

Universidade Federal de Pernambuco-UFPE
Centro de Tecnologia e Geociências-CTG
Departamento de Engenharia Elétrica-DEE
Curso de Engenharia Elétrica



*Proteção de Linhas de Transmissão e
Subtransmissão Frente a Descargas
Atmosféricas*

Trabalho de Conclusão de Curso

VIRTUS IMPAVIDA

Wagner Ignacio de Andrada Uchôa
Engenharia Elétrica Eletrotécnica
Orientador: Luiz Henrique Alves de Medeiros

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

U17p	<p>Uchôa. Wagner Ignácio de Andrada Proteção de linhas de transmissão e subtransmissão frente a descargas atmosféricas / Wagner Ignácio de Andrada - Recife: O Autor, 2014. 53 folhas, il.</p> <p>Orientador: Prof. Luiz Henrique Alves de Medeiros. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia Elétrica, 2014. Inclui Referências.</p> <p>1. Engenharia Elétrica. 2. Proteção SPDA. 3. Linhas de transmissão. 4. Para-raios. 5. Descargas atmosféricas. I. Medeiros, Luiz Henrique Alves de. (Orientador). II. Título.</p>	UFPE
	621.3 CDD (22. ed.)	BCTG/2014-69

Sumário

1. Introdução	6
2. Definições do Fenômeno em Estudo	8
2.1. Definições do Fenômeno da Descarga Atmosférica.....	8
2.2. Linhas de Transmissão e Subtransmissão	11
2.3. Cadeia de Isoladores das LT's	12
3. Software Utilizado	12
4. Modelagem do Sistema.....	14
4.1. Modelagem dos Componentes	14
4.1.1. Linhas de Transmissão e de Subtransmissão.....	14
4.1.2. Para-raios.....	20
4.1.3. Isoladores e Aterramento	22
4.1.4. Descarga Atmosférica	24
4.2. Descrição e Modelagem da LT	27
4.2.1. Descrição da LT	27
4.2.2. Modelagem da LT no ATP	27
4.2.2.1. Considerações Sobre a Modelagem	27
5. Simulações da LT em Estudo	33
5.1. LT sem Cabos Para-raios de Forma Ideal	33
5.2. LT sem Cabos Para-raios com Cadeia de Isoladores.....	36
5.2.1. Cadeia de Isoladores com Aterramento Ideal	36
5.2.2 Cadeia de Isoladores com Aterramento Real.....	38
5.3. LT sem Cabos Para-raios com Para-raios de Linha	40
5.4. LT com Cabos Para-raios	44
5.4.1.1 Elevado Valor de Resistência de Pé de Torre.....	49
5.4.1.2 Valor Considerado Ideal Para Resistência de Pé de Torre	51
6. Conclusões.....	53
7. Referências bibliográficas	54

Lista de Figuras

Figura 1. Fases de uma descarga atmosférica	9
Figura 2. Tipos de descargas atmosféricas.....	10
Figura 3. Modelo π usado na modelagem monofásica.	16
Figura 4. Modelo π usado na modelagem trifásica.	17
Figura 5. Modelo π com ciclo de transposição.....	17
Figura 6. Modelo recomendado pelo IEEE.....	20
Figura 7. Para-raios de Linha trifásicos modelados no ATPdraw.....	22
Figura 8. Isoladores de suspensão e representação das capacitâncias equivalentes.	23
Figura 9. Modelagem trifásica de um isolador no ATP.....	23
Figura 10. Aterramento utilizado em estruturas de linhas de Transmissão e Subtransmissão. Fonte; NSA Consultoria e Informática LTDA	24
Figura 11. Parâmetros para definição da forma de onda de uma descarga elétrica. Fonte; NSA Consultoria e Informática LTDA.....	24
Figura 12. Ícone da fonte geradora da forma de onda <i>Heidler</i> no ATP.....	26
Figura 13. Ajustes Forma de onda <i>Heidler</i> gerada pelo ATP – 4000A – 1,2/50 μ s.	26
Figura 14. Fonte de tensão equivalente para injeção de surtos de tensão.	26
Figura 15. Fonte de corrente equivalente para injeção de surtos de corrente.	27
Figura 16. Estrutura de circuito simples de 230kV com um condutor por fase e com cabos para-raios.....	28
Figura 17. Figura com diâmetro dos condutores a partir do catálogo NEXANS.	29
Figura 18. Figura com dados do condutor a partir do catálogo NEXANS.	30
Figura 19. Janela <i>Model</i> com dados inseridos no LCC (ATPDraw).	31
Figura 20. Janela <i>Data</i> com dados inseridos no LCC (ATPDraw).....	32
Figura 21. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV.....	34
Figura 22. Nível de Tensões nas Três fases no ponto de incidência do surto Atmosférico.	34
Figura 23. Nível de Tensões nas Três fases no supressor de surto da esquerda (início da LT).	35
Figura 24. Nível de Tensões nas Três fases no supressor de surto da direita (fim da LT).	35
Figura 25. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV com cadeia de isoladores com aterramento ideal.	37
Figura 26. Curto circuito provocado sobre a cadeia de isoladores na fase C atingida pela descarga atmosférica.....	38
Figura 27. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV com cadeia de isoladores com aterramento de 20 Ω	39
Figura 28. Curto circuito provocado sobre a cadeia de isoladores na fase C atingida pela descarga atmosférica e ocorrência de <i>back flashover</i>	39
Figura 29. Nível de Tensões nas Três fases no ponto adjacente ao de incidência da descarga atmosférica.	40
Figura 30. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV com cadeia de isoladores com aterramento de 20 Ω e para-raios de linha inseridos no ponto de incidência do surto atmosférico.....	41
Figura 31. Níveis de Tensões nas três fases no ponto de incidência do surto atmosférico onde foi inserido para-raios de linha.	42

Figura 32. Níveis de Tensões nas Três fases no ponto adjacente à direita ao de incidência da descarga atmosférica onde foi inserido para-raios de linha.	42
Figura 33. Níveis de Tensões nas Três fases no ponto adjacente à esquerda ao de incidência da descarga atmosférica onde foi inserido para-raios de linha...	43
Figura 34. Níveis de Tensões nas Três fases no ponto de incidência da descarga atmosférica, quando inseridos para-raios de linha nos vãos adjacentes.	43
Figura 35. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV com cabos para-raios e cadeia de isoladores interligados ao aterramento de 20Ω	45
Figura 36. Nível de Tensão no cabo para-raios no ponto de incidência da descarga atmosférica.	46
Figura 37. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua dissipação nos vãos adjacentes a direita ao de incidência da descarga atmosférica.	46
Figura 38. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua dissipação nos vãos adjacentes à esquerda ao de incidência da descarga atmosférica.	47
Figura 39. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua completa dissipação 10 vãos após a incidência da descarga atmosférica.	47
Figura 40. Níveis de Tensões induzidas nas Três fases no ponto de incidência da descarga atmosférica no cabo para-raios.	48
Figura 41. Nível de Tensão no cabo para-raios no ponto de incidência da descarga atmosférica (com aterramento de 100Ω).	49
Figura 42. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua dissipação nos vãos adjacentes à direita ao de incidência da descarga atmosférica (com aterramento de 100Ω).	50
Figura 43. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua dissipação nos vãos adjacentes à esquerda ao de incidência da descarga atmosférica (com aterramento de 100Ω).	50
Figura 44. Níveis de Tensões induzidas nas Três fases no ponto de incidência da descarga atmosférica no cabo para-raios (com aterramento de 100Ω).	51
Figura 45. Nível de Tensão no cabo para-raios no ponto de incidência da descarga atmosférica (com aterramento de 8Ω).	52
Figura 46. Níveis de Tensões induzidas nas Três fases no ponto de incidência da descarga atmosférica no cabo para-raios (com aterramento de 8Ω).	52

1. Introdução

Nos últimos anos, verifica-se a crescente preocupação por parte dos fornecedores no que diz respeito à qualidade de seus produtos, em relação à satisfação de seus clientes, principalmente quando partimos para a energia que é à base de desenvolvimento de qualquer sociedade contemporânea.

Para as empresas de geração, transmissão e distribuição de energia o problema torna-se ainda mais complexo, devido à abrangência física de seus componentes (usinas, linhas de transmissão e redes de distribuição) e à exposição dos mesmos aos variados tipos de fenômenos da natureza (descargas atmosféricas, temporais, vendavais, entre outros) que tornam o sistema como um todo vulnerável, ocasionando por vezes o seu desligamento.

Do ponto de vista da proteção, o uso de topologias como cabos para-raios, supressores de surto, para-raios de linhas e até a própria cadeia de isoladores, ajudam a blindar ou proteger o sistema contra perturbações do tipo descargas atmosférico, mantendo assim o fornecimento contínuo de energia.

Dados estatísticos apontam para a descarga atmosférica como causa de 70% dos desligamentos das linhas de transmissão, aproximadamente 30% para as redes de distribuição e também mostram que vêm crescendo os índices cerâmicos no país [14].

Com a finalidade de estudar o comportamento do sistema de proteção diante de uma descarga atmosférica, tendo em vista os crescentes índices cerâmicos no país, este trabalho foi dividido em duas partes.

A primeira parte do trabalho consistiu na realização de estudos e levantamento bibliográfico sobre pesquisas correlatas existentes na literatura nacional e internacional especializada. Pesquisas sobre métodos numéricos existentes para tratamento do problema juntamente com simulações computacionais e análise dos componentes elétricos existentes em uma Linha foi uma contribuição de fundamental importância no estabelecimento de critérios de proteção contra descargas atmosféricas, que assegure os requisitos necessários à operação satisfatória de todo o sistema elétrico, técnica e economicamente.

A segunda parte do trabalho consistiu em estudos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em linhas de transmissão e subtransmissão, contendo estudos sobre diversos sistemas de proteção contra

descargas atmosféricas nestas linhas, como sistemas de blindagem e supressores de surto utilizados na proteção de linhas de transmissão e subtransmissão. A metodologia adotada nesta parte do trabalho consiste na utilização do software ATP para a modelagem e simulação das linhas e seus respectivos sistemas de proteção em estudo.

Finalmente, são apresentados os resultados das simulações e as conclusões baseadas nestas análises.

2. Definições do Fenômeno em Estudo

2.1. Definições do Fenômeno da Descarga Atmosférica

O fenômeno das descargas atmosféricas pode ser compreendido como a ruptura da rigidez dielétrica do ar entre duas superfícies carregadas eletricamente com polaridades opostas, podendo ocorrer entre nuvens e/ou entre uma nuvem e a terra, consistindo em dezenas de impulsos da ordem de kA [2][3].

Existem várias teorias de como ocorre a separação das cargas. Em geral é dito que as correntes ascendentes de ar transportam as partículas positivas e pequenas gotas de água para a parte superior da nuvem, enquanto as partículas negativas são levadas para a base da nuvem por gotas de água maiores.

Um grande acúmulo de cargas negativas se desenvolve na base da nuvem, enquanto é induzido um grande acúmulo de cargas positivas na terra, criando uma diferença de potencial entre a nuvem e a terra. Esse acúmulo de cargas continua a crescer até que o gradiente elétrico em uma das concentrações de cargas, na nuvem ou na terra, exceda a suportabilidade dielétrica do ar, tendo como consequência o movimento de cargas da nuvem para a terra ou da terra para a nuvem.

A tensão de ruptura para o ar seco é da ordem 30kV/cm, mas pode ser bem menor, com a redução da pressão atmosférica, devido a altura da nuvem, e também pela elevada umidade relativa e presença de gotas de água.

O processo da descarga atmosférica inicia-se por uma descarga preliminar ou descarga piloto, que se movimenta em degraus que podem alcançar de 15 a 50 metros de comprimento, distribuindo-se em um canal altamente ionizado o acúmulo de cargas no interior da nuvem, seja da base para o solo, de qualquer ponto no interior da nuvem para outro ponto no interior da própria nuvem ou para outra nuvem. Os degraus descrevem trajetórias em linhas retas, mas para cada novo avanço geralmente surge outra direção, formando ramos. É essa característica que dá o aspecto tortuoso às descargas atmosféricas [2][3].

É apresentado na Figura 1(a) a 1(d) o processo mais comum da ocorrência de uma descarga atmosférica a partir de uma descarga preliminar originada de um acúmulo de cargas negativas na base da nuvem em direção ao solo (Figura 1(a)). Quando a descarga preliminar alcança o solo, ocorre uma corrente de retorno (*return stroke*) extremamente brilhante, que se propaga da terra em direção à nuvem, através do caminho criado pela descarga preliminar (Figuras 1(b)). A ocorrência da corrente de retorno é o ponto alto de uma descarga atmosférica, quando ocorre a movimentação de grandes quantidades de cargas (Figuras 1(c) e 1(d)).

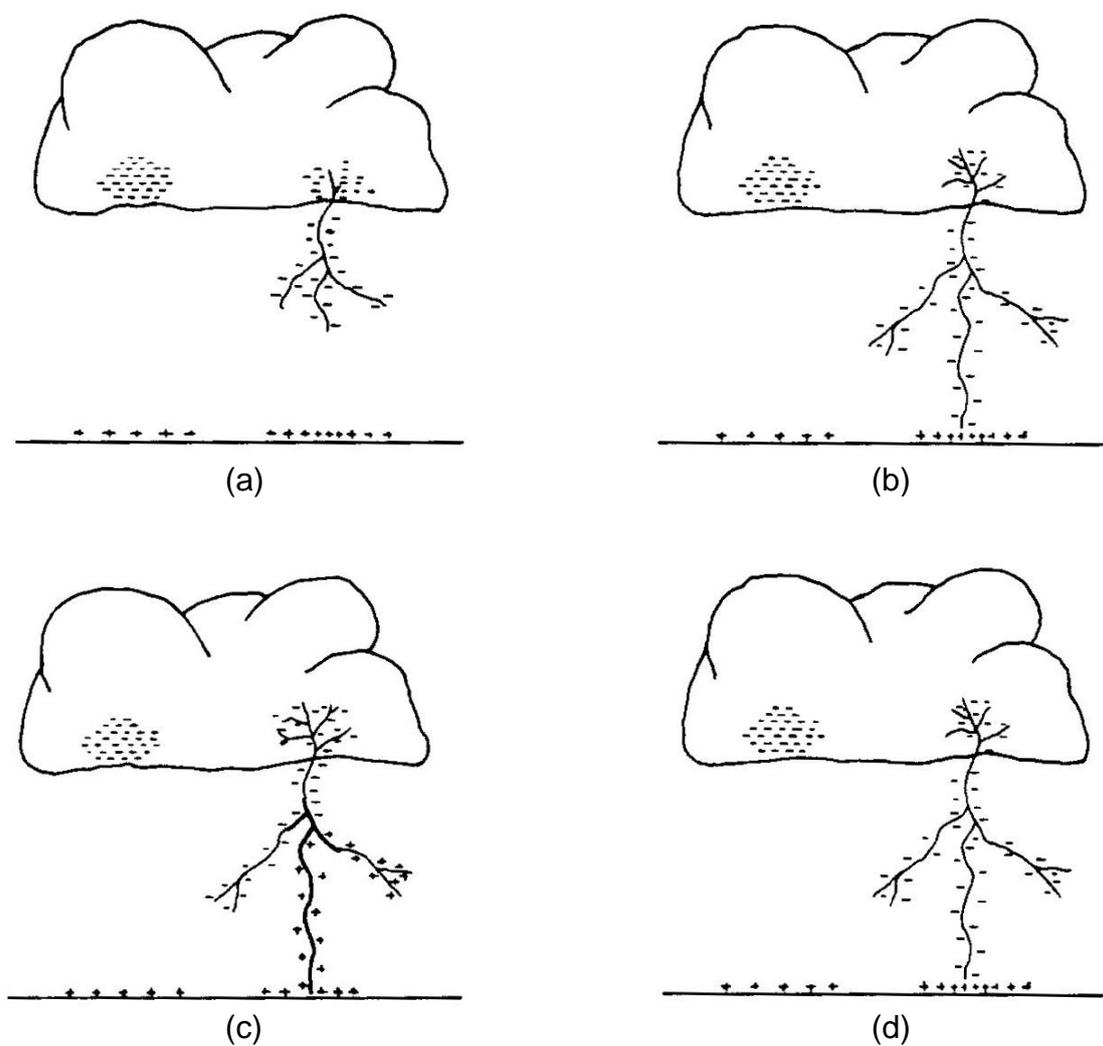


Figura 1. Fases de uma descarga atmosférica

Há também a possibilidade de que, antes da descarga preliminar atingir o solo, ocorra a formação de um movimento ascendente de cargas de polaridade oposta à polaridade da descarga preliminar, devido ao forte campo elétrico entre a ponta da descarga preliminar e o solo. Estas cargas ascendentes podem então encontrar a descarga preliminar em algum ponto do trajeto acima do solo, dando início à descarga de retorno a partir deste ponto.

Quando a corrente de retorno completar a descarga do acúmulo de cargas da nuvem que deu origem ao processo, o potencial desse acúmulo de carga fica bastante reduzido, desenvolvendo uma elevada diferença de potencial entre esse centro de cargas e outros centros de cargas dentro da nuvem, criando canais pelos quais esses acúmulos são ligados ao caminho ainda ionizado da primeira descarga. Um novo raio se desenvolve entre a nuvem e o solo, seguindo um caminho, a partir de agora, sem ramificações, conseqüentemente com uma velocidade maior que a descarga preliminar. Depois que atinge o solo, ocorre uma segunda descarga de retorno do solo para a nuvem. Esse processo pode se repetir várias vezes. Aproximadamente 80% dos raios apresentam no mínimo dois componentes luminosos, em torno de 20% têm de três a cinco componentes, mas existem registros de descargas atmosféricas com até 40 componentes [2].

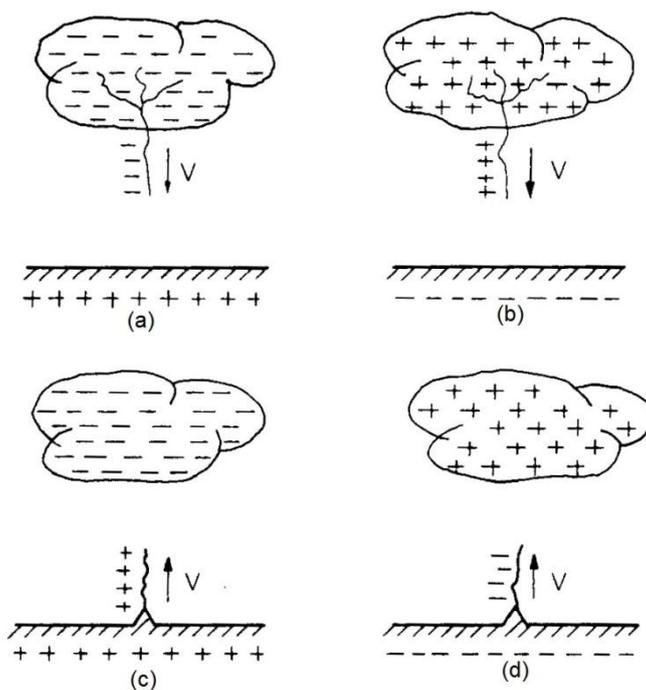


Figura 2. Tipos de descargas atmosféricas.

É apresentado na Figura 2(a) a 2(d) os quatro tipos possíveis de descargas atmosféricas classificadas de acordo com a direção de propagação da descarga preliminar e polaridade de sua carga. Os raios descendentes, Figura 2(a) e 2(b), são os mais representativos das descargas atmosféricas de modo geral. Os tipos ascendentes, Figura 2(c) e 2(d), são mais observados no topo de montanhas ou em estruturas muito altas [2].

A maioria das descargas atmosféricas é de polaridade negativa, sendo considerado um percentual igual ou maior que 90%, fato de grande importância para o desempenho dos sistemas de transmissão e distribuição em virtude da diferente resposta de suas isolações de acordo com a polaridade da descarga.

A maior incidência de descargas atmosféricas ocorre dentro da própria nuvem ou entre nuvens. A relação entre descargas atmosféricas que ocorrem entre nuvens e entre nuvens e o solo varia de 1,5 a 3 em zonas temperadas e de 3 a 6 em climas tropicais [2].

2.2. Linhas de Transmissão e Subtransmissão

As linhas de transmissão (LT) são aquelas que possuem tensão nominal entre fases a partir de 230kV e normalmente possuem mais de 20m de altura. As linhas de subtransmissão possuem tensão nominal em geral de 69kV e 138kV normalmente possuem mais de 10m de altura. Quando uma descarga atmosférica atinge uma fase da LT ela injeta um surto de corrente capaz de produzir tensões que se propagam em sentidos opostos pela linha. Ao atingir a cadeia de isoladores na torre de transmissão ou subtransmissão, se a amplitude dessa tensão for superior ao limite de suportabilidade tolerado pela cadeia, pode acarretar descarga disruptiva e provocar a interrupção no fornecimento de energia devido ao desligamento. A descarga também poderá atingir a torre de transmissão, e nesse caso, a parte da corrente que flui através dela, deve gerar um potencial na torre, em relação à terra, suficiente para gerar o mesmo efeito citado anteriormente na cadeia de isoladores [1].

2.3. Cadeia de Isoladores das LT's

São dispositivos usados nas redes elétricas, que têm como função principal isolar eletricamente corpos condutores, como as fases das linhas de transmissão, de outros elementos da rede e os suportes nas estruturas da linha. No caso de linhas aéreas de transmissão, esta função é realizada através da ligação de múltiplos isoladores em cadeia, designando-se o conjunto por cadeia de isoladores ou bastões poliméricos, permitindo o isolamento elétrico entre os condutores de fase e os apoios para sustentação mecânica dos condutores.

Para o dimensionamento da cadeia de isoladores são considerados os valores mínimos de diferença de potencial a ser suportado (normalmente o valor instantâneo máximo entre uma fase e a terra) com os valores das máximas sobretensões esperadas, em resultado de regimes transitórios associados, entre outros, a manobras de disjuntores e a descargas atmosféricas. Nestas situações, as cadeias de isoladores podem ser submetidas a diferenças de potenciais muito superiores às registradas em regime normal de funcionamento.

Em condições normais, e admitindo um isolamento perfeito, a cadeia de isoladores equivale a um circuito de impedância infinita. Na realidade todos possuem uma impedância que quando sujeitos a intempéries esses valores alteram. Quando a diferença de potencial entre dois pontos (extremidades) ultrapassa a rigidez dielétrica do meio isolante, podem ocorrer arcos elétricos entre esses dois pontos com riscos de danos à cadeia de isoladores.

3. Software Utilizado

O programa de transitórios eletromagnéticos da *Bonneville Power Administration* (BPA), denominado EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), foi desenvolvido por Herman W. Dommel na década de 60, com base no trabalho de Frey e Althammer (*Brown Boveri, Switzerland*), em Munique, Alemanha.

O programa inicial só permitia a modelagem de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, resistências, capacitâncias e linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Os elementos

concentrados utilizavam a regra de integração trapezoidal e as linhas de transmissão, o método de Bergeron.

Dommel trabalhou na BPA em vários períodos entre 1964 e 1973 no desenvolvimento de vários modelos, que foram incorporados ao programa com a ajuda de diversos colaboradores. A partir de 1973 Dommel foi para a Universidade de British Columbia (UBC) e Scott Meyer assumiu a coordenação do desenvolvimento do programa na BPA.

A coordenação da BPA, através de Scott Meyer, estabeleceu um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP, que tornou o programa uma ferramenta bastante poderosa para a execução de estudos de fenômenos transitórios.

Em 1984, o *Electric Power Research Institute* decidiu investir no programa EMTP, com base numa pesquisa realizada entre os usuários norte-americanos do programa. Foi criado o grupo de desenvolvimento do EMTP (DCG - Development Coordination Group), com a participação de BPA, *Bureau of Reclamation*, *Western Area Power Administration*, *Ontario Hydro*, *Hydro Quebec*, *Canadian Electrical Association* e ASEA, com a finalidade de melhorar os modelos existentes, criar novos modelos e melhorar a documentação atual.

Divergências entre Scott Meyer e EPRI levaram à criação de uma nova versão do EMTP, a qual foi enviada para a Bélgica, onde foi instalado o *Leuven EMTP Center* (LEC). Esta nova versão é denominada ATP (*Alternative Transients Program*), mas, na realidade, é apenas uma continuação das versões anteriores do programa EMTP.

O programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de *Bergeron*) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

Como um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo são calculados valores a intervalos de tempo discretos.

O programa permite a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores e vários outros.

4. Modelagem do Sistema

4.1. Modelagem dos Componentes

Em diversos sistemas, torna-se conveniente a modelagem para representar o comportamento real do sistema, por exemplo, a representação de linhas por elementos de circuitos ideais. O motivo para se aprimorar um modelo é melhorar a representação do mesmo ao sistema estudado, por exemplo, se o sistema apresenta uma perturbação, é interessante estudar a resposta do modelo a essa perturbação.

Foram estudados alguns modelos para simulação dos componentes envolvidos no estudo de coordenação de isolamento de subestações. A representação deve ser o mais fiel possível para que se obtenham resultados confiáveis. Porém, algumas considerações e aproximações serão feitas em alguns casos, devido à quantidade de fenômenos envolvidos no problema. Também serão apresentados valores típicos encontrados na literatura, nos casos em que haja ausência de informações específicas.

4.1.1. Linhas de Transmissão e de Subtransmissão

Normalmente, os modelos mais indicados para linhas de transmissão dependem de sua extensão. Linhas com até 80 km são chamadas de linhas curtas, e em alguns estudos, despreza-se a capacitância dessas linhas por ser muito pequena, logo se representa a linha apenas por uma resistência e indutância. Linhas com extensão entre 80km e 240km são consideradas médias e são comumente representadas pelo modelo PI e são linhas que possuem ciclos de transposição. Linhas maiores que 240km, são consideradas longas e representadas por mais de um modelo PI ou pelo modelo com parâmetros distribuídos. As linhas de transmissão da rede elétrica são trifásicas, porém, uma vez que o sistema é considerado equilibrado, ou seja, as linhas de transmissão perfeitamente transpostas, o estudo de transitórios

eletromagnéticos considera apenas os parâmetros de sequência positiva. Os modelos a seguir também consideram o cálculo apenas para uma sequência.

Nos modelos de linhas de transmissão adotados nos estudos de transitórios tem-se uma grande variedade de opções. Podem-se dividir os modelos existentes basicamente em três tipos:

- Modelos com parâmetros concentrados;
- Modelos com parâmetros distribuídos;
- Modelos com parâmetros dependentes da frequência.

A evolução da modelagem de linhas de transmissão encontra-se atualmente concentrada no desenvolvimento de modelos melhores que considerem a variação dos parâmetros com a frequência. Atualmente os modelos mais usados ainda são os modelos de parâmetros distribuídos.

Serão apresentados a seguir as possíveis modelagens para linhas de transmissão, subtransmissão ou distribuição utilizando modelos construídos com parâmetros concentrados, distribuídos e que dependem da variação de frequência.

Modelagem através de parâmetros concentrados

A primeira ponderação a se fazer é sob quais condições pode-se representar os comportamentos resistivo, indutivo e capacitivo distribuídos por toda a linha, concentrados em um ponto. Essa conclusão depende das características do sistema, principalmente do comprimento do sistema e do comprimento de onda do sinal aplicado. O comprimento de onda λ é definido na equação 1, onde c é a velocidade de propagação do sinal e f a frequência do mesmo, e representa o quanto um ciclo se estende no espaço. um sinal de 60Hz, por exemplo, tem um comprimento de onda de $\lambda = 3 \times 10^8 / 60 = 5 \times 10^6$ m.

$$c = \lambda * f \quad (1)$$

A comparação da extensão de um ciclo da tensão com a extensão de duas linhas de transmissão, a primeira linha (LT1) se estende por 100km a segunda (LT2) tem um comprimento de 500km e se inicia no ponto em que a

primeira termina. Como a variação da tensão em LT1 é muito pequena, então pode-se considerar que a linha toda está com a mesma tensão a cada instante de tempo, e isso viabiliza o uso dos parâmetros concentrados, o que não pode-se dizer sobre LT2, onde a variação de tensão é muito maior. Ou seja, quando o comprimento da linha é muito menor que o comprimento de onda pode-se usar parâmetros concentrados. Com o uso de parâmetros concentrados, os comportamentos resistivo, indutivo e capacitivo da linha não ocorrem distribuídos ao longo da linha, sendo essa a principal limitação desse modelo. Como esses comportamentos ocorrem distribuídos, a alteração da corrente devido a capacitância é contínua no decorrer da linha, e a tensão sofre a influência desse efeito na corrente, portanto o fato de se concentrar os elementos ideais acrescenta um erro no modelo, sendo esse erro considerável em linhas longas (linhas maiores que 240km), criando assim a necessidade de buscar um modelo que incorpore a distribuição dos parâmetros ao longo da linha ou usar mais de um modelo PI para representar a linha, por exemplo, uma linha longa de 300km, poderia ser dividida em duas linhas médias de 150km usando dois modelos PI.

No modelo π considera-se uma modelagem monofásica (Figura 3) ou uma modelagem trifásica onde se podem considerar o efeito do acoplamento entre as três fases.

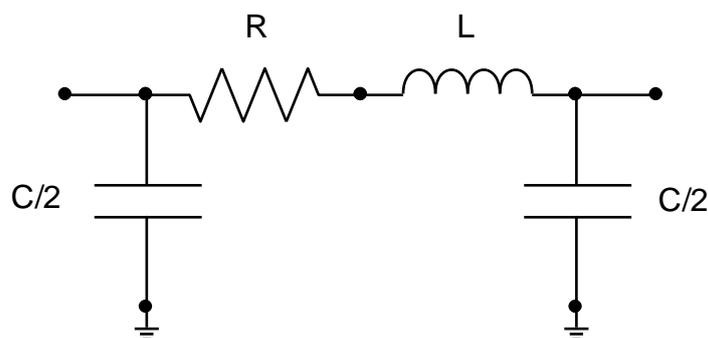


Figura 3. Modelo π usado na modelagem monofásica.

Usa-se o modelo π considerando-se o acoplamento entre as fases, como mostrado na Figura 4. As grandezas $[R]$, $[L]$ e $[C]$ envolvidas são matrizes as quais contêm a informação do acoplamento entre fases. Pode-se desprezar a capacitância considerando-se a matriz $[C]$ como nula. O que equivale a considerar a linha representada apenas pela impedância série.

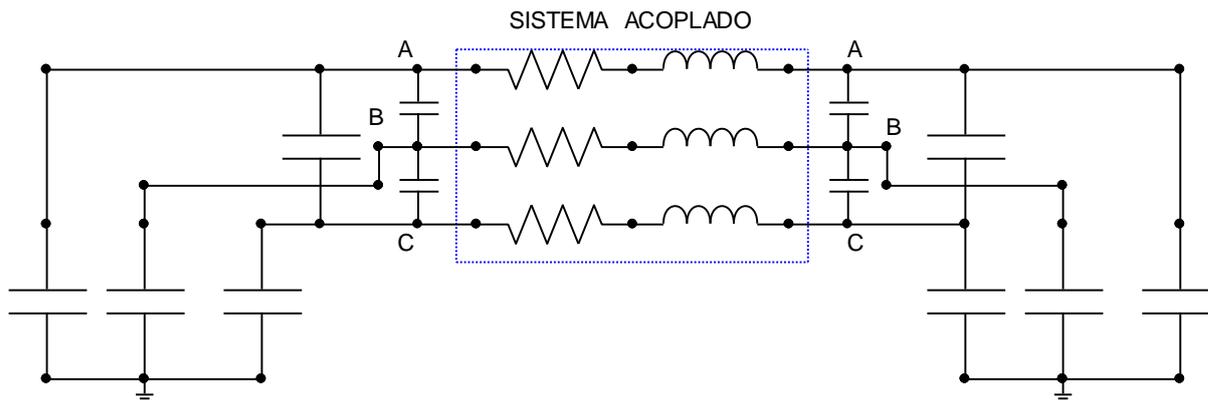


Figura 4. Modelo π usado na modelagem trifásica.

Todas as matrizes são simétricas e são obtidas da seguinte maneira:

- Elementos da diagonal

$$R_{ii} + j\omega L_{ii} \Rightarrow \text{impedância própria da fase } i.$$

$$C_{ii} \Rightarrow \text{soma de todas as capacitâncias no terminal da fase } i.$$

- Elementos fora da diagonal

$$R_{ik} + j\omega L_{ik} \Rightarrow \text{impedância mutua entre a fase } i \text{ e fase } k.$$

O valor R_{ik} será diferente de zero quando a resistividade da terra for diferente de zero (efeito da correção do Método de Carson).

Tanto para uma linha com modelagem monofásica como trifásica pode-se usar vários PI's para representar a linha ao invés de utilizar apenas um deles. Pode-se desta maneira, por exemplo, representar trechos de uma linha transposta como mostrado esquematicamente na Figura 5.

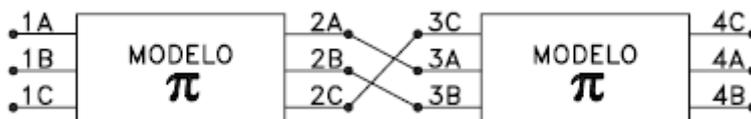


Figura 5. Modelo π com ciclo de transposição.

Modelos com parâmetros dependentes da frequência

Os modelos de linha de transmissão dependentes da frequência representam todos os parâmetros em função da mesma. O modelo propõe minimizar as instabilidades numéricas produzidas pela natureza altamente oscilatória da resposta em frequência de linhas de transmissão. Assim, os modelos dependentes de frequência utilizam funções peso aplicadas às equações de linhas de transmissão e, embora represente a dependência com a frequência dos parâmetros da linha, a matriz de transformação modal é constante com a frequência.

Estes modelos consistem basicamente na modelagem de ondas viajantes na linha de transmissão, os quais incorporam a dependência da frequência em todos os parâmetros. O modelo de representação JMartí demanda um maior esforço computacional quando comparado com o modelo de BERGERON, outro modelo muito utilizado para representação de parâmetros dependentes da frequência. Contudo o modelo JMartí é capaz de fornecer maiores detalhes da linha para uma larga faixa de frequências.

Os modelos dependentes da frequência devem ser utilizados em simulações que operem em frequências diferentes da fundamental visando a precisão dos transitórios de sobretensões e das análises harmônicas.

O modelo no domínio das fases, como por exemplo, o JMartí é numericamente mais robusto e mais preciso do que qualquer outro método disponível para representação de cabos e linhas. Essa representação envolve maior complexidade e abrangência do espectro de frequência para os equipamentos e fenômenos envolvidos no estudo, além de apresentar excelente estabilidade do mesmo [17].

Modelos disponíveis no ATP

Serão apresentados a seguir os modelos de linhas disponíveis no software ATP.

- Linha RL acoplada

	R_o = resistência de sequência zero em Ω
	L_o = indutância de sequência zero em mH ou Ω

	R+ = resistência de sequência positiva em Ω
	L+ = indutância de sequência positiva em mH ou Ω

Lines/Cables - Lumped – RL Sym. 51 – 3 phases.

- Linha Transposta Monofásica

	R/l = Resistência em Ω/m
	Parâmetro A: ILINE = 0 Indutância em mH/m ou Ω/m de acordo com X_{opt} ILINE = 1 ou 2 - Módulo da impedância de surto em Ω
	Parâmetro B ILINE = 0 - Capacitância em $\mu F/m$ ou $\mu Mho/m$ de acordo com C_{opt} ILINE = 1 - Velocidade de propagação em m/s ILINE = 2 - tempo de propagação
	L = comprimento da linha em km
	ILINE = configura a natureza dos parâmetros

- Linha Trifásica Transposta

	R/l+ = Resistência de sequência positiva em Ω/m
	R/l0 = Resistência de sequência zero em Ω/m
	Parâmetro A ILINE = 0 Indutância em mH/m ou Ω/m de acordo com X_{opt} ILINE = 1 ou 2 - Módulo da impedância de surto em Ω + = sequência positiva; 0 = sequência zero
	Parâmetro B ILINE = 0 - Capacitância em $\mu F/m$ ou $\mu Mho/m$ de acordo com C_{opt} ILINE = 1 - Velocidade de propagação em m/s ILINE = 2 - tempo de propagação + = sequência positiva; 0 = sequência zero
	L = comprimento da linha em km
	ILINE = configura a natureza dos parâmetros

	IPUNCH = 0 - Não considera a condutância da linha
	IPUNCH = 1 - considera a condutância da linha

4.1.2. Para-raios

Na proteção dos sistemas de potência, durante sobre tensões de manobra ou atmosféricas, os para-raios desempenham um importante papel em limitar o nível de tensão e protegem os equipamentos da subestação, conduzindo o excesso de corrente do sistema para a terra, quando ocorrem grandes perturbações. A capacidade de absorção de energia devido às sobretensões está diretamente relacionada com a vida útil dos para-raios e, conseqüentemente, com a efetiva proteção oferecida aos sistemas. O dimensionamento incorreto do equipamento pode causar danos aos seus componentes como fissuras, quebra do resistor ou mesmo instabilidade térmica.

Os para-raios que compõe o nosso sistema de Transmissão e Subtransmissão de energia em geral são do tipo de Óxido de Zinco (ZnO). Dentre os modelos estudados, foi utilizado o modelo do IEEE nas simulações.

Nesse modelo, o varistor é representado por duas seções de resistências não lineares designadas por A0 e A1, separadas por um filtro R-L, R1 e L1. Este modelo foi ideal para a representação de supressores de surto na entrada das subestações, tendo em vista que interesse está no comportamento da linha diante uma descarga atmosférica.

O modelo na forma de circuito elétrico é apresentado na Figura 6.

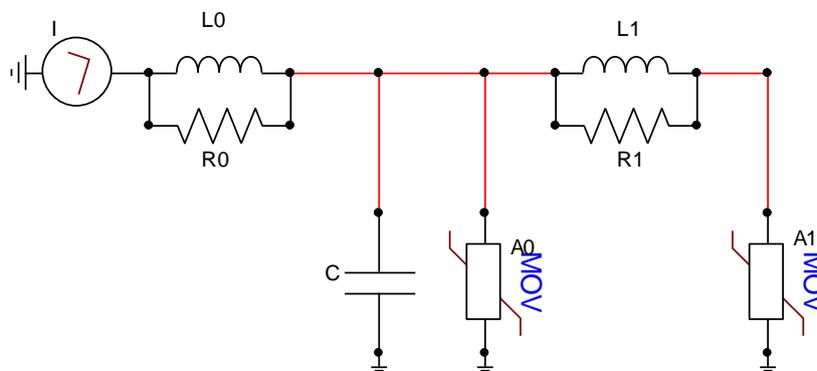


Figura 6. Modelo recomendado pelo IEEE.

Os parâmetros apresentados na Figura 6 são calculados conforme as equações abaixo.

$$L1 = 15 \frac{d}{n} \quad (\mu\text{H}) \quad (2)$$

$$R1 = 65 \frac{d}{n} \quad (\Omega) \quad (3)$$

$$L0 = 0,2 \frac{d}{n} \quad (\mu\text{H}) \quad (4)$$

$$R0 = 100 \frac{d}{n} \quad (\Omega) \quad (5)$$

$$C = 100 \frac{n}{d} \quad (\mu\text{F}) \quad (6)$$

Onde:

- $R0$: Evita instabilidades numéricas;
- C : Capacitância externa associada à altura do varistor ao solo;
- N : número de colunas paralelas do varistor;
- D : altura do varistor;
- $A0$ e $A1$: Estimados pelas curvas correspondentes;
- $L1$ e $R1$: Filtro RL.

O comportamento elétrico do modelo permite que duas situações distintas sejam analisadas. A primeira é em relação a surtos com frentes de onda lentas; a impedância do filtro é extremamente baixa, fazendo com que as duas seções possam ser consideradas em paralelo. A segunda diz respeito a frentes de ondas rápidas; a impedância do filtro aumenta. Essa característica implica que correntes de alta frequência sejam obrigadas a fluir na direção de $A0$, gerando uma tensão maior no varistor.

É necessário fazer o ajuste iterativo de $A0$, $A1$ e $L1$ para que se obtenha uma resposta satisfatória. Os parâmetros $A0$ e $A1$ são determinados através de informações do fabricante que podem ser encontrados nos respectivos catálogos. Alguns fabricantes encontrados na literatura foram ABB e SIEMENS.

Outra forma de proteção o qual vem sendo utilizada, é a inserção de para-raios de linhas em pontos considerados críticos da LT. Para a representação destes equipamentos ligados a determinadas estruturas da LT, foram utilizados resistores não lineares, modelados com a curva de um para-raios adequado à LT em operação como pode ser observado na Figura 7.

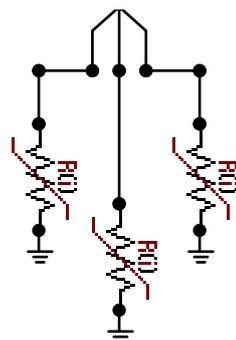


Figura 7. Para-raios de Linha trifásicos modelados no ATPdraw.

4.1.3. Isoladores e Aterramento

Neste item serão apresentados as definições sobre a cadeia de isoladores da LT e seu sistema de aterramento, junto com as suas respectivas modelagens utilizadas no software ATP.

- **Isoladores**

São dispositivos utilizados para suportar a tensão do sistema. Podem ser constituídos de materiais sólidos, líquidos ou gasosos, além dos espaçamentos no ar. Estes dispositivos possuem comportamento que dependem do tipo de esforço elétrico aplicado e do material utilizado para sua construção.

Um isolador, de qualquer tipo, constitui um capacitor imperfeito cujos dielétricos podem ser o ar ou material isolante utilizado em sua fabricação.

O capacitor resultante depende da forma como os isoladores estão dispostos. No caso de cadeias de isoladores, utilizadas na suspensão de linhas, estas resultam em um conjunto de capacitores em série (Figura 8).

A modelagem de isoladores é feita através de chaves controladas por tensão (tensão disruptiva) em paralelo com capacitâncias concentradas, resultante da associação das capacitâncias equivalentes de cada elemento isolador, conectadas entre cada fase e a torre (Figura 9). O valor das capacitâncias equivalentes depende do material e construção do isolador. Em geral isoladores de suspensão possuem uma capacitância típica entre 10pF e 50pF por seção.

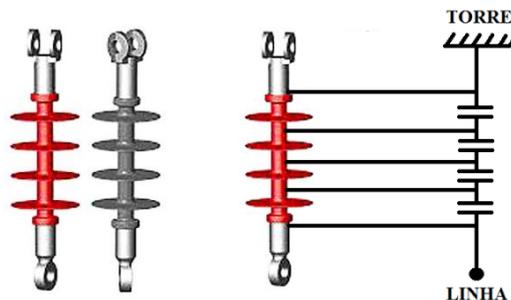


Figura 8. Isoladores de suspensão e representação das capacitâncias equivalentes.

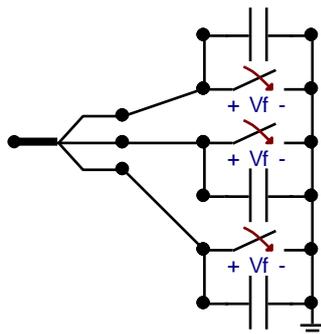


Figura 9. Modelagem trifásica de um isolador no ATP.

- **Aterramento**

O aterramento elétrico desempenha importante papel dentro do sistema elétrico, que é de escoar a corrente de descarga atmosférica para o solo, onde o valor da resistência e impedância de aterramento possuem significativas importâncias. Assim, torna-se necessário quando da utilização de supressores, hastes para-raios e cabos guarda que a resistência (impedância) de aterramento destes equipamentos seja a mais baixa possível.

Pode se observar na Figura 10 um exemplo de aterramento geralmente utilizado em torres de linhas de transmissão e subtransmissão. Este aterramento pode possuir diversos arranjos utilizando hastes de aterramento, com a finalidade da obtenção de uma resistência de aterramento dentro dos valores aceitáveis, sendo até 20Ω para transmissão e 30Ω para subtransmissão [15].

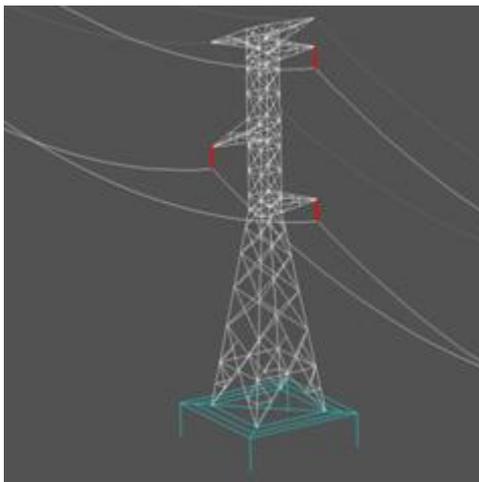


Figura 10. Aterramento utilizado em estruturas de linhas de Transmissão e Subtransmissão.

Fonte; NSA Consultoria e Informática LTDA

4.1.4. Descarga Atmosférica

Uma descarga atmosférica ocorre quando o campo elétrico, originado pelo acúmulo de partículas carregadas no interior de nuvens e no solo, excede a rigidez dielétrica do ar, provocando deslocamento de cargas e a formação de canais de ionização. Quando a carga no canal for elevada suficiente para que haja uma conexão nuvem-solo, esse canal será atravessado por uma corrente (corrente de retorno), relativamente alta, em média 30kA, que conduzirá a descarga parcial ou total do acúmulo de cargas.

Descargas atmosféricas podem ser modeladas como ondas de tensão ou ondas de corrente, onde as características da descarga elétrica são definidas pelo formato da onda a ser utilizada.

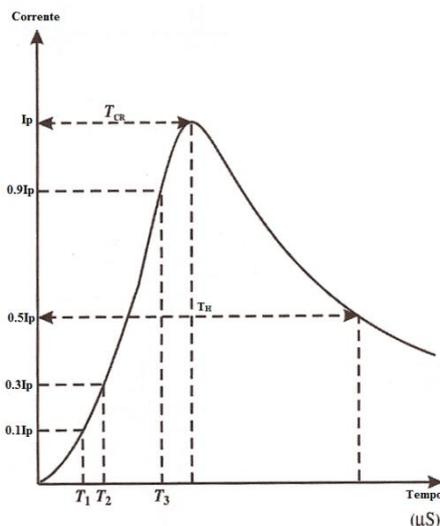


Figura 11. Parâmetros para definição da forma de onda de uma descarga elétrica.

Fonte; NSA Consultoria e Informática LTDA

- Onde I_p é o pico de Corrente, geralmente expresso em kiloamperes.
- Tempo de crista (topo da onda) ou tempo de frente, T_{CR} em microssegundos.
- Tempo de decaimento a 50% da crista T_H em microssegundos.
- Taxa de variação da corrente dI/dT , em kiloamperes por segundo. Esta taxa não é uniforme, seu valor deve ser expresso como:
 - Taxa Máxima (dI/dT_{\max}) = I_p/T_{CR}
 - Taxa 10%/90% ($dI/dT_{10/90\%}$) = $(0,9I_p - 0,1I_p)/(T_{0,9} - T_{0,1})$
 - Taxa 30%/90% ($dI/dT_{30/90\%}$) = $(0,9I_p - 0,3I_p)/(T_{0,9} - T_{0,3})$

A partir da observação da corrente de retorno em torres monitoradas foi criada uma aproximação da forma de onda de uma descarga atmosférica, conhecida como forma de onda ou função de *Heidler*.

A expressão analítica da função de *Heidler* é mostrada nas Equações 7 e 8.

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{\left(1 + \frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp(t/\tau_2) \quad (7)$$

$$\eta = \exp\left(-(\tau_1/\tau_2)(n(\tau_1/\tau_2))^{1/n}\right) \quad (8)$$

Onde:

- I_0 : amplitude máxima da corrente;
- τ_1 : constante associada ao tempo de frente;
- τ_2 : constante relativa ao tempo de decaimento;
- η : é o fator de correção da amplitude;
- n : é um expoente com valores entre 2 a 10.

A forma de onda de *Heidler* faz parte da biblioteca do ATP, como mostrado abaixo:



Figura 12. Ícone da fonte geradora da forma de onda *Heidler* no ATP.

A Figura 13 mostra uma forma de onda de Heidler com parâmetros de tempo padrão, tempo de frente de onda de $1,2\mu\text{s}$ e tempo de 50% de $50\mu\text{s}$.

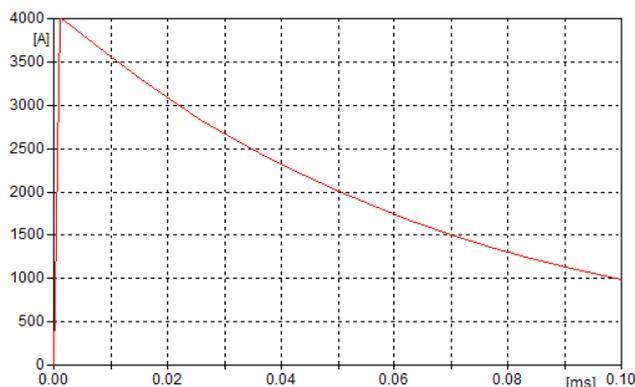


Figura 13. Ajustes Forma de onda Heidler gerada pelo ATP – 4000A – $1,2/50\mu\text{s}$.

O ponto de injeção do surto depende da análise a ser efetuada e dos dispositivos a serem dimensionados (geralmente em uma linha de transmissão ou na entrada de uma subestação) sem que a fonte modifique a impedância vista pelas reflexões provenientes do interior da subestação. Para efeito de análise deve ser utilizada a menor representação possível.

Na aplicação na forma de um surto de tensão, deve-se utilizar o modelo descrito na Figura 14.

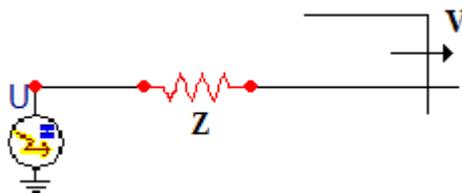


Figura 14. Fonte de tensão equivalente para injeção de surtos de tensão.

A impedância de surto Z deve ser igual à impedância de surto do barramento onde o modelo será conectado.

Na aplicação na forma de um surto de corrente, o modelo a ser empregado é descrito na Figura 15.

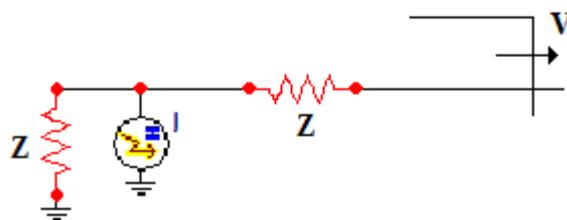


Figura 15. Fonte de corrente equivalente para injeção de surtos de corrente.

4.2. Descrição e Modelagem da LT

4.2.1. Descrição da LT

Para a modelagem, foi escolhido uma LT de fictícia 230kV, similar às LT's utilizadas por empresas de transmissão com alguns parâmetros disponíveis [13].

Foram identificados alguns modelos diferentes de torres para construção deste sistema, e com eles feito a modelagem em um determinado número de vãos suficientes para o estudo. A altura dessas torres varia entre 22 e 26m, o que implica em um modelo diferente para cada altura.

4.2.2. Modelagem da LT no ATP

A modelagem da desta LT com a utilização do programa ATP é feita nesta seção, onde os parâmetros de entrada dos componentes da interface gráfica ATPDraw para o software ATP, bem como as configurações do modelo são apresentados. A rotina LCC(*Line/Cable Constants*) foi escolhida, por possibilitar uma modelagem e simulação mais próxima da real, utilizando cada torre da LT, de forma que o programa calcula as matrizes impedâncias e capacitâncias de sequência da LT através dos dados disponíveis das torres.

4.2.2.1. Considerações Sobre a Modelagem

São descritas considerações preliminares para a modelagem da LT. As estruturas de uma linha de transmissão servem de suporte para os cabos condutores e para-raios. São utilizadas diversas estruturas em concreto, metálicas com perfis de aço galvanizado ou em postes de aço. Para determinação dos parâmetros elétricos das linhas, foi simulada uma linha de 40km através do LCC (ATPdraw), como apresentado na Figura 16.

O condutor para o caso em estudo conforme indicação foi o GROSBEAK CAA (condutor de alumínio com alma de aço), considerando 50°C como temperatura padrão.

Para o cálculos dos parâmetros utilizando a rotina *Line Constants* (LCC) presente no ATP para a acima de 230kV, são utilizados os dados conforme apresentado nas Figura 17 e Figura 18.

Tipo de cabo	Bitola [mcm]	Número de fios de alumínio	Diâmetro dos fios de alumínio[m m]	Número de fios de aço	Diâmetro dos fios de aço[mm]	Seção transversal de alumínio[m m ²]	Seção transversal do condutor[m m ²]	Diâmetro do condutor[m m]	Diâmetro da alma de aço[mm]
Waxwing	266,8	18.0	3,091	1.0	3,091	135,07	142,6	5,5	3,09
Linnet	336,4	26.0	2,888	7.0	2,245	170,32	198	18,3	6,74
Oriole	336,4	30.0	2,69	7.0	2,69	170,5	210,3	18,8	8,07
Pelican	477	18.0	4,135	1.0	4,135	241,72	255,1	20,7	4,14
Flicker	477	24.0	3,581	7.0	2,388	241,72	273,1	21,5	7,16
Hawk	477	26.0	3,439	7.0	2,675	241,51	280,8	21,8	8,03
Osprey	556,5	18.0	4,465	1.0	4,465	281,84	297,5	22,3	4,47
Hen	477	30.0	3,203	7.0	3,203	241,73	298,1	22,4	9,61
Parakeet	556,5	24.0	3,868	7.0	2,578	282,02	318,6	23,2	7,73
Kingbird	636	18.0	4,775	1.0	4,775	322,34	340,2	23,9	4,78
Duck	605	54.0	2,689	7.0	2,689	306,67	346,4	24,2	8,07
Peacock	605	24.0	4,034	7.0	2,69	306,74	346,5	24,2	8,07
Eagle	556,5	30.0	3,459	7.0	3,459	281,91	347,7	24,2	10,38
Goose	636	54.0	2,756	7.0	2,756	322,14	363,9	24,8	8,27
Rook	636	24.0	4,135	7.0	2,756	322,29	364,1	24,8	8,27
Grosbeak	636	26.0	3,973	7.0	3,089	322,33	374,8	25,2	9,27
Teal	605	30.0	3,607	19.0	2,164	306,55	376,4	25,3	10,82

Figura 17. Figura com diâmetro dos condutores a partir do catálogo NEXANS.

Através dos dados utilizados da Figura 17, determina-se o raio externo e interno do condutor como sendo a metade do diâmetro nominal:

$$R_{out} = \frac{25.2}{2} = 12.6mm = 1.26cm \quad R_{in} = \frac{9.72}{2} = 4.86mm = 0.486cm$$

Tipo de cabo	Bitola [mcm]	Carga de ruptura (Classe B)[kgf]	Ampacidade [A]	Raio médio geométrico [m]	Max. DC-resist. conductor 20°C[Ohm/km]	Resistência elétrica máxima CA 60Hz 75°C[Ohm/km]	Reatância indutiva[Ohm/km]	Reatância capacitiva[MOhm.km]
Waxwing	266,8	3068	450	0,006	0,213	0,303	0,3858	0,2321
Linnet	336,4	6203	530	0,00742	0,17	0,203	0,3698	0,2241
Oriole	336,4	7611	530	0,00778	0,17	0,201	0,3662	0,2227
Pelican	477	5240	640	0,00803	0,119	0,145	0,3639	0,2182
Flicker	477	7585	670	0,00863	0,12	0,144	0,3584	0,2164
Hawk	477	8608	660	0,00884	0,12	0,144	0,3566	0,2158
Osprey	556,5	6110	710	0,00867	0,102	0,124	0,3581	0,2146
Hen	477	10412	660	0,00926	0,12	0,142	0,3531	0,2144
Parakeet	556,5	8754	720	0,00932	0,102	0,124	0,3526	0,2127
Kingbird	636	6987	780	0,00927	0,089	0,106	0,353	0,2114
Duck	605	9822	770	0,0098	0,094	0,112	0,3488	0,2107
Peacock	605	9527	760	0,00972	0,094	0,114	0,3494	0,2107
Eagle	556,5	12143	730	0,01	0,103	0,122	0,3473	0,2107
Goose	636	10306	800	0,01004	0,09	0,107	0,347	0,2096
Rook	636	10005	780	0,00997	0,09	0,108	0,3475	0,2095
Grosbeak	636	11067	790	0,01021	0,09	0,108	0,3457	0,2089
Teal	605	13128	780	0,01043	0,094	0,112	0,3441	0,2087

Figura 18. Figura com dados do condutor a partir do catálogo NEXANS.

Para aplicar a correção do valor da resistência para uma dada temperatura, utilizamos a equação abaixo:

$$\frac{R_2}{R_1} = \left[\frac{285 + T_2}{285 + T_1} \right] \quad (13)$$

Onde R_1 é a resistência do condutor que se deseja determinar na temperatura T_1 , R_2 é a resistência conhecida na temperatura T_2 (a 75° de acordo com Figura 18), T é uma constante que varia com a natureza e a têmpera do material. O valor da constante para correção da resistência T foi 285 para condutores CAA, conforme catálogo do fabricante de cabos “Nexans”.

Considerando $T_1=50^\circ\text{C}$ e aplicando a equação (13) para correção da resistência para a temperatura padrão, temos:

$$R = 0.1005\Omega.$$

O LCC foi preenchido da seguinte forma de acordo com os parâmetros fornecidos:

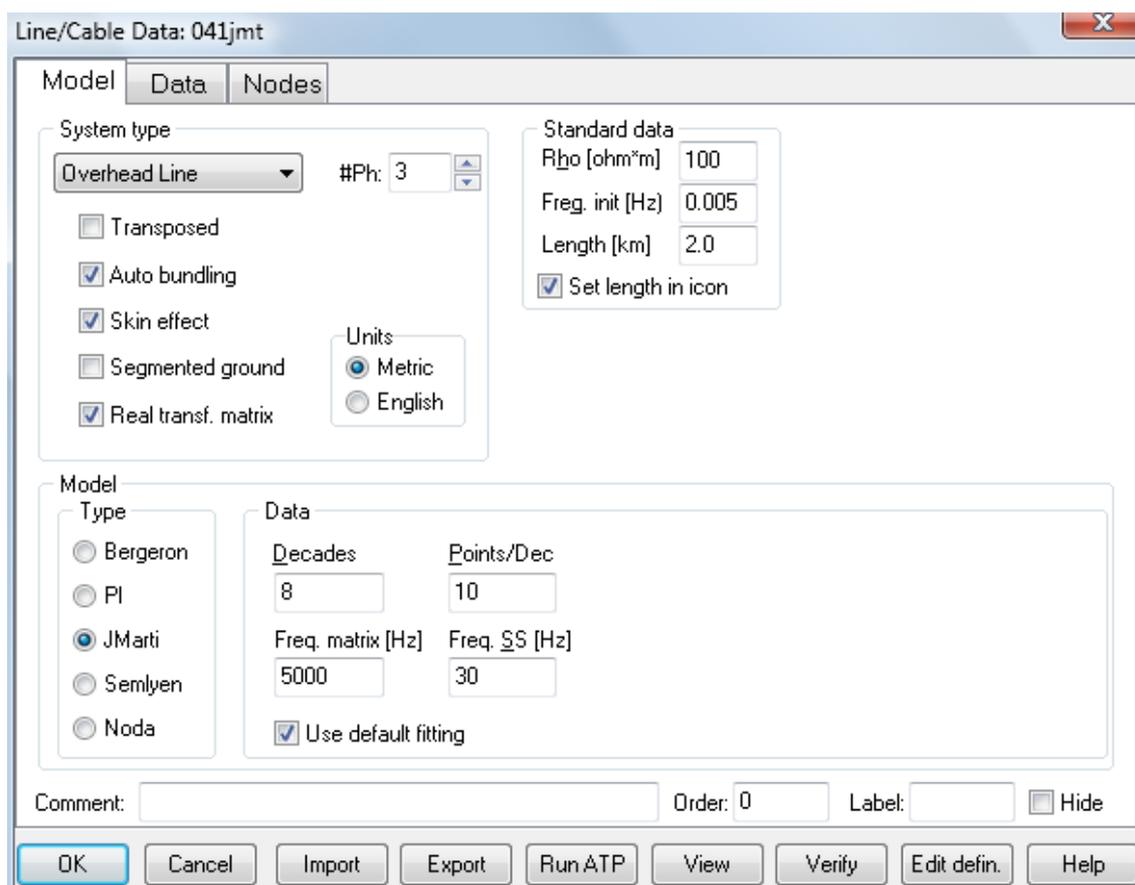


Figura 19. Janela *Model* com dados inseridos no LCC (ATPDraw).

Para a ficha de dados (Data) foram inseridos os valores tabelados e as distâncias equivalentes para cada uma das fases, de acordo com a Figura 16.

Line/Cable Data: 041jmt

Model	Data	Nodes								
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.486	1.260	0.1005	-8	21.7	17.58	0	0	0
2	2	0.486	1.260	0.1005	0	21.7	17.58	0	0	0
3	3	0.486	1.260	0.1005	8	21.7	17.58	0	0	0
4	0	0	0.6725	0.4723	-5.1	28	23.88	0	0	0
5	0	0	0.6725	0.4723	5.1	28	23.88	0	0	0

Buttons: Add row, Delete last row, Insert row copy, Move (up/down), OK, Cancel, Import, Export, Run ATP, View, Verify, Edit defin., Help

Figura 20. Janela Data com dados inseridos no LCC (ATPDraw).

Os valores de Vtower são preenchidos com a distância entre cada condutor e o solo, no caso da estrutura HP-P os três condutores por fase estão a uma mesma altura, estando mais elevados apenas os dois condutores do para-raios. O Vmid é obtido subtraindo do Vtower o valor de 4.12m correspondente à flecha para um vão médio de 200m [13].

Em relação ao modelo utilizado para representação da linha de transmissão, baseado em estudos anteriores relacionados à ocorrência de descargas atmosféricas, escolheu-se o modelo JMartí. Este modelo é o mais adequado, devido à representação de todos os parâmetros em função da frequência, tendo em vista que o fenômeno em estudo é uma descarga atmosférica, sendo assim mais apropriado o uso deste modelo que o modelo PI (mais comum para estudos em regime permanente).

A partir do programa ATP (rotina LCC) realizou-se a construção total da LT considerando um conjunto de 20 blocos LCC. Foram utilizados os modelos de cada estrutura e seus respectivos parâmetros para a construção do modelo e simulação do sistema como um todo. Para simplificar a modelagem, sem

perda de características, utilizou-se associações de sequências de mesmo modelo em todos os vãos de 2km (representando 10 torres iguais com o mesmo vão de 200m) configurando um trecho da linha completa. Isto resultou em simplificação da modelagem total da linha, sem ocasionar qualquer aproximação dos resultados a serem obtidos.

5. Simulações da LT em Estudo

Foram realizadas simulações no Sistema de Potência modelado, sendo analisadas as LT's sem e com cabo para-raios. Na LT sem cabo para-raios, a finalidade foi observar o comportamento da cadeia de isoladores diante de um surto atmosférico, como também, a utilização de para-raios de linha nestas LT's que não possuem blindagem por cabos para-raios. Na LT com cabo para-raios, a finalidade foi observar o comportamento do surto atmosférico atingindo diretamente o cabo para-raios e sua completa dissipação para a terra. Foi analisado também o comportamento destes métodos de proteção diante uma variação da resistência de pé de torre (aterramento) e a influência que esta variação pode causar nas tensões induzidas nas fases.

Todas as simulações consideram a aplicação de descargas com o valor de pico de 30kA e formato de 1,2/50 μ s no mesmo vão da LT, sendo aplicados nas fases ou nos cabos-guarda, quando a LT os possuir.

5.1. LT sem Cabos Para-raios de Forma Ideal

Conforme pode ser observado na Figura 21, foram utilizados 20 componentes LCC, cada um representando um trecho específico de 10 torres. Foram inseridos supressores de surto nas extremidades da linha, que representam as entradas das subestações, sendo injetado um surto em uma das fases (fase C) no vão 015 da LT.

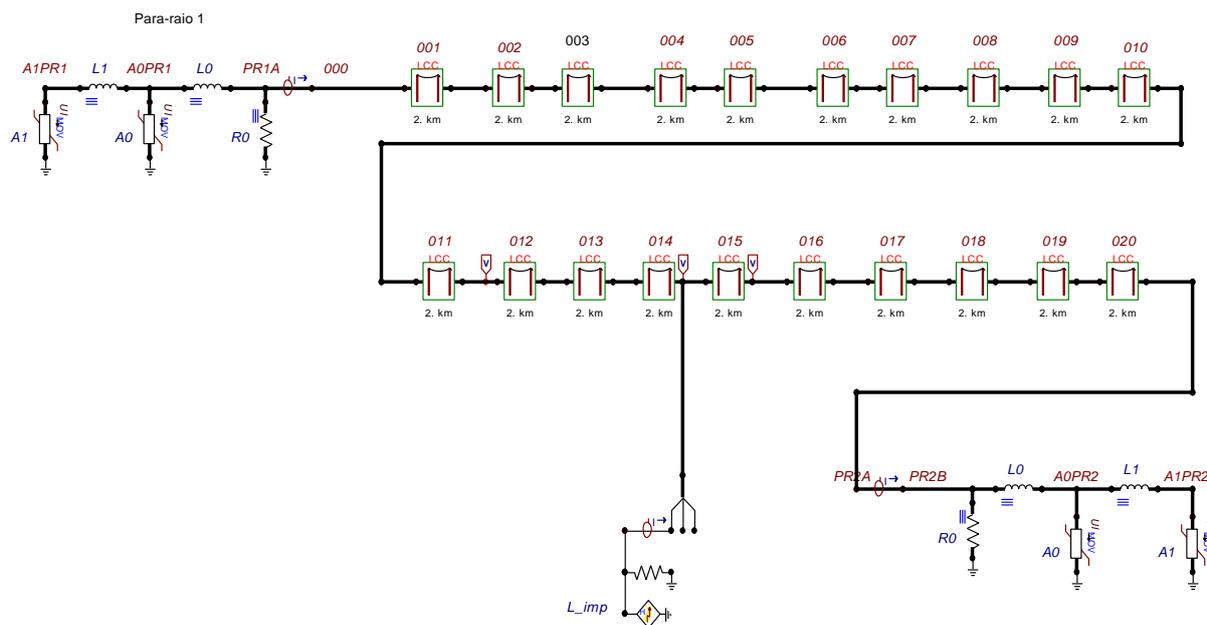


Figura 21. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV.

Pode ser observado na Figura 22 que quando o surto atingi diretamente uma das fases, provoca uma sobretensão de aproximadamente 4.5MV nesta, e ainda tensões induzidas da ordem de 900kV nas fases vizinhas.

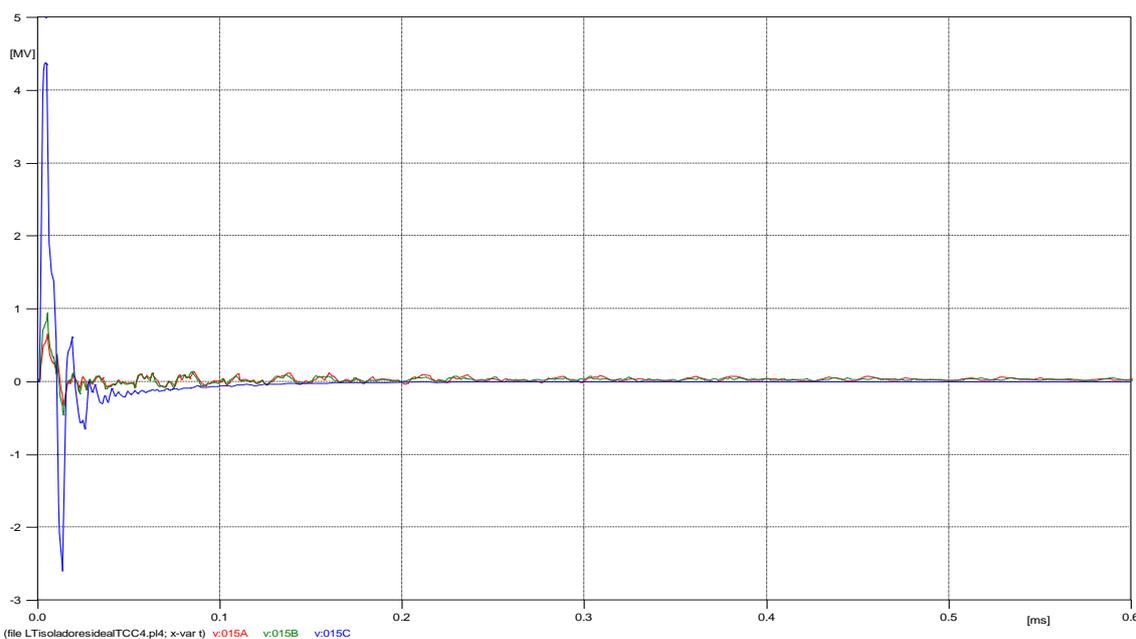


Figura 22. Nível de Tensões nas Três fases no ponto de incidência do surto Atmosférico.

A rotina LCC, a qual foi utilizada para modelagem da LT, considera a cadeia de isoladores ideal, sendo assim o surto se propaga pela LT nas duas direções, com isso os supressores de surto nas entradas das subestações atuam para as três fases, tendo em vista que todas elas apresentam tensões bem elevadas, como pode ser observado nas Figura 23 e Figura 24.

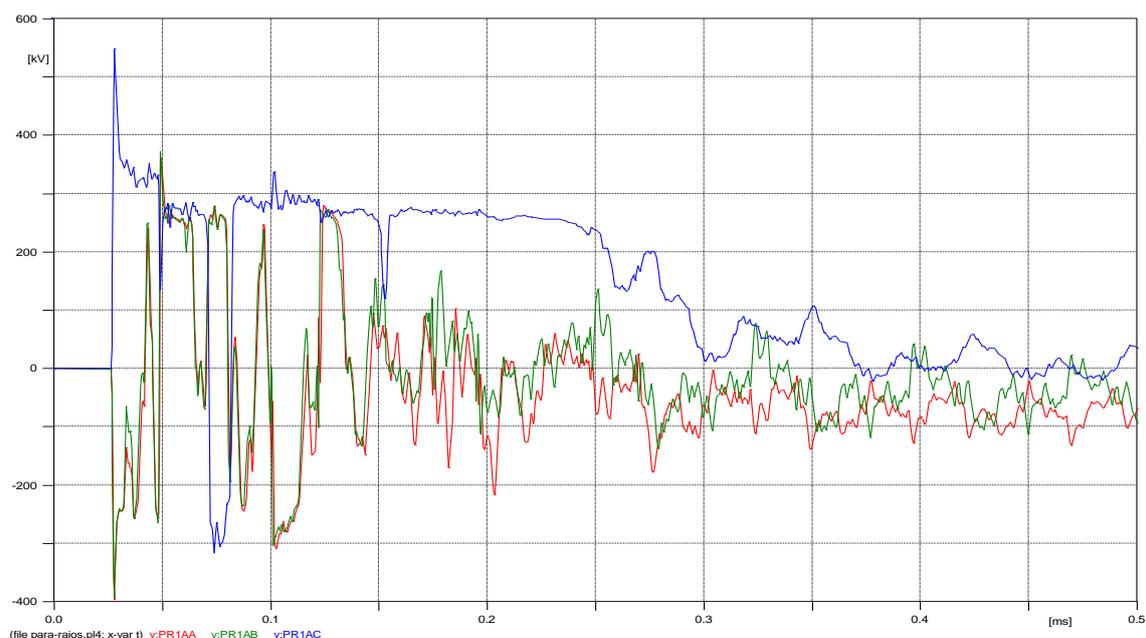


Figura 23. Nível de Tensões nas Três fases no supressor de surto da esquerda (início da LT).

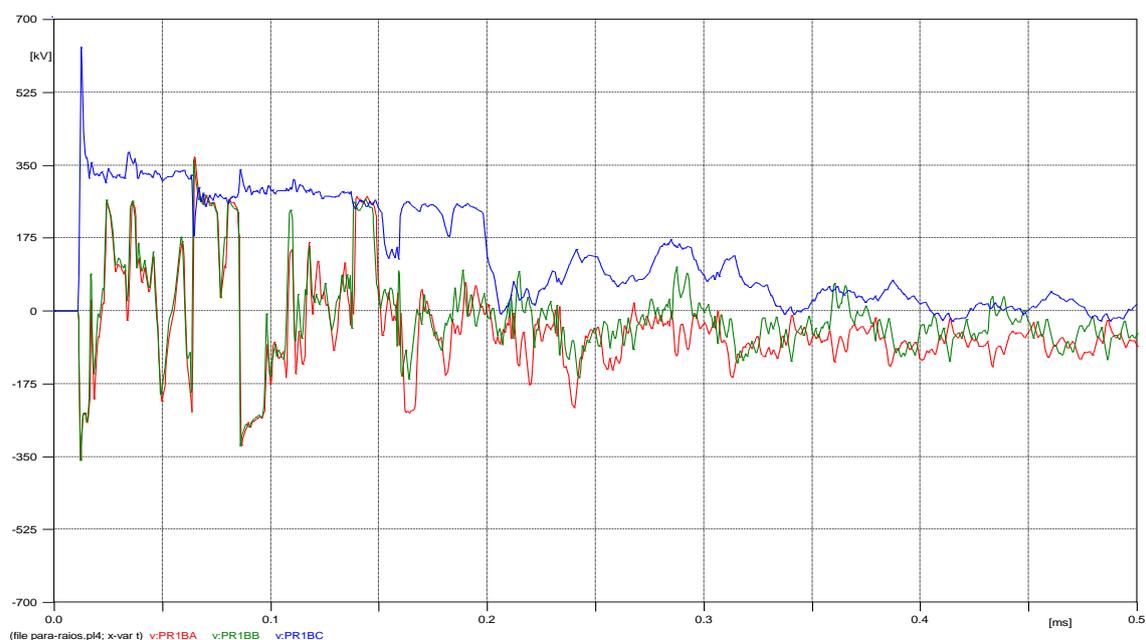


Figura 24. Nível de Tensões nas Três fases no supressor de surto da direita (fim da LT).

5.2. LT sem Cabos Para-raios com Cadeia de Isoladores

Com a finalidade de observar o comportamento da LT com a incidência direta do surto, foi inserida a modelagem da cadeia de isoladores em cada vão da LT, tendo em vista que a modelagem através somente da rotina LCC, não leva em conta o fechamento de um curto quando a tensão exceder o NBI (Nível Básico de Isolamento) da linha, ou seja, não considera o rompimento da cadeia de isoladores.

5.2.1. Cadeia de Isoladores com Aterramento Ideal

A princípio foi modelada a cadeia de Isoladores da Linha como descrito no item 4.1.3, de forma que na ocorrência de uma descarga direto em uma das fases, quando a diferença de potencial sob a cadeia de isoladores no ponto alcançar um valor igual ou maior que 950kV, o mecanismo de fechamento da chave é acionado, provocando o curto fase-terra.

O valor de suportabilidade da cadeia de isoladores da LT foi estipulado em 950kV [13]. Neste primeiro caso foi deixado o aterramento da LT ideal (zero), como pode ser observado na Figura 25, com a finalidade de observar o *flashover* na cadeia de isoladores, sem ocorrência de outros fenômenos associados.

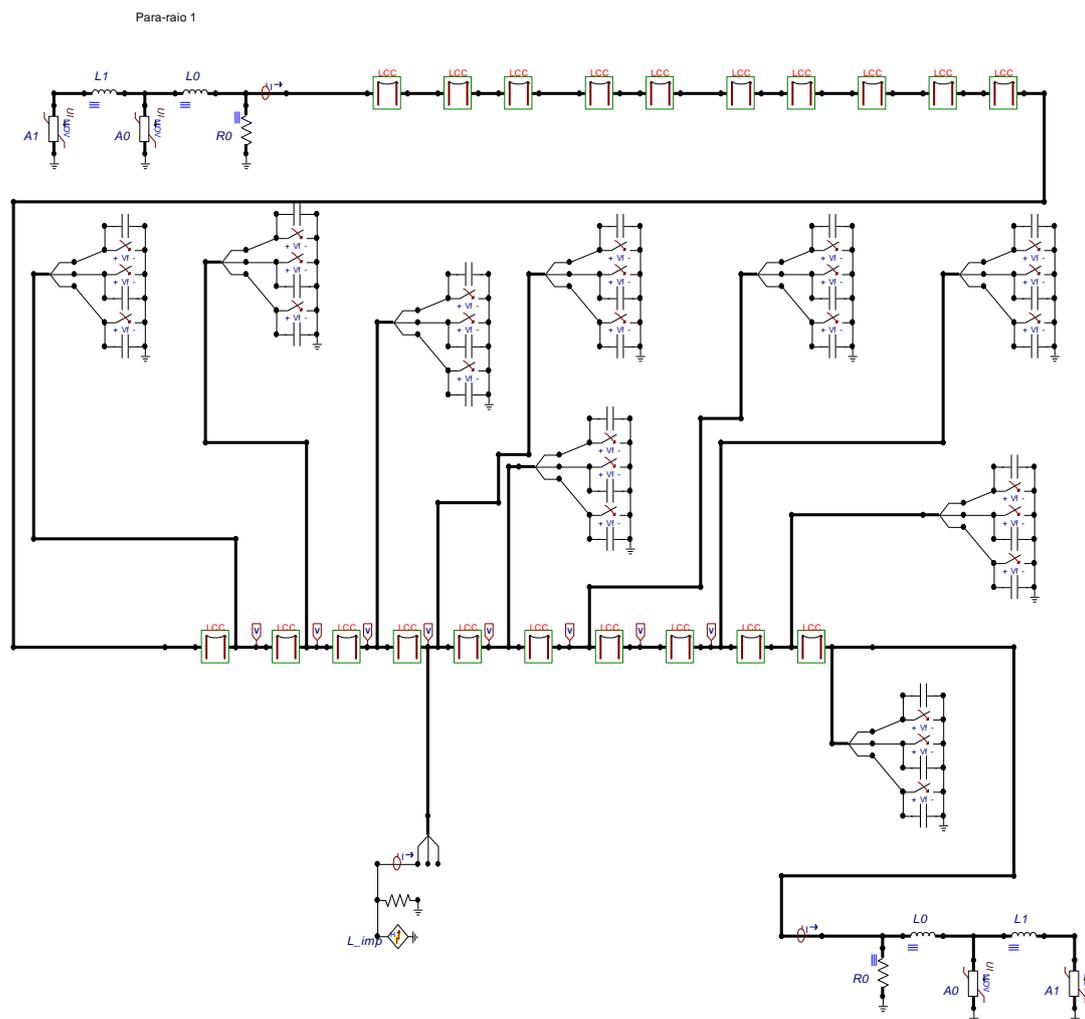


Figura 25. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV com cadeia de isoladores com aterramento ideal.

Pode se observar na Figura 26 que quando a sobretensão na fase atingida excede o valor suportado pela cadeia de isoladores, o mecanismo da chave controlada por tensão atua, ocasionando um curto circuito fase-terra nesta fase.

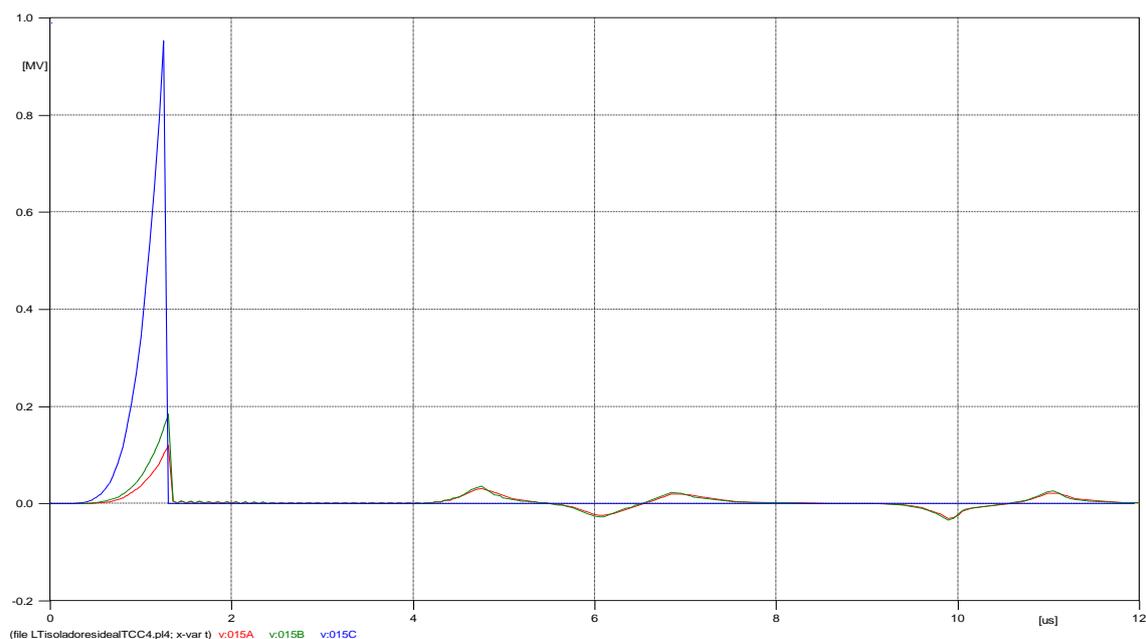


Figura 26. Curto circuito provocado sobre a cadeia de isoladores na fase C atingida pela descarga atmosférica.

Vale salientar que as outras fases não possuem tensões induzidas que superem o valor de 950kV, com isso não existe a ocorrência de curto circuito nas mesmas.

5.2.2 Cadeia de Isoladores com Aterramento Real

Sabemos que não é possível um aterramento nas estruturas igual a zero, o que seria o ideal. Foi assim incorporada uma resistência de pé de torre com valor de 20Ω [15] em cada estrutura como, pode ser observado na Figura 27. Este valor de aterramento é considerado aceitável para torres de transmissão.

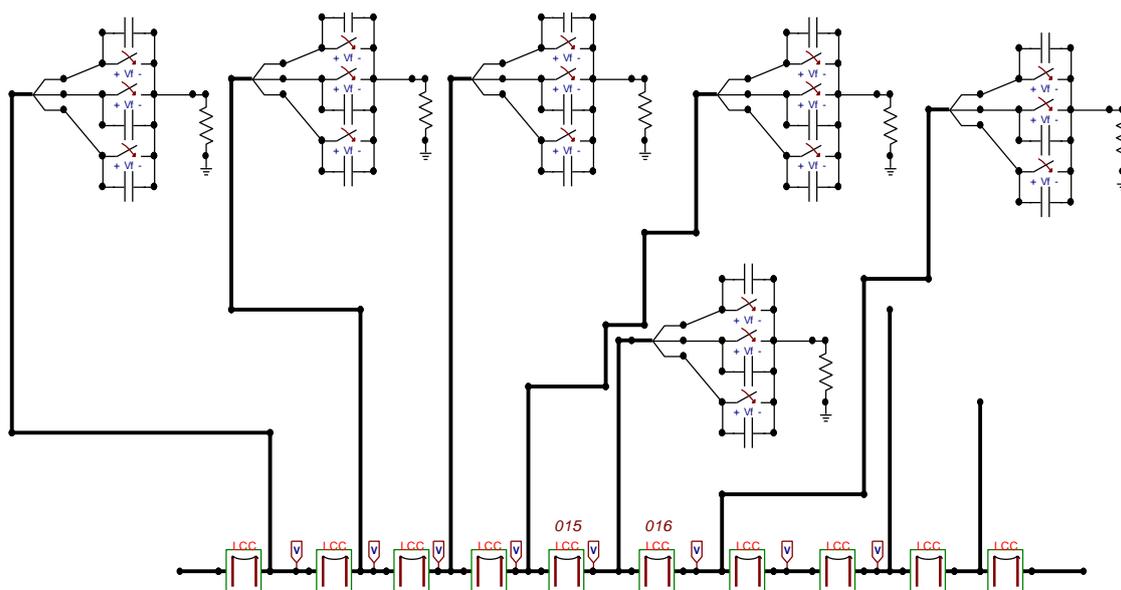


Figura 27. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV com cadeia de isoladores com aterramento de 20Ω.

Pode se observar na Figura 28, que além da ocorrência do *flashover* quando a suportabilidade da cadeia é rompida, existe também a ocorrência de um *back flasover*, fenômeno causado pelo retorno da onda de surto atmosférico, tendo em vista que o aterramento não ser mais ideal.

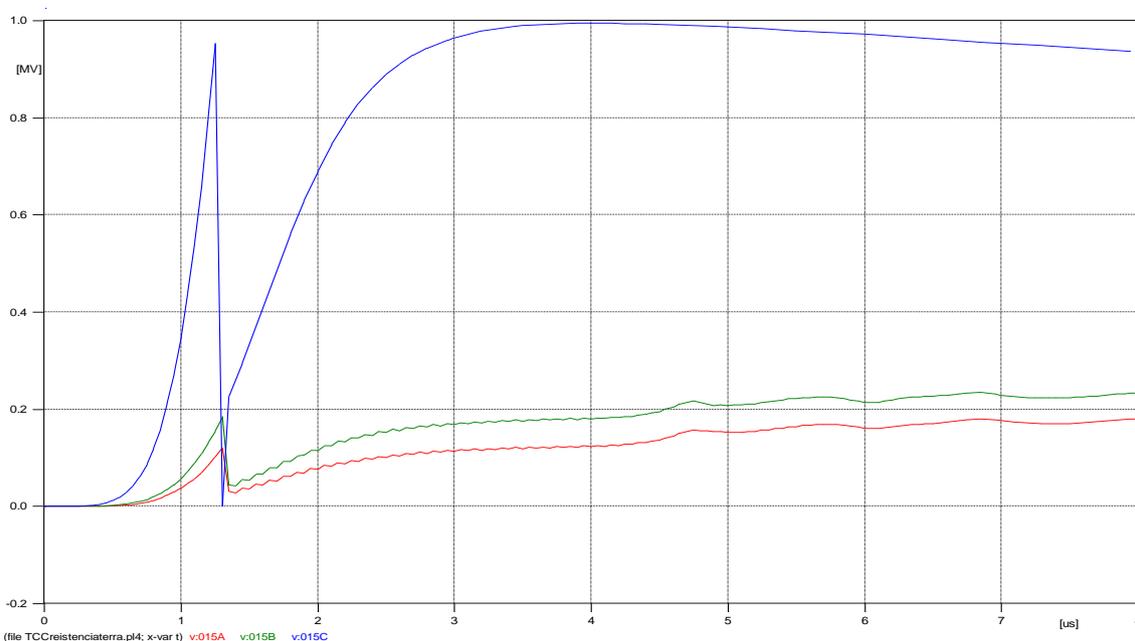


Figura 28. Curto circuito provocado sobre a cadeia de isoladores na fase C atingida pela descarga atmosférica e ocorrência de *back flashover*.

Vale salientar que a sobretensão nos vãos vizinhos em relação ao atingido pelo surto ainda é elevada, porém não sendo suficiente para romper a

suportabilidade da cadeia de isoladores destes vãos, como pode ser observado na Figura 29. Sendo assim, o vão diretamente atingido pelo surto atmosférico é o único prejudicado com a perda da cadeia de isoladores da fase atingida.

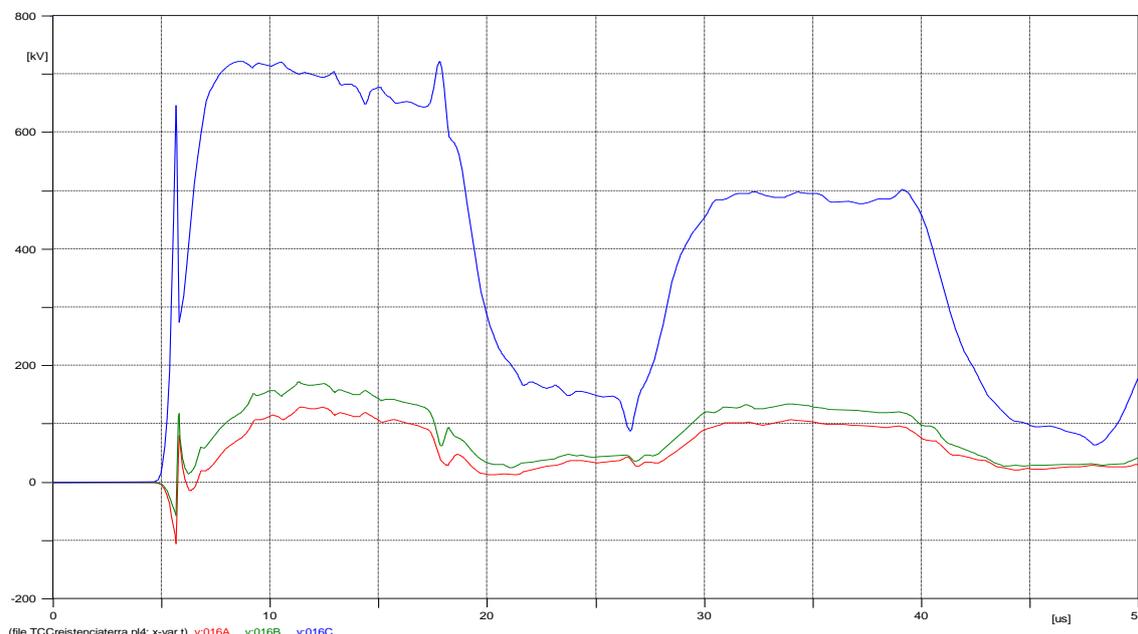


Figura 29. Nível de Tensões nas Três fases no ponto adjacente ao de incidência da descarga atmosférica.

Pode-se afirmar sobre que com a incidência do surto diretamente em uma fase, apenas correria o curto nesta fase, rompendo a cadeia de isoladores, de forma que as fases vizinhas não possuem tensão induzidas muito elevadas. Desta forma, a tensão atingida nos vãos adjacentes não excedem a suportabilidade dos isoladores, baseando-se no valor médio de descarga de 30kA [14]. Caso ocorra um valor de descarga superior a este, não se pode garantir o mesmo comportamento com as tensões induzidas e com os vãos adjacentes. Dados do INPE confirmam a existência de descargas que alcançaram valores de 200kA, entretanto, estes valores respondem por 0.1% do total [14].

5.3. LT sem Cabos Para-raios com Para-raios de Linha

Como se pode observar nos Itens 5.2.1 e 5.2.2, quando da ocorrência de um surto atmosférico direto em uma fase de uma LT, imprescindivelmente ocorrerá um curto circuito e, por conseguinte o desligamento da LT, causando a interrupção do fluxo contínuo de potência. Como solução a este problema de

incidência direta na LT, tem-se a opção da utilização de cabos para-raios, com a função de blindagem da LT. Porém em linhas já existentes que não possuem cabos para-raios, muitas vezes se torna inviável a implantação dos mesmos, pois torna-se caro a substituição de torres para o suporte dos cabos para-raios. Em vez disso podem utilizar para-raios de linha alocados em locais considerados mais elevados ou mais críticos, pois estes locais são mais propícios a serem atingidos por descargas atmosféricas [16].

Utilizando a mesma modelagem dos itens 5.2.1 e 5.2.2, foi inserido um para-raios em um ponto considerado estratégico para simulação (no ponto de incidência da descarga), como pode ser observado na Figura 30.

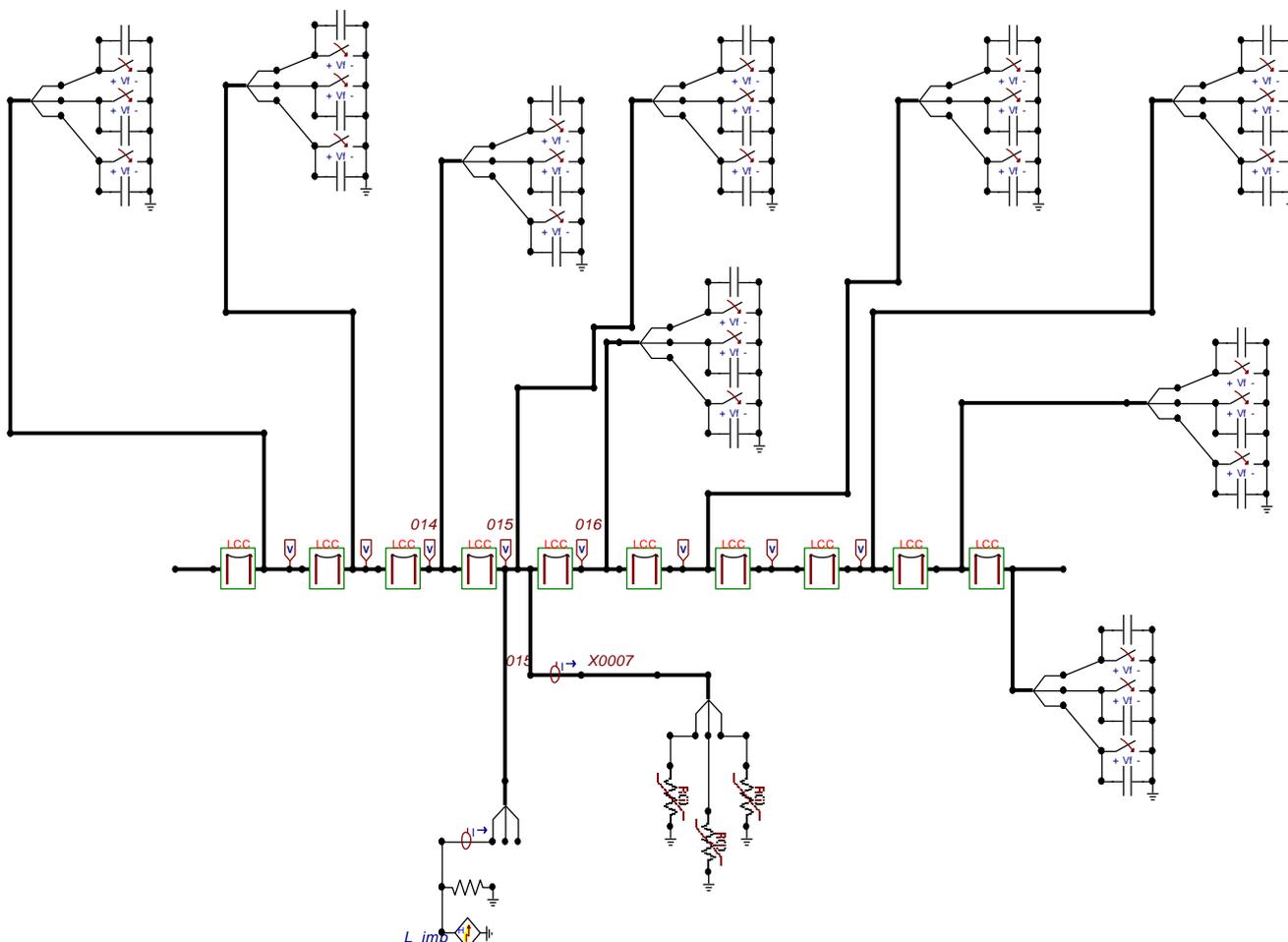


Figura 30. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV com cadeia de isoladores com aterramento de 20Ω e para-raios de linha inseridos no ponto de incidência do surto atmosférico.

Pode ser observado na Figura 31, que não mais ocorre o curto circuito na fase C no ponto de incidência do surto, de forma que o para-raios atuou para a sobretensão existente, protegendo a cadeia de isoladores da LT.

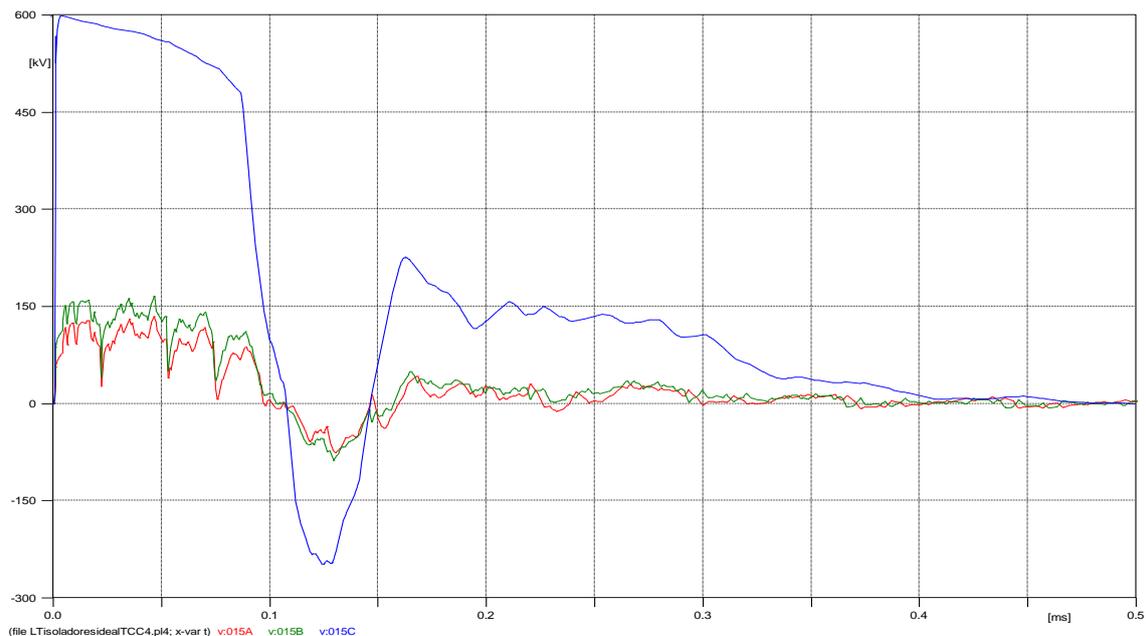


Figura 31. Níveis de Tensões nas três fases no ponto de incidência do surto atmosférica onde foi inserido para-raios de linha.

Nos vãos adjacentes, a tensão não excede o valor suportado pela cadeia de isoladores, não havendo problema quanto a um curto circuito fase-terra, como pode ser observado nas Figura 32 e Figura 33.

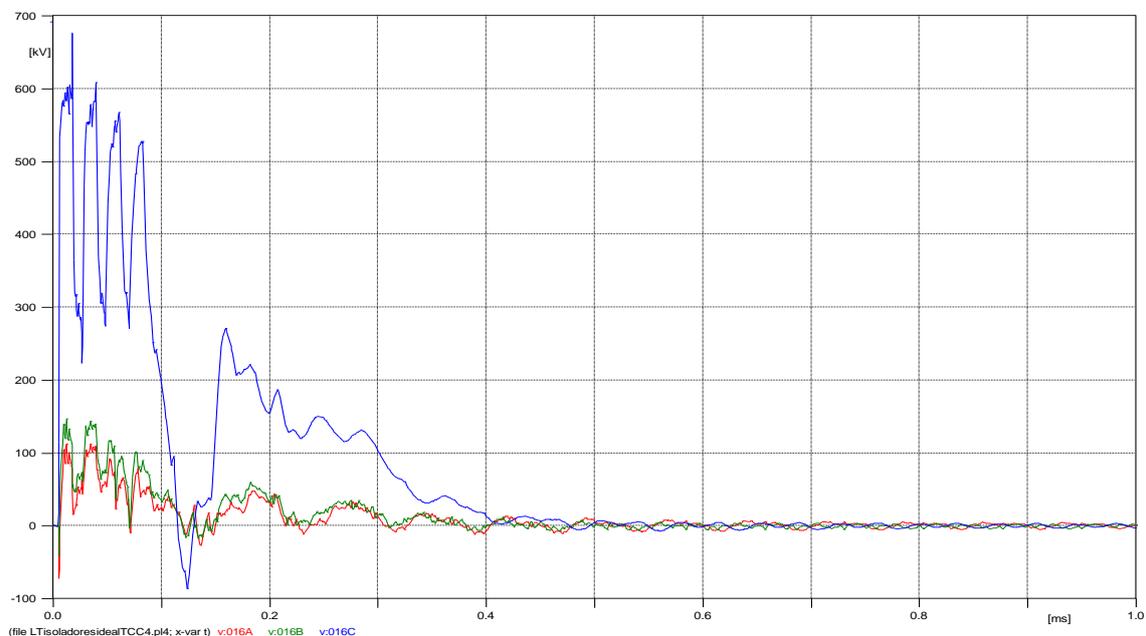


Figura 32. Níveis de Tensões nas Três fases no ponto adjacente à direita ao de incidência da descarga atmosférica onde foi inserido para-raios de linha.

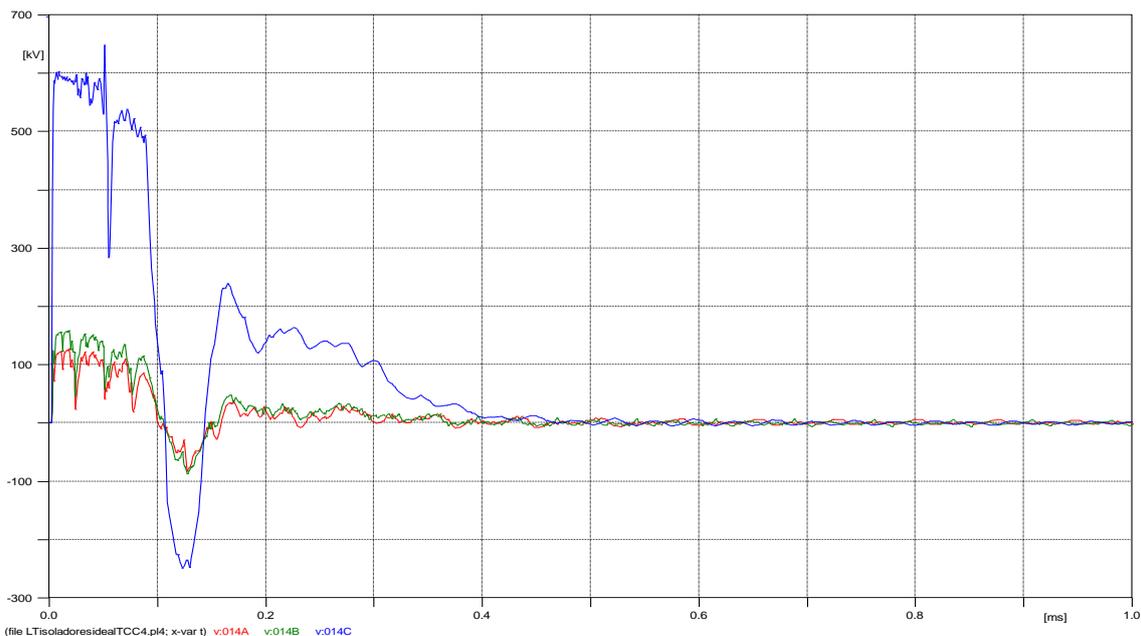


Figura 33. Níveis de Tensões nas Três fases no ponto adjacente à esquerda ao de incidência da descarga atmosférica onde foi inserido para-raios de linha.

Vale salientar que quando o surto atingir o vão que não possui para-raios de linha inseridos, mesmo que o vão adjacente os possua, ainda assim não servirá, pois ocorrerá uma sobretensão no local de incidência, provocando um rompimento da cadeia de isoladores, como pode ser observado na Figura 34, onde o surto foi injetado no vão 015, sendo que o para-raios de linha foi inserido no vão 016 adjacente ao atingido.

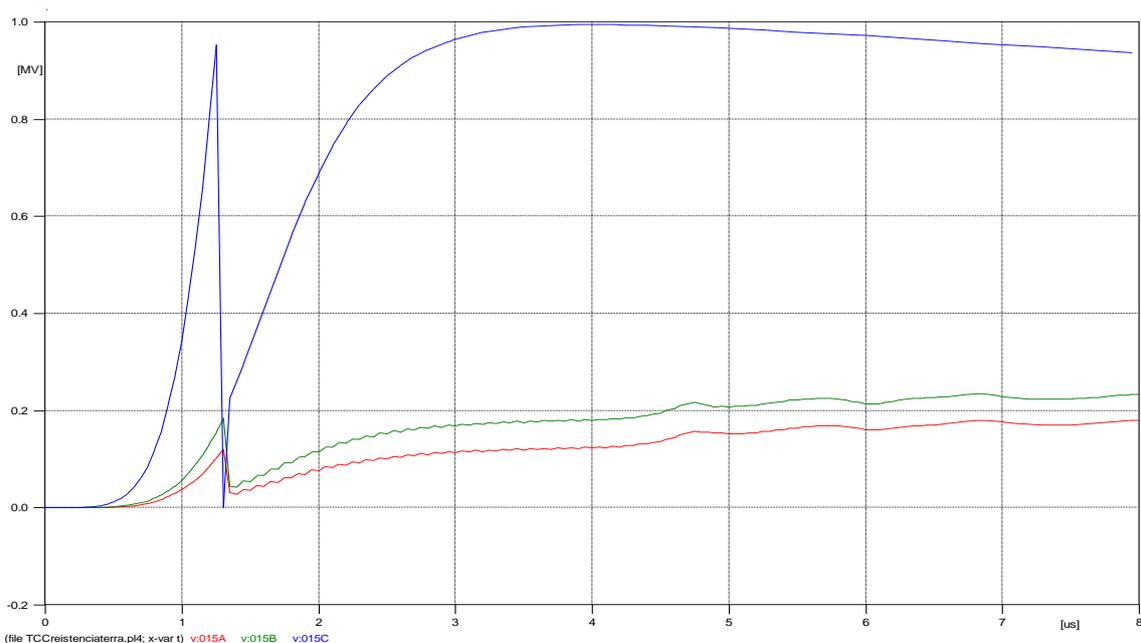


Figura 34. Níveis de Tensões nas Três fases no ponto de incidência da descarga atmosférica, quando inseridos para-raios de linha nos vãos adjacentes.

Com isso pode-se observar que o para-raios só irá proteger o vão atingido pelo surto, sendo assim necessária em um LT sem cabos para-raios a inserção de para-raios de linha em toda a LT para a total proteção da mesma, ou em pontos estratégicos considerados críticos da LT, onde seria necessário um estudo cerâmico da região em que a LT esta localizada, para poder alocar de forma mais precisa os para-raios e obter a máxima cobertura da LT.

Vale salientar que os para-raios devem ser alocados de forma consecutiva e não podem ser alocados de forma alternada, ou então toda sua implantação seria em vão, pois quando um surto atingisse um vão da LT, na torre que possuísse o para-raios de linha atuaria, mas na outra ocorreria o *flashover* nos isoladores, partindo do ponto que quando a descarga atingi o vão ela se divide por igual para os dois sentidos[5].

5.4. LT com Cabos Para-raios

O cabo para-raios tem sido a principal forma de proteção contra descargas atmosféricas utilizadas em linha, sendo sua função a blindagem da LT diante de um surto. A maioria das linhas de transmissão possuem cabos para-raios devido a sua importância na transmissão de grandes quantidades de potência, sendo assim de elevada importância para sua proteção, pois, o desligamento causado por um surto em uma linha de transmissão pode deixar cidades ou até estados sem energia. As linhas de subtransmissão mais antigas não possuem cabos para-raios, sendo assim necessária a utilização de outros métodos de proteção, dentre eles, a implantação de para-raios de linha ou até a substituição de estruturas da LT para implantação dos cabos para-raios.

Estas linhas transportam uma quantidade razoável de potência, de forma que as novas linhas de subtransmissão que estão sendo implantadas já possuem cabos para-raios, evitando assim desligamentos e interrupção no fornecimento de potência.

Conforme pode ser observado na Figura 35, foram utilizados 20 componentes LCC com cabos para-raios, cada um representando um trecho específico de 10 torres. Foram inseridos nas extremidades da linha supressores de surto, que representam as entradas das subestações e as cadeias de isoladores interligadas ao mesmo ponto de aterramento do cabo para-raios em cada torre, com a finalidade de observar o comportamento do

surto quando o mesmo atingir o cabo para-raios. O surto foi injetado no cabo para-raios no vão 015 da LT.

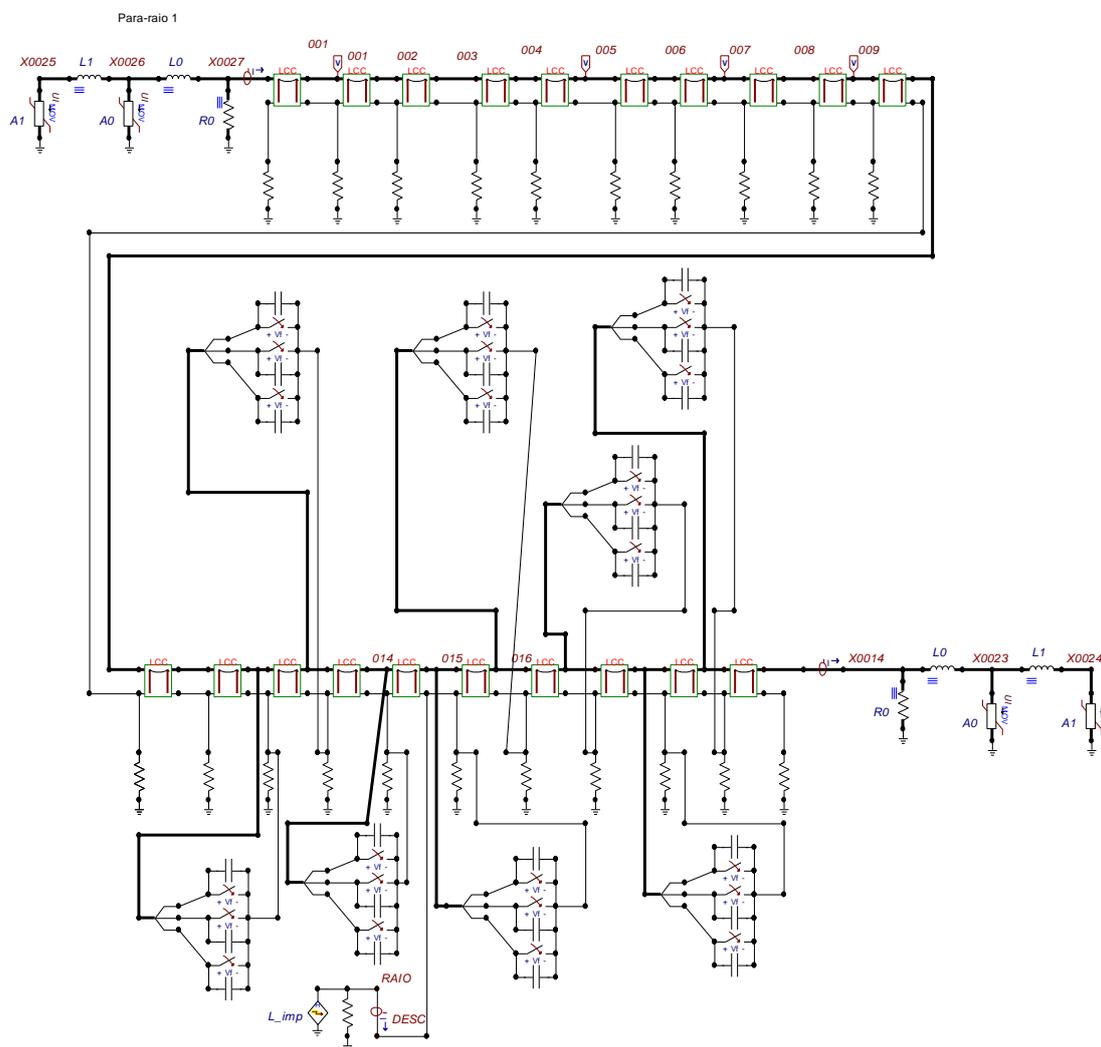


Figura 35. Circuito para simulação de uma linha de transmissão completa de 230kV com cabos para-raios e cadeia de isoladores interligados ao aterramento de 20Ω.

Pode se observar na Figura 36 e Figura 37 que com o valor do aterramento de 20Ω a tensão no cabo para-raios alcança 650kV, sendo este surto dissipado rapidamente nos vãos adjacentes, de forma que no primeiro vão após aquele atingido pelo surto a tensão alcança valores em torno de 300kV e nos dois vãos posteriores os valores já são bem reduzidos do alcançado inicialmente.

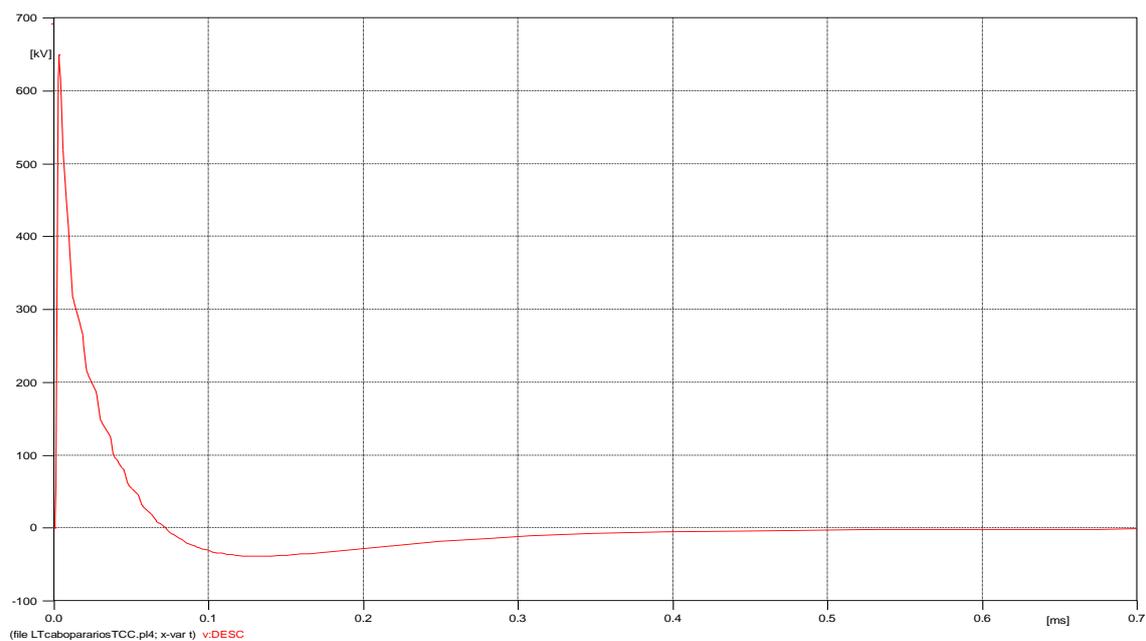


Figura 36. Nível de Tensão no cabo para-raios no ponto de incidência da descarga atmosférica.

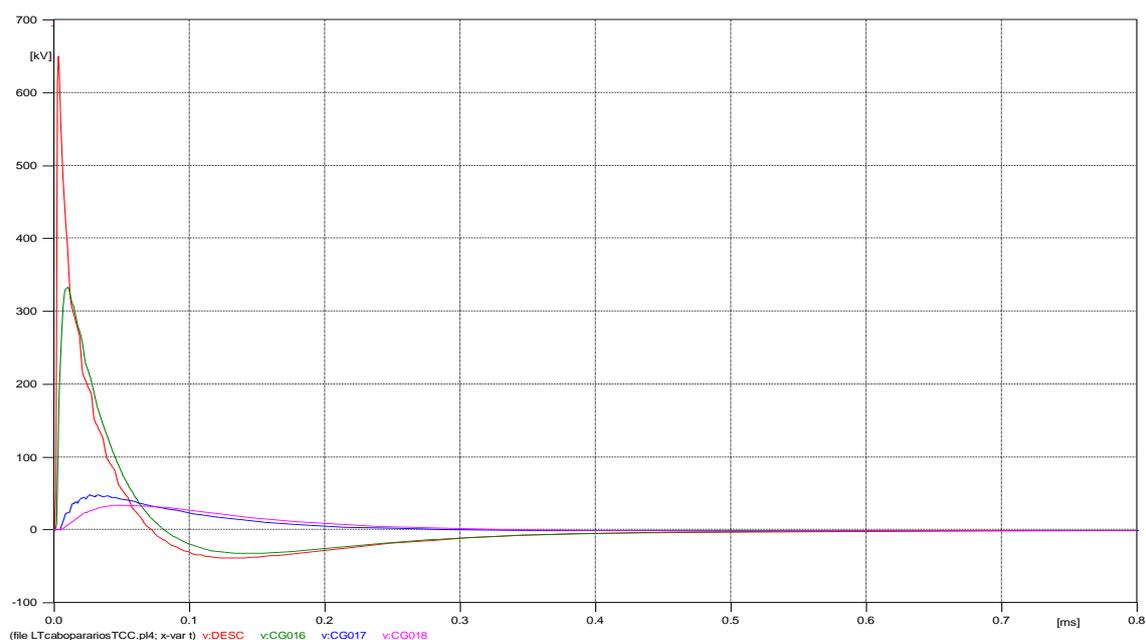


Figura 37. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua dissipação nos vãos adjacentes a direita ao de incidência da descarga atmosférica.

Pode ser observado na Figura 38 que da mesma forma que ocorre a dissipação nas torres adjacentes à direita do ponto de incidência do surto, também ocorre de forma completa, a dissipação à esquerda.

Vale salientar que para este valor médio de descarga utilizado de 30kA, a completa dissipação do surto atmosférico se dá em 5 a 6 vãos, de forma que 10 vãos após o ponto de incidência do surto a tensão no cabo para-raios é zero, como pode ser observado na Figura 39.

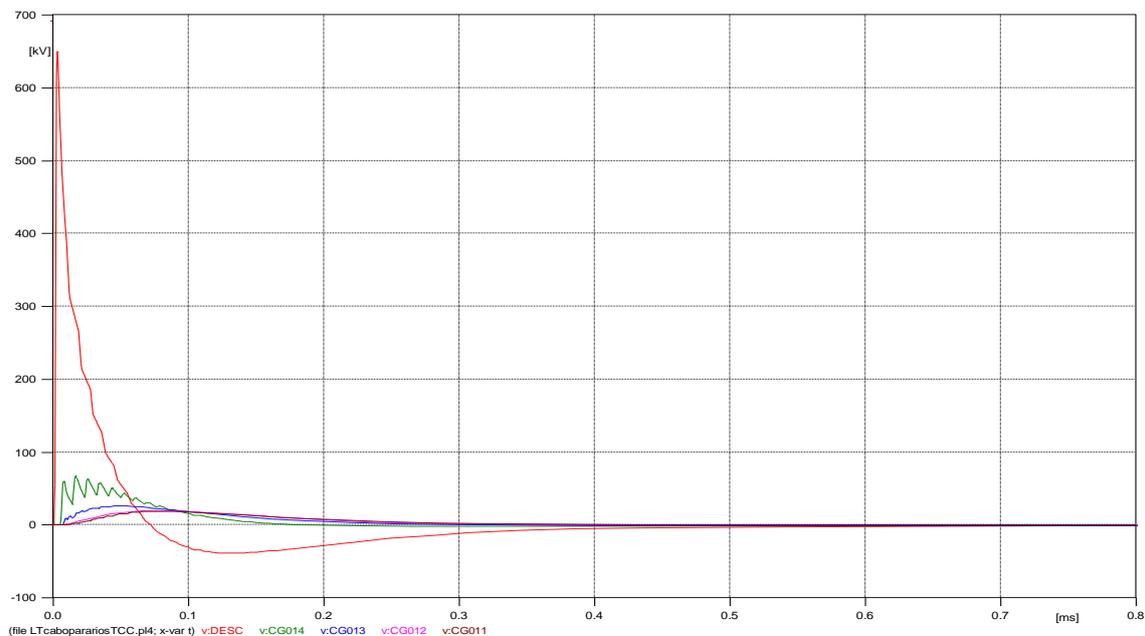


Figura 38. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua dissipação nos vãos adjacentes à esquerda ao de incidência da descarga atmosférica.

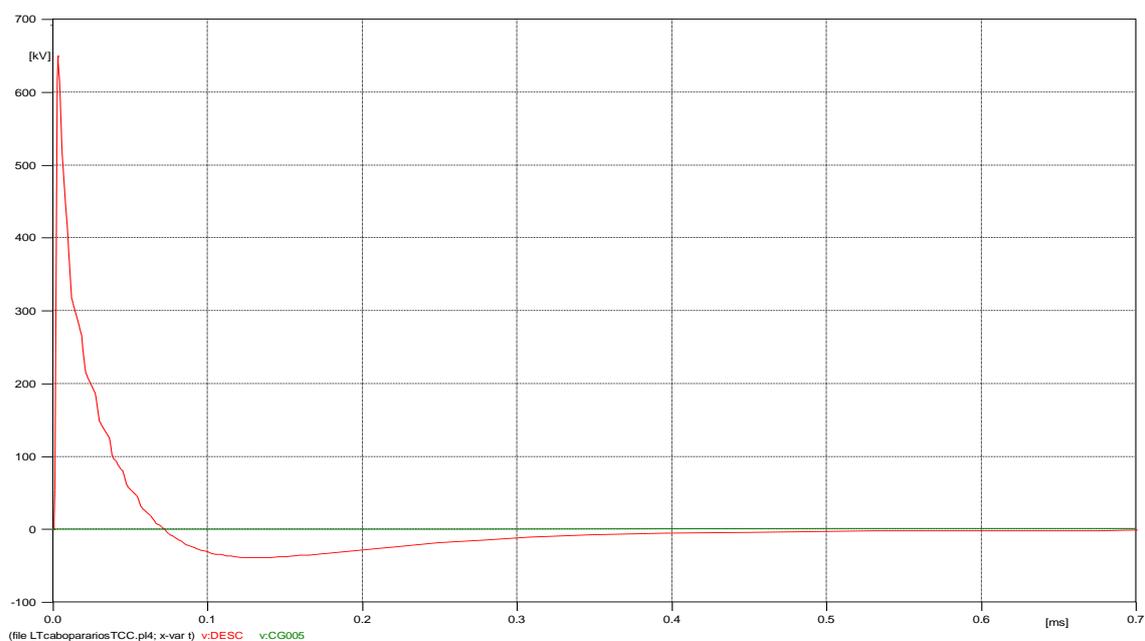


Figura 39. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua completa dissipação 10 vãos após a incidência da descarga atmosférica.

Pode se observar na Figura 40 as tensões induzidas nas três fases, no momento em que o surto atingi o cabo para-raios. Estas tensões não ultrapassam a ordem de 175kV, não sendo assim suficiente para causar rompimento da cadeia de isoladores em nenhuma das fases.

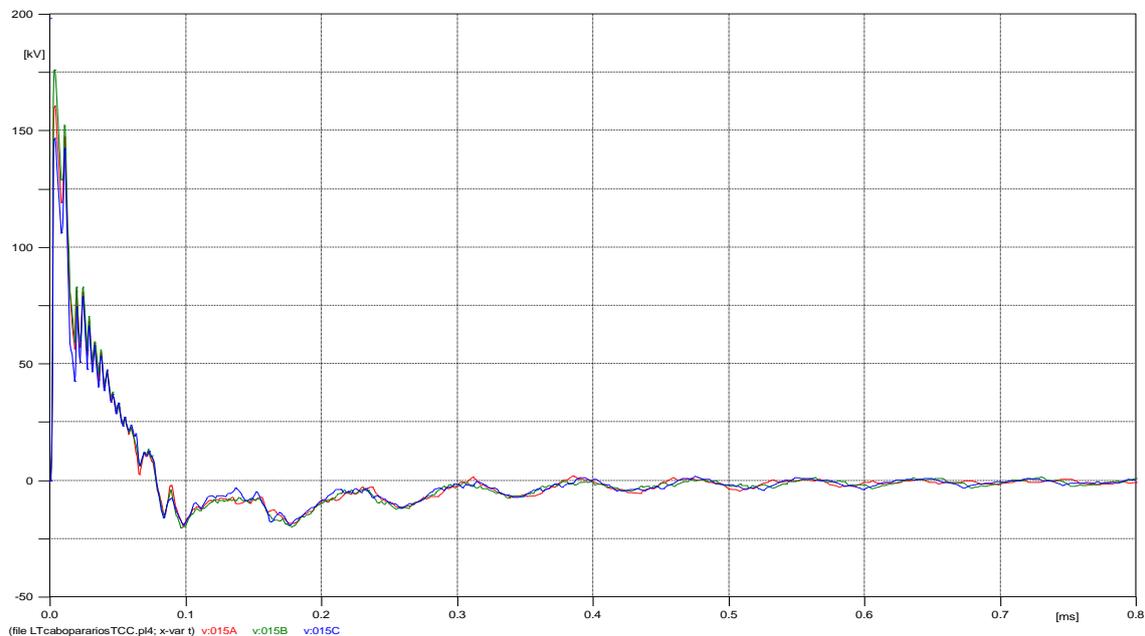


Figura 40. Níveis de Tensões induzidas nas Três fases no ponto de incidência da descarga atmosférica no cabo para-raios.

5.4.1 Influência do Aterramento na Dissipação do Surto Atmosférico

Pode-se observar que com a utilização de um valor aceitável de 20Ω de aterramento, a tensão no cabo para-raios não alcança valores extremamente elevados para uma descarga de valor médio de 30kA , como também, a tensão induzida nas fases não excede os valores limites do NBI da linha. Sabe-se que a maioria das descargas atmosféricas está dentro deste valor médio. Menos de um por cento atingi valores muito acima deste. Um problema que dificulta o correto funcionamento do sistema de proteção são os valores elevados de aterramento. Quando se tem valores de resistência de pé de torre acima dos valores padrões, o sistema de proteção não atua com eficiência, podendo ocorrer *flashover* nos isoladores das fases da LT, mesmo com a existência do sistema de proteção.

5.4.1.1 Elevado Valor de Resistência de Pé de Torre.

Foram realizadas simulações no mesmo sistema da LT com cabo para-raios, utilizando uma resistência de pé de torre de 100Ω . Pode se observar na Figura 41 que o valor de tensão atingido no cabo para-raios é bem superior aos 650kV quando o aterramento possuía 30Ω .

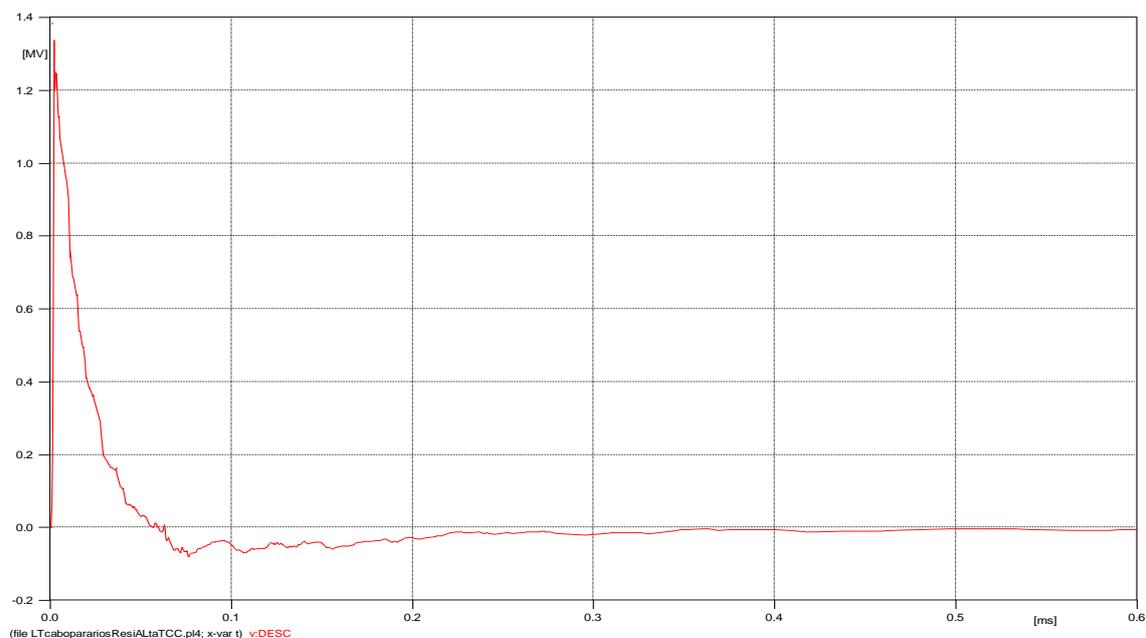


Figura 41. Nível de Tensão no cabo para-raios no ponto de incidência da descarga atmosférica (com aterramento de 100Ω).

Quando esta resistência está neste valor, existe uma maior dificuldade na dissipação do surto, fazendo com que o surto se propague por mais vãos na LT até a sua completa dissipação, como pode ser observado nas Figura 42 e Figura 43.

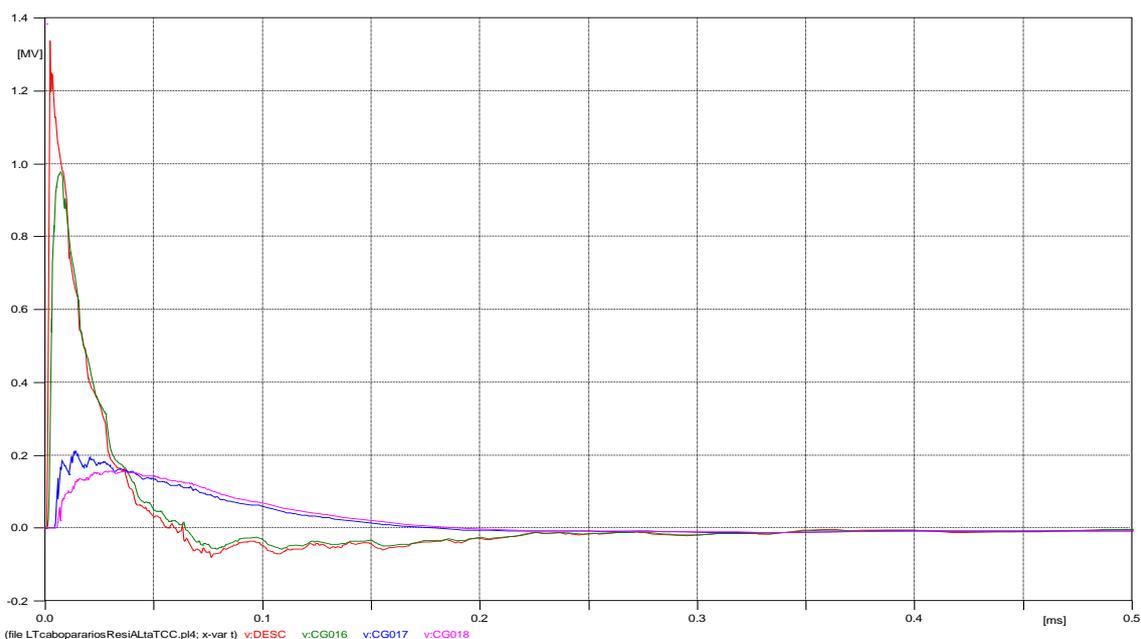


Figura 42. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua dissipação nos vãos adjacentes à direita ao de incidência da descarga atmosférica (com aterramento de 100Ω).

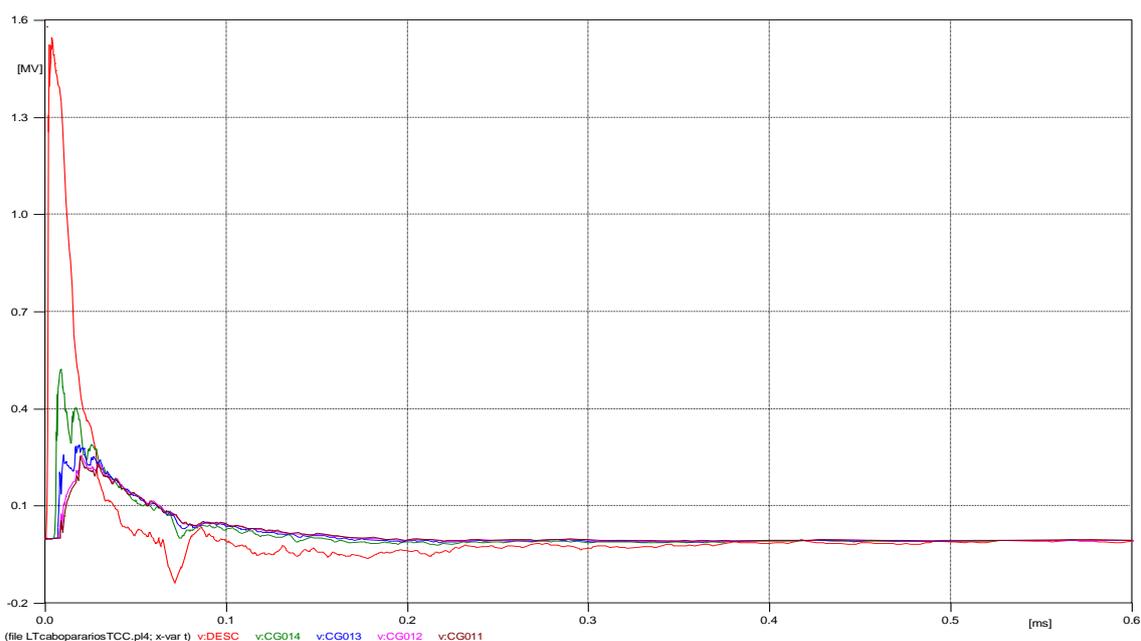


Figura 43. Nível de Tensão no cabo para-raios e sua dissipação nos vãos adjacentes à esquerda ao de incidência da descarga atmosférica (com aterramento de 100Ω).

Como pode ser observado na Figura 44, o valor elevado da resistência de pé de torre faz com que ocorra uma sobretensão elevada sobre a cadeia de isoladores, da ordem de 1.2MV, provocando desta forma o rompimento desta cadeia, a qual suporta apenas 950KV.

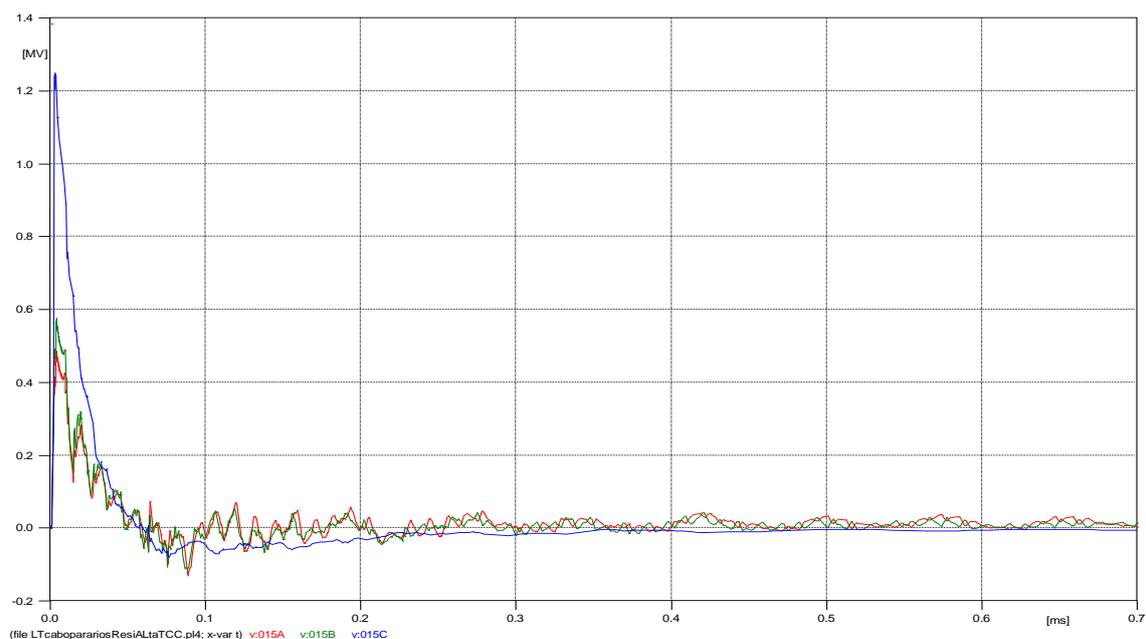


Figura 44. Níveis de Tensões induzidas nas Três fases no ponto de incidência da descarga atmosférica no cabo para-raios (com aterramento de 100Ω).

5.4.1.2 Valor Considerado Ideal Para Resistência de Pé de Torre

Considera-se um valor ideal de aterramento, uma resistência de pé de torre com valor menor ou igual a 10Ω . Quando utilizado um valor de 8Ω para o aterramento, pode se observar nas Figura 45 e Figura 46 que o nível de tensão alcançado no cabo para-raios não é elevado, da mesma forma a tensão que é induzida nas fases é pequena, comparado a outros valores mais elevados de aterramento.

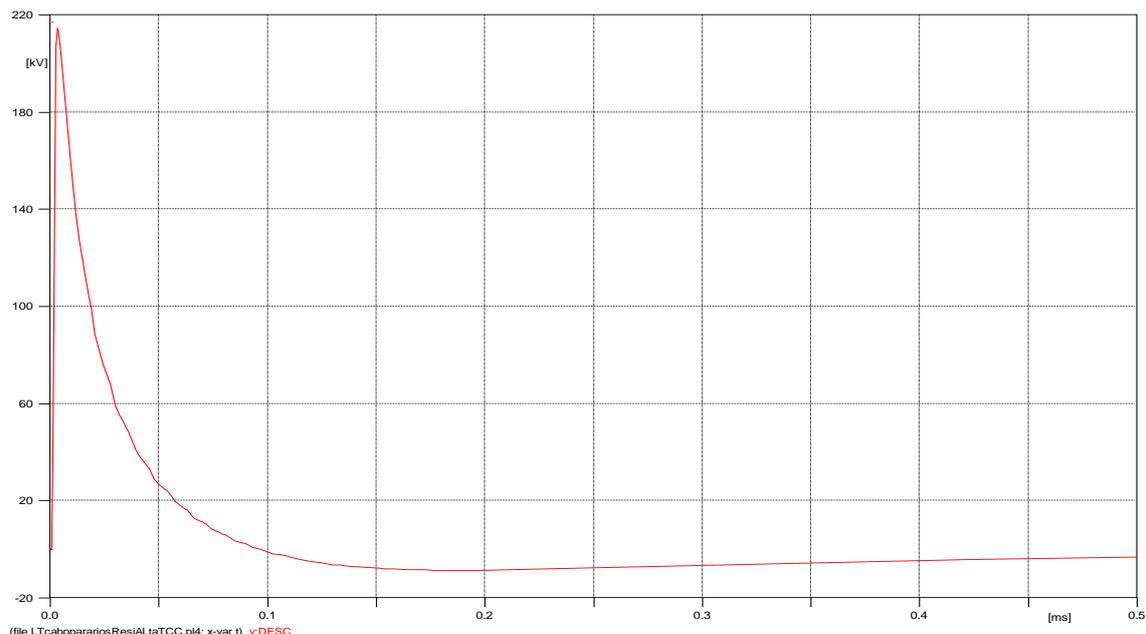


Figura 45. Nível de Tensão no cabo para-raios no ponto de incidência da descarga atmosférica (com aterramento de 8Ω).

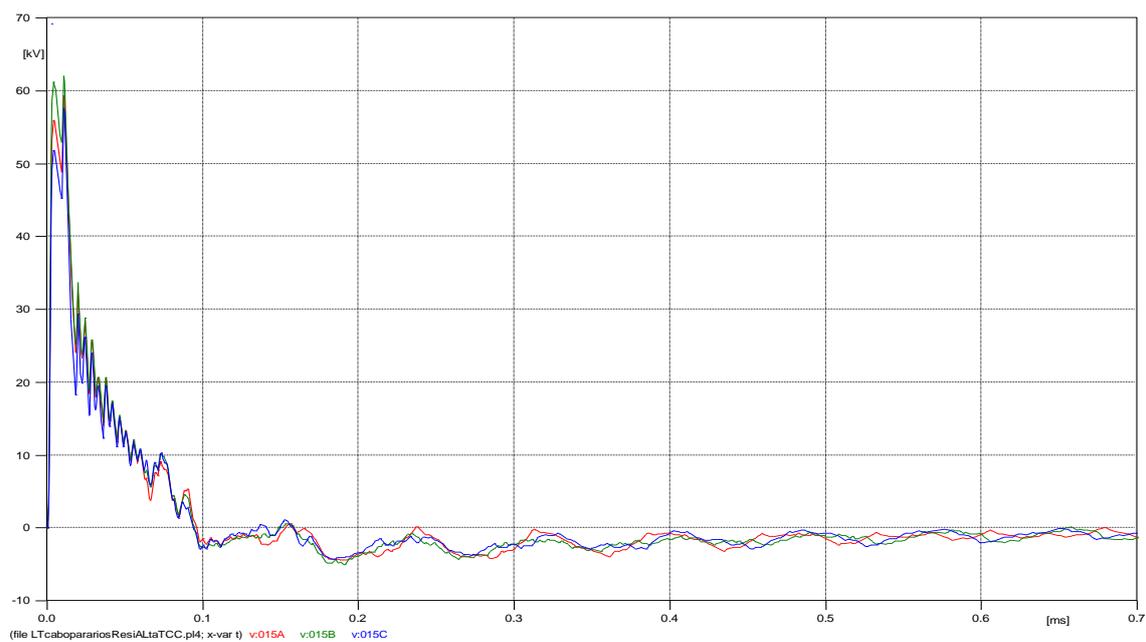


Figura 46. Níveis de Tensões induzidas nas Três fases no ponto de incidência da descarga atmosférica no cabo para-raios (com aterramento de 8Ω).

6. Conclusões

A partir do que foi apresentado, torna-se evidente a aplicação dos conhecimentos acadêmicos nas Linhas de transmissão e subtransmissão de energia, precisamente na área de compatibilidade eletromagnética, a fim de realizar projetos de desenvolvimento e validação de sistemas de aterramento e proteção de linhas de transmissão e subtransmissão frente a descargas atmosféricas de forma que os equipamentos não sejam afetados pelos efeitos das descargas, sejam estas devidas a descargas diretas, ou indiretas a fim de proteger os equipamentos em questão.

Foram realizadas simulações para analisar a suportabilidade da cadeia de isoladores com e sem a presença de para-raios de linha. Nas análises apresentadas pode-se concluir a importância da utilização dos para-raios de linha na proteção de linhas de transmissão/subtransmissão que não possuem cabos para-raios, de forma que sua presença no local atingido pelo surto pode evitar desligamentos nas linhas e interrupção do fluxo de potência.

Ficou evidenciado, através dos resultados obtidos, a importância do cabo guarda na atenuação dos níveis de tensão nas fases quando da ocorrência de descarga atmosférica na linha de transmissão/subtransmissão. Além disso, constata-se que o aterramento de cada estrutura tem a função de reduzir a propagação do surto atmosférico ao longo da linha, sendo assim de fundamental importância para os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Quanto menor a resistência de aterramento, menor serão as tensões induzidas nas fases e, por conseguinte menor o risco de ocorrer um *flashover* nos isoladores das mesmas, considerando um surto atmosférico atingindo o cabo guarda.

Os supressores de surto incluídos nas extremidades da linha possibilitaram uma maior proteção dos níveis de tensão nas extremidades da mesma, mostrando assim, a importância destes equipamentos na drenagem para o sistema de aterramento da ocorrência de um surto atmosférico neste ponto e com isso, minimizando os níveis de tensão que serão vistos pelos equipamentos instalados após estes pontos, protegendo as subestações de sobretensões originadas na linha.

7. Referências bibliográficas

- [1] Filho, J. M., Instalações elétricas industriais, 7ª edição, Brasil, Editora LTV, 2007.
- [2] D'Ajuz, A., et al, Transitórios elétricos e coordenação de isolamento – aplicação em sistemas de potência e alta tensão, Niterói, Editora Universitária - EDUFF, 1987.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas, disponível em: www.abnt.org.br, ultimo acesso em 16/12/2011.
- [4] International Electrotechnical Commission, disponível em: www.iec.ch, ultimo acesso em 20/12/2013.
- [5] Júnior, L. C. Z, *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, Editora Universitária-Edusp, 2003
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5419- condições de projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)*.
- [7] Silva, A. P., Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento de Sistema de Informações e Análise de Casos, Minas Gerais, Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, dezembro de 2007.
- [8] Loboda, M., Marciniak, R., Essential Requirements for Earthing System Determining the Efficiency of Lightning Protection, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, China, 2010.
- [9] Zipse, D. W., Lightning Protection Systems: Advantages and Disadvantages, IEEE Transactions on Industry Applications, setembro/outubro 1994, páginas 1351 – 1361.
- [10] Sato, T., Asakawa, A., Yokoyama, et al, Effective Layout of Surge Arresters on Distribution Line, X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, 2009.
- [11] Yokoyama, S., Lightning Detection and Lightning Protection of Power Systems in Japan, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, IEEE, páginas 546 – 551.
- [12] Dias, T. C., Lopes, I. J. S., Lima, A. B., Paulino, J. O. S., Cardoso, E. N., Melhoria do desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas

Atmosféricas – Uma Proposta de Critério para Aterramento de Linhas de 230kV, INDUSCON, São Paulo, 2010.

[13] Estudo de Impacto Ambiental - Relatório da JGP consultoria - para verificação de conformidade com as exigências do IBAMA. <http://licenciamento.ibama.gov.br/Linha%20de%20Transmissao/LT%20500%20kV%20Luiz%20Gonzaga%20-%20Garanhuns%3B%20LT%20500%20kV%20Garanhuns%20-%20Pau-Ferro%3B%20LT%20Garanhuns%20-%20Campinha%20Grande%20III/Volume%20I/EIA%20Garanhuns%20-%20Volume%20I%20-%20Revis%C3%A3o%2001.pdf>

[14] Acesso eletrônico INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais <http://www.inpe.br/webelat/rindat/menu/desc.atm/>, ultimo acesso 30/01/2014.

[15] Anjos, L. G. F. C, Santos, N. L Método Utilizado para Melhoria da Resistência de Aterramento das Linhas de Transmissão de Energia Elétrica, Minas Gerais, Projeto de Pesquisa, Centro Universitário de Belo Horizonte, Instituto de Engenharia e Tecnologia, dezembro de 2013.

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

[17] J. R. Marti, “Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations”, IEEE Trans. on Power App. and Systems. Vol. PAS-101 No. 1, pp. 147-155, Jan, 1982.