	Intensidade Corrente (kA)	Resistência Aterramento Contrapesos
06/12/2011	06:27 h 06:28 h	1	0,226	465	8,0	23,3
05/12/2011	16:02 h 16:03 h	2	0,146	453	-12,0	21,4
12/11/2011	22:48 h 22:49 h	1	0,033	461	-21,0	16,4
			0,206	462		
12/11/2011	22:47 h 22:48 h	1	0,632	464	-22,0	18,0
12/11/2011	22:58 h 22:59 h	1	0,619	456	-21,0	13,9
			0,719	457		12,5
12/11/2011	22:47 h 22:48 h	1	0,660	462	-22,0	16,4
14/10/2011	17:34 h 17:35 h	1	0,130	462	46,0	16,4
14/10/2011	17:36 h 17:37 h	1	0,431	457	15,0	12,5
14/10/2011	17:37 h 17:38 h	2	0,388	464	17,0	18,0
14/10/2011	17:37 h 17:38 h	2	0,386	465	17,0	23,3
14/10/2011	14:23 h 14:24 h		0,509	346	-36,0	18,53
25/04/2011	14:32 h 14:33 h	1	0,459	344	-36,0	14,50
12/04/2011	18:49 h 18:50 h	1	1,43	340	-32,0	13,47

4.7 Medições de resistência de aterramento

Neste item será abordado o procedimento e o método utilizado para a medição de resistência de aterramento, bem como os resultados obtidos através de medições efetuadas em campo.

4.7.1 Procedimento utilizado

A seguir está descrito o procedimento utilizado para medir a resistência de aterramento em linhas de transmissão, através do medidor de resistência de aterramento, marca Yokogawa Electric Works, modelo Type 3244:

- Os eletrodos empregados (sonda e terra auxiliar) devem estar alinhados em uma mesma reta. A direção desta reta deve ser perpendicular ao eixo da LT, ou o mais próximo disso.

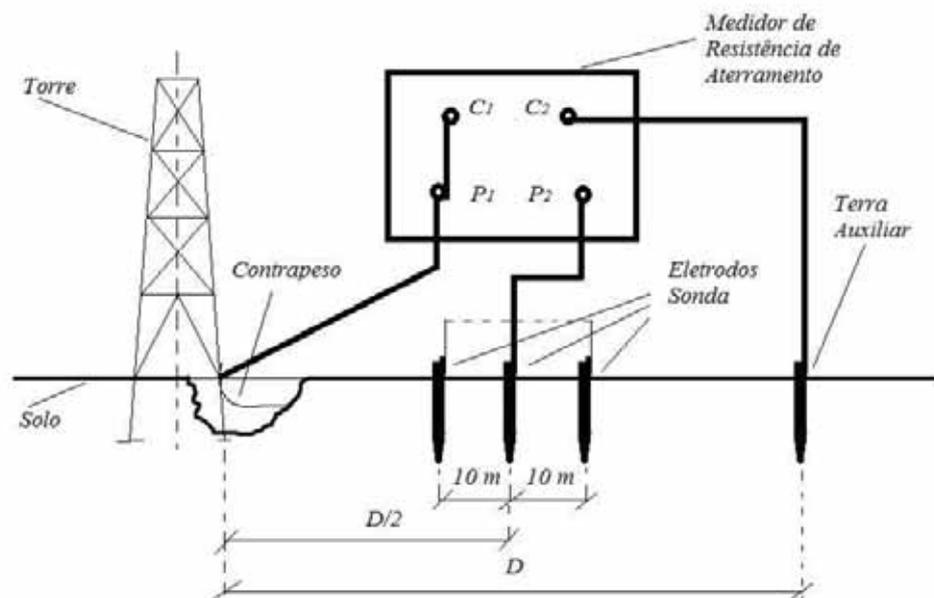


Figura 4.7 Esquema de ligação dos eletrodos para medição de resistência de aterramento.

- Os eletrodos devem ser de Copperweld, 16 mm de diâmetro e 1 m de comprimento. Devem ser enterrados a 0,50 m de profundidade.
- O terra auxiliar deve ser instalado a uma distância D da torre a ser medida. Inicia-se D com 100 m.
- O eletrodo sonda deve ser instalado a 40, 50 e 60 m da torre a ser medida.

- e. Não deve ser alterada a posição dos eletrodos durante as medições.
- f. Os cabos que ligam o instrumento aos contrapesos ou hastes devem ser de cobre flexível 8 ou 12 AWG, sem emendas, isolados para 600 Volts, com revestimento de plástico ou similar.

4.7.2 Preparativos para medições

Os preparativos para executar as medições são os seguintes:

- a. Desconectar o contrapeso da torre. Se houver mais de um contrapeso interligá-los após desconexão.
- b. Se o contrapeso for contínuo desconectá-lo nas torres adjacentes.

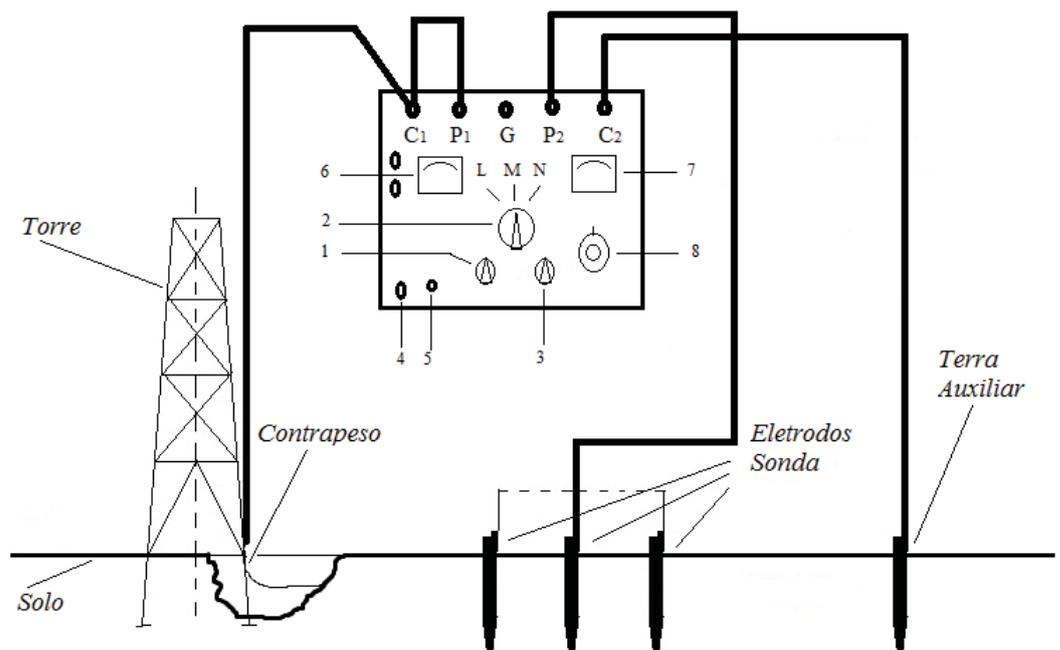


Figura 4.8 Esquema de ligação em instrumento para medição de resistência de aterramento

- c. Os terminais C1 e P1 devem ser conectados e ligados ao contrapeso do qual se deseja medir a resistência.
- d. O terminal C2 deve ser conectado à terra auxiliar.
- e. O terminal P2 deve ser conectado ao eletrodo sonda.

- f. O terminal G não é utilizado nesta medição.

4.7.3 Procedimentos para medições

A seguir são elencados os procedimentos para a medição de resistência de aterramento:

- a. Ajuste a chave Volt-Ampere (1) para a posição V.
- b. Ajuste a chave do gerador (2) para a posição L.
- c. Ajuste a chave seletora (3) para a posição x 10.
- d. Pressionar o botão Lock Switch (4). Verificar se a lâmpada piloto acende (5).
- e. Verificar se a tensão marcada na escala (6) está entre 5 V e 15 V. Se a tensão for inferior a 5 V substituir a bateria.
- f. Mudar a posição da chave Volt-Ampere (1) para a posição mA.
- g. Ajustar a indicação do galvanômetro (7) para a marca “0” (zero) através do dial (8).
- h. O valor da resistência será o produto do valor da leitura do dial pela escala de multiplicação.
- i. Quando a sensibilidade de medição for insuficiente, ajustar a chave do gerador (2) para as posições M e N, assim esta medição pode ser feita com um valor de corrente mais alto.
- j. Quando a medição terminar, soltar o botão Lock Switch (4). Verificar se a lâmpada piloto apaga. Os itens a, b, c e e requerem uma verificação toda vez que se iniciar nova medição.

4.7.4 Resultados das medições de resistência de aterramento

Pode-se constatar na TABELA 4.5 que algumas estruturas (nº 452, 455, 460, 461 e 463) não estavam com a resistência de aterramento dentro dos valores normatizados para este tipo de linha de transmissão, ou seja, aproximadamente 20 Ω . Isto pode influenciar

significativamente o desempenho do sistema de aterramento destas torres quando atingidas diretamente ou em suas proximidades por descargas atmosféricas.

No caso da ocorrência destas descargas atmosféricas, entre 17:16 h e 17:17 h, do dia 19/01/2011. Podemos observar que a primeira descarga ocorreu entre as torres 452 a 454 e a segunda entre as torres 455 a 457, provocando o desligamento momentâneo da LT devido à atuação correta da proteção. Neste caso o desligamento foi por tempo inferior a 1 minuto, pois houve a atuação do religamento automático com sucesso. Este tipo de desligamento pode não causar prejuízo imediato a concessionária, mas afeta o desempenho da linha de transmissão, a vida útil de equipamentos de transmissão além de componentes eletrônicos de comando, controle e proteção da linha de transmissão.

TABELA 4.5. Resultados das medições de resistência de aterramento vãos 452 a 465

Número da Torre	Resistência de Aterramento (Ω)			Média M (Ω)
	1	2	3	
	$D/2 - 10$	$D/2$	$D/2 + 10$	$(1)+(2)+(3)/3$
452	101,2	117,2	317,0	178,5
453	20,9	16,4	26,9	21,4
454	33,5	31,8	30,4	31,9
456	11,9	13,5	16,5	13,9
457	11,1	12,1	14,5	12,5
462	17,6	17,4	14,4	16,4
463	103,3	92,8	98,6	98,1
464	14,2	15,6	24,2	18,0
465	22,4	22,8	25,2	23,3

Da TABELA 4.5, temos: D é a distância do eletrodo auxiliar a torre, M é a média aritmética entre as medições 1, 2 e 3. A TABELA 4.6 mostra os resultados das medições efetuadas em campo no trecho compreendido entre as torres 340 a 348. Não foram constatados desligamentos tendo como causa provável descargas atmosféricas neste trecho da linha de transmissão.

TABELA 4.6 Resultados das medições de resistência de aterramento vãos 340 a 348

Número da Torre	Resistência de Aterramento (Ω)			Média M (Ω)
	1	2	3	
	$D/2 - 10$	$D/2$	$D/2 + 10$	$(1)+(2)+(3)/3$
340	13,00	13,20	14,20	13,47
342	36,90	36,70	37,00	36,87
344	13,50	14,70	15,30	14,50
346 A	17,50	24,00	14,10	18,53
348	13,30	15,00	14,20	15,50

Da TABELA 4.6, temos: D é a distância do eletrodo auxiliar a torre, M é a média aritmética entre as medições 1, 2 e 3.

4.8 Medições de resistividade do solo

Neste item será apresentado o método e o procedimento utilizado para executar as medições de resistividade do solo, bem como, os resultados obtidos através das medições efetuadas em campo.

4.8.1 Método utilizado

A medição de resistividade do solo é efetuada com a utilização de quatro eletrodos. Esta resistividade é medida pelo espaçamento entre os eletrodos de potencial conforme Figura 4.9.

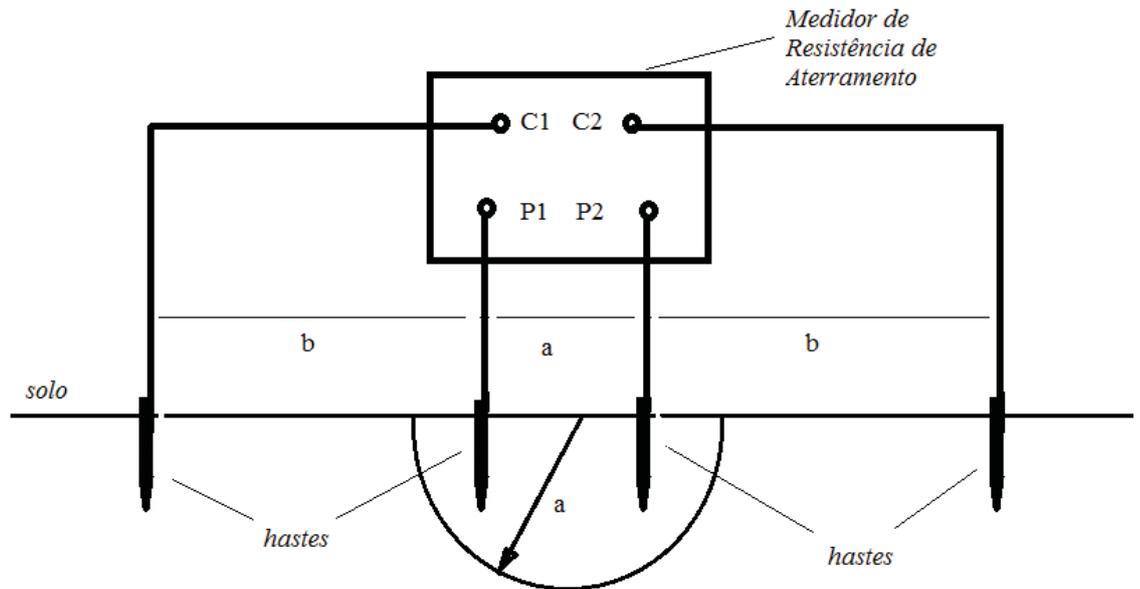


Figura 4.9 – Esquema de ligação dos eletrodos para medição de resistividade do solo

A resistência medida é a resistência de um hemisfério da terra, raio “a”, medida entre dois pontos do hemisfério e distanciados de “a”. Um dos eletrodos de corrente (externos) introduz uma corrente na terra que produz uma queda de tensão ($R \times I$) nos eletrodos de potencial (internos). Esta queda de tensão é contrabalanceada por uma corrente que passa por um resistor variável. A resistividade do solo é calculada pela expressão (4) de Frank Wenner:

$$\rho = \pi \frac{b}{1 - \frac{b}{a+b}} R \quad [\Omega.m] \quad (2)$$

Da equação (2) temos: a [m] e b [m] são as distâncias entre os eletrodos e R [Ω] é a resistência. Se $a = b$, então temos a equação (3):

$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega.m] \quad (3)$$

4.8.2 Resultados das medições de resistividade do solo na torre 452

As medições foram efetuadas no dia 30/07/2011. Os resultados apresentados na TABELA 4.7 indicam que para obtermos uma boa resistência de aterramento na torre nº 452 ou em sua proximidade será necessário que os contrapesos estejam em contato com a camada de solo a uma profundidade de no mínimo 1,6 metros, ou seja, aproximadamente entre 0,6 a 0,8 metros a mais da profundidade em que se encontra atualmente.

TABELA 4.7. Resultados das medições de resistividade do solo próximo a torre 452

Torre	Distância entre os Eletrodos (m)	Medição de Aterramento (Ω)	Profundidade da Camada de Solo (m)	Medição de Resistividade ($\Omega.m$)
452	1	Sem Leitura	1,6	4.500
	2	210	3,7	225
	3	75	5,9	2.000
	4	21	Maior que 5,9	4.400

4.8.3 Resultados das medições de resistividade do solo na torre 463

Em seguida as medições da torre 452, foram efetuadas medições na torre 463. Os resultados obtidos estão representados na TABELA 4.8. Estes resultados indicam que para obtermos uma boa resistência de aterramento na torre nº 463 ou em sua proximidade será necessário que os contrapesos estejam em contato com o solo a uma profundidade de no mínimo 2,4 metros, ou seja, aproximadamente 1,6 metros a mais da profundidade em que se encontra atualmente.

TABELA 4.8. Resultados das medições de resistividade do solo próximo a torre 463

Torre	Distância entre os Eletrodos (m)	Medição de Aterramento (Ω)	Profundidade da Camada de Solo (m)	Medição de Resistividade ($\Omega \cdot m$)
463	1	295	0,75	1.400
	2	200	2,40	4.200
	3	85	10,00	600
	4	55	Maior que 10,00	4.500

4.9 Resultado da medição de resistência de aterramento após a instalação de hastes de aterramento na torre 452

Em 08/09/2011 foram executadas novas medições de resistência de aterramento após instalação de quatro hastes metálicas (cantoneira de aço galvanizado) próximo a torre 452 e a uma profundidade adequada. Esta profundidade foi definida através das medições de resistividade do solo executadas anteriormente (item 4.8.2). Para a interligação das hastes com os pés das torres foram utilizados cabos isolados, com o objetivo de não influenciar no resultado, buscando somente a camada desejada.

Após implantação de hastes de aterramento em paralelo com os contrapesos nos quatro “pés” da torre 452, a uma profundidade mínima de 1,6 m em relação à superfície do solo, foram executadas novas medições da resistência de aterramento. Os resultados obtidos mostraram uma diminuição de aproximadamente 15% no valor de resistência de aterramento em relação às medições executadas anteriormente.

4.10 Fotos das medições efetuadas em campo

A seguir são apresentadas as Figuras 4.10 a 4.13 relativas as medições executadas em campo da resistividade do solo próximo as torres 452 e 463, bem como, da instalação de hastes de aterramento próximo a torre 452.



Figura 4.10 - Equipe executando medição de resistividade do solo próximo a torre 452



Figura 4.11: Acessórios utilizados nas medições de resistência de aterramento e resistividade do solo



Figura 4.12: Haste conectada ao contrapeso



Figura 4.13: Haste instalada na torre 452

5. Considerações finais e trabalhos futuros

Os resultados desta pesquisa foram publicados no artigo “Influência dos Contrapesos em Linha de Transmissão de Energia Elétrica de 88 kV frente a Descargas Atmosféricas”, apresentado no IX CLAGTEE em Mar Del Plata - Novembro 2011.

Pode-se constatar que em trechos onde a resistividade do solo e a resistência de aterramento dos contrapesos estavam em desacordo com valores normatizados, houve uma incidência maior de desligamentos ocasionados por descargas atmosféricas.

Uma solução possível seria o rebaixamento dos contrapesos a uma profundidade maior. Entretanto, essa alternativa se mostra pouco viável devido à dificuldade de implementação e custo elevado, já que a camada de resistividade mais adequada se encontra a profundidades bem maiores que os atuais 80 cm. Isto teria como resultado valores de resistividade do solo e conseqüentemente de resistência de aterramento mais próxima dos valores normatizados, ou seja, em torno de 20 Ω (Norma CTEEP TM/035/80). Devido à profundidade maior de camada do solo mais adequada, outra alternativa seria a instalação de hastes zincadas, porém, o resultado obtido com 4 hastes adicionadas ao pé da torre 463 gerou uma redução de apenas 15% na resistência de aterramento. Isso indica que essa alternativa não é uma solução geral para o problema. Não foi realizado o tratamento do solo com produtos específicos que poderiam melhorar os valores de resistividade do solo e, conseqüentemente, sua resistência de aterramento nesta torre.

Outra alternativa seria o lançamento contínuo dos contrapesos, ou seja interligando o contrapeso de uma torre à outra. Embora também de custo elevado, tal alternativa pode ser a que gera melhores resultados, visto que torres vizinhas a uma torre problemática podem apresentar resistências de aterramento reduzidas (torre 452 e 453, e torres 462 e 463). Além disso, a resistência de aterramento das torres após a interligação, em geral, é menor que a melhor delas antes da interligação.

Como proposta para futuros trabalhos seria implementar as ações citadas e uma ferramenta computacional capaz de 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 dificuldades inerentes à natureza do sistema, como grandes dimensões das linhas, natureza esporádica da ocorrência dos desligamentos, natureza aleatória das descargas atmosféricas, alteração das características do solo devido ao tratamento químico para a agricultura, etc.

Referências

ALÍPIO, R. S. SCHROEDER, M. A. AFONSO, M, M, A, OLIVEIRA, T. A. S; **“Modelagem de Aterramentos Elétricos para Fenômenos de Alta Frequência e Comparação com Resultados Experimentais”**; Revista Controle & Automação/Vol.22 nº 1, P. 89 a 192; de Janeiro e Fevereiro 2011.

BENETI, C.A.; GIN, R. B.; SATO, F.; VASCONCELLOS. C.A.; ZANDONÁ, C. A.; TEIXEIRA, P. C. O.; **“Sistema Integrado de Monitoramento e Análise de Descargas Atmosféricas nas Linhas de Transmissão da CTEEP – SIMEPAR”**, 2003.

CHOWDHURI, P.; ANDERSON, J. G.; CHISHOLM, W. A.; FIELD, T. E.; ISHII, M.; MARTINEZ, J. A.; MARZ, M.B.; MCDANIEL, J.; MCDERMOTT, T. R.; MOUSA, A. M.; NARITA, T.; NICHOLS, D. K.;SHORT, T. A.; **“Parameters of Lightning Strokes: A Review”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20. Nº 1; January 2005.

CTEEP, Disponível em: <http://www.isactEEP.com.br> , Acesso em 05 de Fevereiro de 2012.

DVORAK, L. L.; **“Evaluation of Grounding Methods used for Maintenance of Transmission Lines”**, IEEE Transactions on Power delivery, Vol. 12, Nº 3; July 1997.

DWALIBI, F.;BAISHIKI, R. S.; **“Power Frequency Performance of Transmission Line Structure Grounds”**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, Nº 6, June 1984.

DWIGHT, H. B.; **“Calculation of Protection of a Transmission Line by Ground Conductors”**, North Eastern District Meeting of the A.I.E.E., Springfield, Massachusetts, May 7 – 10, 1930.

ELAT/INPE, Disponível em: <http://www.inpe.br/ranking> ; Acesso em: 22 de maio de 2011.

FARIA (1992), **“On the Resonance Effects Due to Ground Wires in Transmission Lines With Non-Uniform Conductivity and Non-Uniform Tower Resistances”**, Transactions on Power Delivery, Vol. 7, Nº 1, January 1992.

FORTESCUE, C. L. G.; **“Counterpoises for Transmission Lines”**, 1934. AIEE Transactions, p. 1781 – 1790, 1934.

GATTA, F. M.; GERI, A.; LAURIA, S.; MACCIONI, M.; **“Backflashover Simulation of HV Transmission Lines with Enhanced Counterpoise Groundings”**, Electric Power Systems Research 79 (2009), p. 1076 – 1084, 2009.

HANSSON, E. e WALDORF, S. K.; **“Practical Design of Counterpoise for Transmission-Line Lightning Protection”**, AIEE Transactions, Vol. 61, p. 599 – 603, 1942.

HAYASHI, T.; MIZUNO, Y.; NAITO, K.; FELLOW, L.; **“Study on Transmission-Line Arresters for Tower with High Footing Resisting”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, nº 4, October 2008.

HE, J.; ZENG, R.; CHEN, S.; LI, S.; WU, W.; **“Impulse Characteristics of Grounding Systems of Transmission-Line Towers in the Regions with High Soil Resistivity”**, 1998. IEEE, p.156 – 162, 1998.

HE, J.; GAO, Y.; ZENG, R.; ZOU, J.; LIANG, X.; ZHANG, B.; LEE, J.; CHANG, S.; **“Effective Length of Counterpoise Wire Under Lightning Current”**, 2005. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 1585 – 1591, April 2005.

IBGE, Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm>; Acesso em: 10 de abril de 2011.

KINDERMANN, G; CAMPAGNOLO, J.M.; **“Aterramento Elétrico”**,. Editora Sagra, DC-Luzzatto, Porto Alegre, 1995.

KUROKAWA, S.; PISSOLATO FILHO, J.; TAVARES, M. C.; PORTELA, C. M.; PRADO, A. J.; **“Behavior of Overhead Transmission Line Parameters on the Presence of Ground Wires”**, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.20, nº2, April 2005.

LIU, P.; WU, G. N.; SUI, B.; LI, R. F.; CAO, X. B.; **“Modeling Lightning Performance of Transmission Systems Using PSCAD”**, 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, November 9-13, 2008

MASTER, M.; UMAN, M.A., **“Electric and Magnetic Field Associated with Establishing a Finite Electrostatic Dipole: A Exercise in the Solution of Maxwell’s Equation”**, Am. J. Phys. P. 118-126, 1983.

NBR 5422/1985 **“Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica”**, Fev/1985.

Norma Interna TM/035/80, **“Aterramento em Linhas de Transmissão e Subestações”**, CTEEP, 1980.

SILVA, A. P.; Dissertação de Mestrado: **“Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas Desenvolvimento de Sistema de Informações e Análise de Casos”**, UFMG, 2007

RAHMAN, N. A. A., MARICAN, A. M. A., DAVIES, A. M., KADIR, M. Z. A. A., ABDULLAH, M.; **“A Practical Method for Optimised Earth Electrode Designs at Transmission Towers Exposed to Lightning”**, 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, November 1-4, 2011, Chengdu, China

SOARES, A. JR.; SCHRODER, M. A. O.; VISACRO, S., **“Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes”**, 2005. IEE Transactions on Power Delivery, on v. 20, n. 2, p. 1447 – 1452, April 2005.

SHESHYKAMI, K.; SADEGHI, S. H. H.; MOINI, R.; RACHIDI, F.; PAOLONE, M.; **“Analyses of Transmission lines With Arrester Termination, Considering the**

Frequency Dependence of Grounding Systems", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, n°4, November 2009.

ULLAH, N.; GRIFFITHS, H.; HARID, N.; HADDAD, A.; AINSLEY, A., **"Current Distribution on Tower Lines Under Fault and Surge Conditions"**, High Voltage Energy Systems Research Group, School of Engineering, Cardiff University, UPEC 2007, p. 812-817, 2007.

UMAN, M.A., **"The Lightning Discharge"**, Academic Press Inc., Harcourt Brace Javanovich, 1987.

VISACRO, S.F., ANTUNES, E.P., MACHADO, V.G., GUEDES, V.T., **"Improving the Lightning Performance of 69 kV to 230 kV Transmission Lines"**, pp. 326-332, Proceedings of GROUND'2006 & 2nd LPE, Maceió, Brasil, Nov. 2006.

VISACRO, S. F., **"Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanism of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines"**, Journal of Lightning Research. , v.1, p.60 - 68, 2007.

YADEE, P., e PREMRUDEEPREECHACHARN, S.; **"Analysis of Tower Footing Resistance Effected Back Flashover Across Insulator in a Transmission System"**, International Conference on Power Systems Transients (IPST'07) in Lyon, France on June 4-7, 2007

ZENG, R.; KANG, P.; CHEN S.; ZOU, J.; **"Lightning Transient Performance Analyses of Substation on Complete Transmission Line Model of Power Network and Grounding Systems"**, IEEE Transaction on Magnetics Compatibility Vol.42, n° 4, April 2006.