

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA SANGUANINI

**EFEITOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COM TOPOLOGIA COMPLEXA**

PATO BRANCO

2022

JULIANA SANGUANINI

**EFEITOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COM TOPOLOGIA COMPLEXA**

**Effects of indirect atmospheric discharges in distribution networks with
complex topology**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Ósis Eduardo Silva Leal.

PATO BRANCO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JULIANA SANGUANINI

**EFEITOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COM TOPOLOGIA COMPLEXA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/Novembro/2022

Ósis Eduardo Silva Leal
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

André Macario Barros
Mestre em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Géremi Gilson Dranka
Doutor em Engenharia Industrial e de Sistemas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Juceli de Fátima Machado e José Nilton Sanguanini pelo apoio constante em todas as etapas da minha vida.

Ao meu namorado Murilo Alves por me acompanhar em todos os momentos, inclusive nos mais difíceis, desde o início. Agradeço aos amigos Lucas Volkmer, Angela Luzzatto, Julia Milani, Caroline Bach, Elisa Etges, Carlos Lavandoski, Eduardo Spezia, Lucas Kffuri e demais colegas de curso que fizeram parte da minha jornada na graduação e sem os quais eu certamente não teria chegado aqui.

À Alexandra Elbakyan e Aaron Swartz pelo esforço contínuo em prol da liberdade de acesso ao conhecimento.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador Prof. Dr. Ósis Eduardo Silva Leal pela paciência, pela competência e pelo conhecimento que me passou na construção desse trabalho.

RESUMO

Na realização de estudos de tensão induzida por descargas atmosféricas, frequentemente não são incluídas as perdas causadas pela resistividade do solo nos sinais que viajam nos condutores da linha de distribuição. Isso porque, em linhas cujo comprimento seja inferior a 1 km, o efeito das perdas no solo pode ser negligenciado. Entretanto, essa premissa foi avaliada em pequenos segmentos de rede contendo poucas descontinuidades como transformadores, para-raios e cargas consumidoras e nenhuma ramificação. Para avaliar se essa premissa continua sendo válida em um cenário mais realístico, neste trabalho, uma rede com topologia complexa, contendo ramificações, transformadores, unidades consumidoras, para-raios e aterramentos, é simulada diretamente no *Alternative Transients Program* (ATP). Para incluir o efeito dos campos eletromagnéticos externos nos condutores da linha de transmissão, fontes de corrente externas, calculadas com o *Extended Modal-Domain Model* (EMD), foram conectadas ao modelo de linha JMarti disponível no ATP. A partir disso, é realizada a comparação de resultados considerando ou não a resistividade do solo para diferentes configurações de rede de distribuição. Os resultados obtidos apontam que devido características das redes complexas, principalmente a presença de várias descontinuidades, incluir a influência do solo nos sinais que viajam nos condutores da linha é necessário mesmo quando a rede é composta apenas por linhas com tamanho inferior a 1 km.

Palavras-chave: tensões induzidas; descargas atmosféricas; redes de distribuição com topologia complexa; simuladores de transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

When carrying out studies of the lightning induced, losses caused by soil resistivity are often not included in the signals traveling in the distribution line conductors. This is because in lines whose length is less than 1 km the effect of soil losses can be neglected. However, this premise was evaluated in small network segments containing few discontinuities such as transformers, surge arresters and consumer loads and no laterals. To assess whether this premise remains valid in a more realistic scenario, in this work, a network with complex topology, containing laterals, transformers, consumer loads, surge arresters and grounding, is simulated directly in the Alternative Transients Program (ATP). To include the effect of external electromagnetic fields on the transmission line conductors, external current sources, calculated with the Extended Modal-Domain Model (EMD), were connected to the JMarti line model available in ATP. Thereafter, the results are compared considering or not the soil resistivity for different distribution network configurations. The obtained results indicate that due to the characteristics of complex networks, mainly the presence of several discontinuities, including the influence of the ground in the signals that travel in the line conductors is necessary even when the network is composed only of lines smaller than 1 km.

Keywords: induced voltages; atmospheric discharges; distribution networks with complex topology; electromagnetic transient simulators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Metodologia utilizada.....	16
Figura 2 – Descargas atmosféricas diretas; a) descarga direta na rede de baixa tensão; b) descarga direta no ramal de alimentação residencial e; c) descarga direta em uma edificação.....	19
Figura 3 – Descarga atmosférica indireta.....	19
Figura 4 – Representação do canal de retorno; (a) formação do canal de retorno e; (b) efeitos luminoso e sonoro associados.....	22
Figura 5 – Propagação do campo eletromagnético através do canal de retorno.....	24
Figura 6 – Tensões induzidas de acordo com as características do solo.....	28
Figura 7 – Modelo de rede de distribuição de média e baixa tensão.....	32
Figura 8 – Configurações das redes de baixa e média tensão.....	33
Figura 9 – Modelo simplificado de uma das fases do transformador de distribuição.....	34
Figura 10 – Curva $V \times I$ do elemento não linear do para-raios.....	35
Figura 11 – Circuito equivalente do resistor não-linear.....	35
Figura 12 – Circuitos equivalentes de cargas consumidoras.....	37
Figura 13 – Simulação de corrente de descarga atmosférica.....	41
Figura 14 – a) Tensões induzidas no poste 12 da rede de média tensão e; b) tensões induzidas no poste 15 da rede de baixa tensão.....	42
Figura 15 – a) Tensões induzidas no poste 13 da rede de baixa tensão e; b) tensões induzidas no poste 14 da rede de baixa tensão.....	43
Figura 16 – Tensão induzida no poste 15, circuito de média tensão, evento A.....	44
Figura 17 – Tensão induzida no poste 15, circuito de média tensão, evento B.....	45
Figura 18 – Tensão induzida no poste 15, rede completa ligada, evento A.....	46
Figura 19 – Tensão induzida no poste 15, rede completa ligada, evento B.....	47
Figura 20 – Comparação de tensão induzida no poste 12 da média tensão entre para-raios ligados e desligados, evento B.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivo específico	15
1.2	Metodologia	15
1.3	Estrutura	16
2	MODELOS PARA ESTUDOS DE TENSÃO INDUZIDA	18
2.1	Descargas atmosféricas	18
2.1.1	Canal de retorno	20
2.1.2	Campos eletromagnéticos associados ao fenômeno descargas atmosféricas	24
2.1.3	Modelos de linha para cálculo de tensão induzida	26
2.2	Topologia da rede de distribuição	31
2.2.1	Modelo de transformador	33
2.2.2	Modelo de para-raios	34
2.2.3	Modelo de aterramento	36
2.2.4	Modelo de cargas	37
3	RESULTADOS	39
3.1	Estudo de caso	39
3.2	Validação	41
3.2.1	Parametrização do modelo de linha	41
3.2.2	Validação de circuito completo	42
3.3	Análise de influência do solo	43
3.3.1	Rede de média tensão	43
3.3.2	Circuito completo	45
3.3.3	Análise de influência de para-raios	47
4	CONCLUSÃO	49
4.1	Resultados do trabalho	49
4.2	Dificuldades encontradas	49
4.3	Propostas de continuidade	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tornou-se fundamental para o desenvolvimento humano. Conseqüentemente, fez-se necessária a construção de grandes usinas geradoras, normalmente construídas longe dos grandes centros de carga, demandando longas linhas de transmissão e subestações para cobrir grandes distâncias e interligar as usinas aos centros de carga, formando o Sistema Elétrico de Potência (SEP) (BICHELS, 2018).

Com a disseminação da eletricidade, o Brasil deixa de ser um país majoritariamente agrícola, para se tornar um país industrializado (CARVALHO, 2014), tornando-se dependente da energia elétrica para a sustentabilidade de sua economia. Apesar do setor elétrico corresponder a apenas 2,2% do Produto Interno Bruto do Brasil, a falta de energia causa um impacto muito maior que esse percentual. Isso ocorre por causa do uso da eletricidade em todos os setores da economia. O desligamento não programado de energia elétrica pode ocasionar acidentes de trânsito devido à falta de sinalização, incêndios devido à falta de controles e monitoramentos eletrônicos, danos a equipamentos de grandes indústrias devido aos transitórios de chaveamento entre outros, culminando em grandes prejuízos econômicos (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2014).

Para garantir o fornecimento de energia elétrica, o setor elétrico brasileiro é regido por normas elaboradas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), além de normas elaboradas por agência ou grupos internacionais, que devem ser seguidas, com o objetivo de manter um padrão de qualidade na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (FERREIRA & DAMASCENO DA NOBREGA, 2017).

Com o desenvolvimento tecnológico, equipamentos elétricos cada vez mais sensíveis a perturbações são conectados ao SEP. Logo, a qualidade da energia elétrica torna-se foco de estudos nos centros de pesquisas e nos agentes do setor. Deste modo, os agentes de distribuição, transmissão e geração precisam identificar os fatores que afetam a qualidade de energia e realizar o planejamento necessário para adequarem-se aos padrões de qualidade e desempenho definidos pelas normas reguladoras (TRONCHONI, 2008). Os agentes de energia elétrica sofrem penalidades quando algum dos indicadores de qualidade de energia elétrica não atende aos padrões exigidos. No Brasil, quando o limite dos indicadores de qualidade for

superado, a multa aplicada ao agente transgressor, em alguns casos, é transferida aos usuários diretamente prejudicados (BRASIL, 2020). O impacto acumulado das penalidades impostas às empresas fornecedoras de energia, em decorrência de interrupções de distribuição, por exemplo, está na casa de milhões de reais (PERGENTINO, 2019). Tratando-se especificamente do setor de distribuição, os desligamentos não programados e danos a equipamentos são provocados principalmente por descargas atmosféricas indiretas. Esse fato denota a importância do estudo do fenômeno e sua forma de interação com os diversos equipamentos conectados aos sistemas de distribuição.

Tendo em vista a natureza do fenômeno das descargas atmosféricas e sua importância no cenário de fornecimento de energia elétrica é fundamental que o estudo de seus efeitos nas redes de distribuição de energia elétrica seja realizado com o maior rigor possível, para permitir a elaboração de esquemas de proteção efetivos. Para tal, faz-se necessário o estudo de modelos rigorosos, já disponíveis na literatura, tanto para a modelagem do fenômeno descarga atmosférica quanto para modelagem dos diversos equipamentos que compõem a rede.

No entanto, as perdas no solo, relacionadas aos sinais que se propagam nos condutores de uma linha de distribuição, são costumeiramente negligenciadas por não apresentarem influência nos estudos de descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição sem ramificações e de comprimento menor que 1 km (RACHIDI et al., 1996) (COORAY, 2009). Entretanto, como mostrado por Paolone et al. (2005a), em redes ramificadas, desprezar as perdas pode não ser uma boa aproximação, mesmo quando a rede é constituída de linhas cujo comprimento seja inferior a 1 km. Tal fato está associado às múltiplas reflexões que ocorrem em cada ponto de descontinuidade, que faz com que o sinal viaje por mais tempo nos condutores da linha. Esse efeito é similar ao aumento do comprimento efetivo dos condutores e evidencia o efeito das perdas associadas à propagação do sinal na linha (LEAL, 2020).

Diante do exposto, este trabalho de conclusão de curso propõe analisar a influência das perdas no solo, nos sinais que viajam ao longo da linha, no contexto de descargas atmosféricas indiretas em redes de distribuição com topologia complexa. Espera-se que os estudos realizados possam auxiliar nas tomadas de decisão relacionadas às técnicas de proteção de descargas atmosféricas utilizadas atualmente no setor de energia elétrica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo referente aos efeitos de descargas atmosféricas indiretas em uma rede de distribuição com topologia complexa. Para tal, foram realizadas simulações de diferentes configurações de rede e análise dos resultados obtidos.

1.1.2 Objetivo específico

O trabalho proposto tem como objetivos específicos:

- Definir a topologia da rede de distribuição que se pretende estudar;
- Definir o modelo para representar o fenômeno descarga atmosférica indireta;
- Definir os modelos para representar adequadamente os diversos equipamentos que compõem a rede de distribuição;
- Validar, quando necessário, os modelos implementados por meio de comparação com resultados disponíveis na literatura;
- Analisar o efeito de descargas atmosféricas indiretas na rede de distribuição.

1.2 Metodologia

Inicialmente é realizado o estudo das referências bibliográficas através de livros, artigos, teses e dissertações. Isto possibilita o desenvolvimento da base de conhecimento necessária para o entendimento e seleção dos modelos matemáticos representativos das descargas atmosféricas e da topologia da rede.

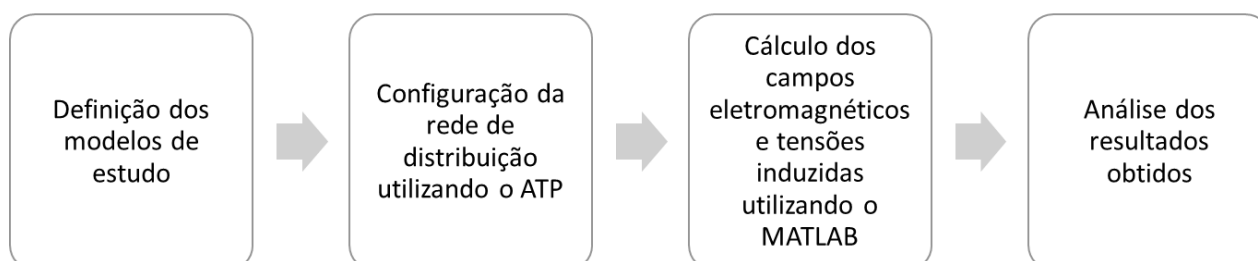
A partir disso, os modelos selecionados são implementados no *software* MATLAB (MATHWORKS, 1996) e no *software* de cálculo de transitórios eletromagnéticos ATP, *do inglês Alternative Transients Program* (ATP, 2022). O *software* MATLAB foi selecionado por possuir uma ampla biblioteca de funções e ferramentas que facilitam a modelagem do fenômeno descarga atmosférica. O *software* ATP, por sua vez, foi selecionado por possuir uma ampla biblioteca de modelos matemáticos que facilitam a representação dos diferentes equipamentos que

compõem a rede de distribuição, além de oferecer um ambiente de simulação integrado para estudos de fenômenos transitórios.

O MATLAB é utilizado para modelar a descarga atmosférica conforme o modelo estendido no domínio modal, do inglês *Extended Modal-Domain Model (EMD)*, proposto por De Conti e Leal (2021). Além disso, o MATLAB é utilizado para realizar o acoplamento do EMD com o modelo de linha proposto Marti (1982) disponível no ATP, que considera as perdas nos condutores, no solo e a dependência da variação dos parâmetros da linha com a frequência. Por outro lado, o ATP é utilizado para modelar a rede e seus diversos componentes. Portanto, os estudos transitórios são realizados diretamente na plataforma ATP. Por fim, uma análise sistemática dos dados obtidos é realizada.

O passo a passo da metodologia utilizada está ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Metodologia utilizada.



Fonte: Autoria própria.

1.3 Estrutura

O texto está dividido em 4 capítulos. No capítulo 2 tem-se a apresentação dos modelos de estudos (modelo de cálculo de campo eletromagnético, modelo de representação de descarga atmosférica, modelo de acoplamento eletromagnético, modelo de linha de transmissão e modelo de incorporação do efeito dos campos eletromagnéticos) utilizados e suas justificativas de escolha dentre os demais modelos disponíveis na literatura. Também estão descritos os modelos dos elementos (transformador, para-raios, aterramento e cargas) que compõem a topologia do circuito de distribuição proposto.

No capítulo 3 é feita a parametrização do modelo de linha utilizado e é explicada a validação do circuito proposto em comparação com o circuito de referência.

No capítulo 4 são realizadas as conclusões finais sobre os resultados obtidos, bem como considerações sobre futuros trabalhos que podem ser realizados dentro do mesmo tema.

2 MODELOS PARA ESTUDOS DE TENSÃO INDUZIDA

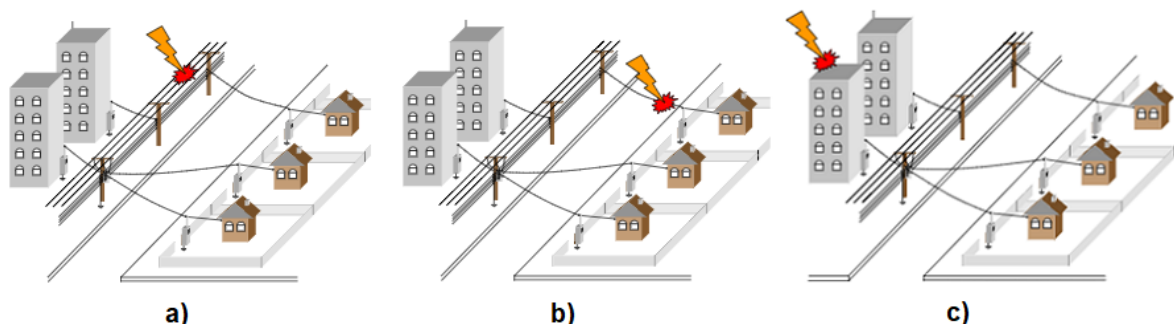
Este capítulo apresenta aspectos fundamentais sobre descargas atmosféricas, campos eletromagnéticos associados e técnicas matemáticas para a representação do fenômeno. Além disso, são abordados aspectos relacionados a interação entre os campos eletromagnéticos que iluminam uma linha de transmissão e seus condutores. Por fim, são discutidos conceitos e modelos de transformadores, cargas e para-raios sob a ótica de redes de distribuição com topologia complexa.

Para facilitar o entendimento da teoria abordada, o capítulo é dividido em 5 seções. Na seção 2.1, é abordada a teoria básica sobre o fenômeno descarga atmosférica, bem como, a modelagem do canal de descarga, os campos eletromagnéticos associados e os modelos de linha para estudos de fenômenos tensão induzida em linhas de transmissão aérea. A seção 2.1.3 apresenta o conceito de redes de distribuição com topologia complexa. Ainda na seção 2.2, são abordados aspectos importantes sobre os equipamentos que compõem uma rede de distribuição, bem como, os modelos utilizados nos estudos de sobretensões provocadas por descargas atmosféricas.

2.1 Descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas são fenômenos elétricos naturais que ocorrem dentro de uma nuvem, entre uma nuvem e o solo ou entre duas nuvens próximas (SALARI FILHO, 2006). Quando sua ocorrência envolve o solo e a nuvem pode vir a provocar distúrbios na rede elétrica cuja magnitude depende do ponto de incidência. Quando da sua ocorrência nuvem-solo, no contexto de sistema elétricos de potência, as descargas são comumente classificadas em descargas diretas ou descargas indiretas. As descargas diretas são aquelas cujo ponto de incidência é um equipamento da rede elétrica. As descargas indiretas são aquelas cujo ponto de incidência se localiza nas vizinhanças da rede elétrica. A título de exemplo, na Figura 2 são apresentados diferentes pontos de ocorrência de descargas diretas e na Figura 3 é exemplificada a ocorrência de descarga indireta.

Figura 2 – Descargas atmosféricas diretas; a) descarga direta na rede de baixa tensão; b) descarga direta no ramal de alimentação residencial e; c) descarga direta em uma edificação.



Fonte: De Conti (2006, p. 2).

Figura 3 – Descarga atmosférica indireta.



Fonte: De Conti (2006, p. 2).

Ao tratar de sistemas elétricos, os danos provocados pelas descargas atmosféricas dependem do nível de tensão do sistema, dentre outros fatores. No setor de transmissão, as descargas atmosféricas diretas são responsáveis pelo maior número de desligamentos (VISACRO, 2005). Por outro lado, no setor de distribuição, ambos os fenômenos podem provocar sobretensões impulsivas capazes de superar o nível básico de isolamento da linha de distribuição (SILVA NETO, 2004). No entanto, devido a fatores ligados às características das linhas de distribuição, as descargas indiretas são responsáveis pela maioria dos desligamentos e danos físicos a equipamentos pertencentes à rede elétrica de distribuição ou conectados nessa (DE CAMPOS, 2012).

Os modelos mais utilizados para descrever o fenômeno descargas atmosféricas, para estudos de tensões induzidas em linhas de transmissão, são aqueles classificados como modelos de engenharia (DE CONTI et al., 2015; RAKOV; UMAN, 1998). Nos modelos de engenharia a representação do fenômeno tensão induzida por descargas atmosféricas é comumente subdividida em quatro passos

(COORAY, 2003). O primeiro passo consiste na modelagem da corrente de retorno. A corrente de retorno pode ser calculada através da somatória das duas funções de Heidler [Vide equações (1) e (2)] que representam a forma de onda de corrente conforme observado experimentalmente (NUCCI, 1993).

$$i(0, t) = \sum_{k=1}^2 \left\{ \left[\frac{I_0}{e^{-\eta_k}} \right] \left[\frac{t}{\tau_{1,k}} \right] \left[1 + \left(\frac{t}{\tau_{1,k}} \right)^{n_k} \right]^{-1} e^{-\frac{t}{\tau_{2,k}}} \right\}, \quad (1)$$

$$\eta_k = \left(\frac{\tau_{1,k}}{\tau_{2,k}} \right) \left(n_k \frac{\tau_{1,k}}{\tau_{2,k}} \right)^{\frac{1}{n_k}}, \quad (2)$$

em que I_0 é a amplitude da corrente da base do canal, $\tau_{1,k}$ é a constante de tempo de chegada função, $\tau_{2,k}$ é a constante de tempo de decaimento, η_k é o fator de correção de amplitude e n_k é o valor exponencial, todos referentes à k -ésima função.

No segundo passo, os estudos são concentrados na modelagem do comportamento da corrente ao longo do canal de retorno que será discutida com maior riqueza de detalhes na subseção 2.1.1. Nesse passo, busca-se descrever as distorções e atenuações da corrente de retorno ao percorrer o canal de descarga. No terceiro passo, busca-se descrever o comportamento dos campos eletromagnéticos associados às descargas atmosféricas (discutido na subseção 2.1.2). E, por fim, os modelos de linha de transmissão para estudos de tensão induzida, abordado na subseção 2.1.3, que visam representar a influência dos campos eletromagnéticos nos condutores da linha iluminada.

2.1.1 Canal de retorno

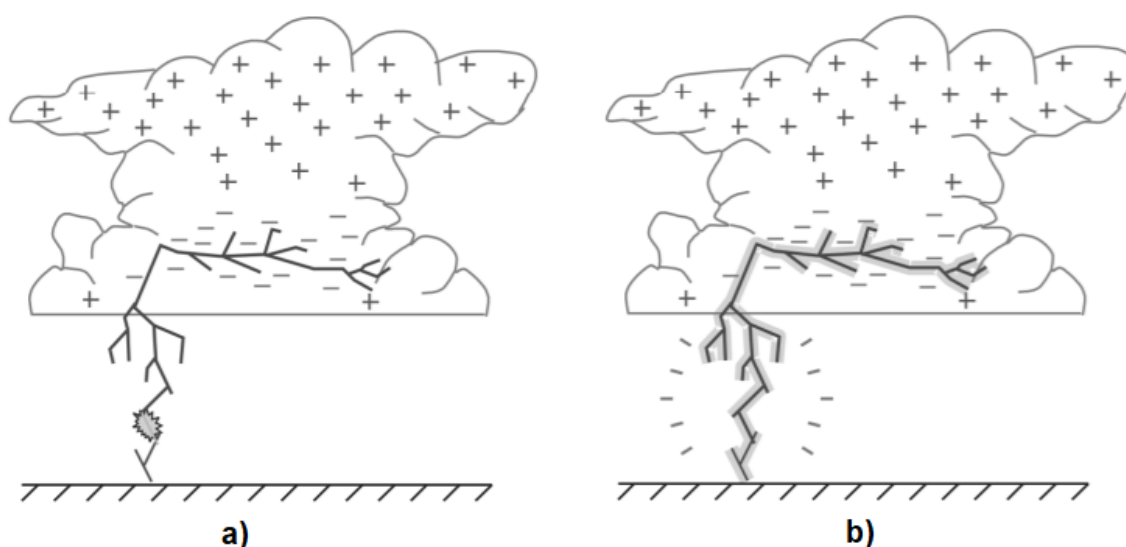
Quando uma nuvem está carregada de cargas elétricas, há uma indução de cargas elétricas com polaridade inversa no solo, estabelecendo uma diferença de potencial entre nuvem e solo. Essa diferença de potencial pode chegar a valores na ordem de MV, com um campo elétrico de mesma intensidade, condições favoráveis ao surgimento de descargas atmosféricas (VISACRO, 2005).

Uma das teorias que busca explicar o fenômeno descarga atmosférica, denominada líder por passos (do inglês *stepped leader* – tradução livre), diz que, em uma dada nuvem carregada, em sua base, com cargas elétricas negativa, o início da formação do canal de descarga ocorre no instante em que a intensidade do campo

elétrico supera a rigidez dielétrica do ar, em um determinado ponto do espaço. Neste instante, há o deslocamento de cargas elétricas da nuvem para o ar, constituindo, então, um segmento de canal ionizado, denominado percussor. O acúmulo de cargas elétricas no percurso de corrente, resulta no aumento da intensidade do campo elétrico em sua extremidade. Com o aumento da intensidade do campo elétrico na extremidade do percurso, há o rompimento da rigidez dielétrica local, fazendo com que as cargas se desloquem do percurso para um novo segmento de canal, agora formado entre o percussor e a terra. Caso permaneçam as condições de intensidade de campo elétrico, o canal pode evoluir, tornando-se maior e mais intenso, podendo surgir inclusive ramificações. Além disso, com a evolução do canal da nuvem para o solo, denominado canal descendente, há a formação de um canal do solo para a nuvem, denominado canal ascendente.

Ao estabelecer-se a conexão do canal descendente com o canal ascendente [Figura 4(a)], o que ocorre quando é ultrapassada a altura mínima (associada à quantidade de carga contida no canal), há a propagação de uma corrente elétrica de alta intensidade [Figura 4(b)], conhecida como corrente de retorno (do inglês *return-stroke*, tradução livre). O fluxo dessa corrente gera um aquecimento intenso do ar, que expande ocasionando uma onda sonora que pode ser ouvida até aproximadamente 10km de distância, o trovão. Também ocorre um efeito luminoso, chamado de relâmpago (VISACRO, 2005). O fluxo de corrente de retorno através do canal de descarga, chamado de *stroke*, é o elemento mais importante nos estudos para aplicações de engenharia. Essa corrente apresenta rápido crescimento nos instantes iniciais, seguido de um comportamento mais lento (DE CONTI, 2006).

Figura 4 – Representação do canal de retorno; (a) formação do canal de retorno e; (b) efeitos luminoso e sonoro associados.



Fonte: Visacro (2005, p. 40).

O primeiro *stroke* de uma descarga descendente (da nuvem para o solo) tem uma corrente tipicamente 2 a 3 vezes mais intensa do que a corrente dos *strokes* seguintes, também chamadas de descargas subsequentes. No entanto, aproximadamente 30% das descargas possuem pelo menos um *stroke* subsequente cujo pico de corrente é maior do que o pico de corrente do *stroke* inicial. Cerca de 80% das descargas, contêm mais de um *stroke*, com um intervalo entre *strokes* de cerca de dezenas de milissegundos (RAKOV, 2001).

Outro parâmetro importante utilizado para modelar o fenômeno descargas atmosféricas é a velocidade em que a corrente de retorno se desloca ao longo do canal de descarga. Esse parâmetro torna-se, ainda mais importante, em estudos que avaliam os efeitos das descargas atmosféricas em linhas de transmissão e/ou comunicação (RACHIDI et al., 1996). Isso se dá, porque a forma de onda da corrente ao longo do canal de descarga é influenciada pela velocidade da corrente de retorno (RAMELI et al., 2016).

Neste contexto, há na literatura diversos modelos para descrever, matematicamente, a distribuição espacial da corrente de retorno, comumente denominados modelos de corrente de retorno (DE CONTI, 2006) (BRIGNONE et al., 2019). As características que diferenciam os modelos de corrente de retorno são a distribuição temporal e espacial da carga no canal de retorno e o uso da velocidade da frente de onda. Alguns dos modelos disponíveis na literatura são o modelo de

Bruce-Golde (BG) (MASLOSWKI; RAKOV, 2007), que é o mais simples, o modelo de linha de transmissão, do inglês *transmission line* (TL) (UMAN; MCLAIN, 1969), o modelo modificado de linha de transmissão, do inglês *modified transmission line* (MTL) (NUCCI et al., 1990) e, também, o modelo modificado de linha de transmissão com decaimento exponencial (MTLE), do inglês *modified transmission line with exponential decay* (NUCCI, 1988).

Os modelos de corrente de retorno, a depender das características físicas do fenômeno que se deseja representar, são comumente classificados em modelos físicos (BRAGINSKII, 1958), modelos de engenharia (UMAN; MCLAIN, 1969), modelos eletromagnéticos (PODGORSKI; LANDT, 1987) e modelos por parâmetros distribuídos (PRICE; PIERCE, 1977). Conforme a seção introdutória, tratando-se de tensão induzida por descargas atmosféricas os modelos de engenharia se destacam devido sua precisão, acurácia, simplicidade matemática e eficiência computacional. Os principais parâmetros de entrada para os modelos de engenharia são: altura do canal, velocidade de propagação e forma de onda da corrente injetada na base do canal. Nestes modelos, o cálculo é realizado através de uma equação que descreve a corrente de retorno como uma função que relaciona a altura do canal e o tempo. Isso é realizado, assumindo que o canal de descarga possa ser representado por uma linha reta vertical (PAOLONE, 2001).

Para estudos realizados no contexto deste trabalho, tensão induzida em linhas de distribuição aéreas, os modelos de engenharia comumente utilizados nas simulações são os modelos TL e o MTLE. No modelo TL, o *stroke* de retorno é modelado como uma corrente ascendente cuja forma de onda é expressa pela equação (3) (UMAN; MCLAIN, 1969)

$$i(z, t) = u\left(t - \frac{z}{v}\right) \cdot i\left(0, t - \frac{z}{v}\right), \quad (3)$$

em que $i(0, t)$ é a corrente injetada na base do canal de descarga de altura z no instante de tempo t , v é a velocidade de propagação da corrente ao longo do canal de retorno e $u(t)$ é a função degrau unitário. O modelo TL assume que a corrente do canal de retorno viaja ao longo do canal com velocidade de propagação constante, sem sofrer distorções, mantendo a forma de onda constante ao longo do canal de descarga (UMAN, 1968). Por outro lado, o modelo MTLE, representado pela equação (4), considera a propagação da corrente de retorno ao longo do canal ocorre sem distorção, porém com uma atenuação que depende da constante λ (NUCCI, 1988).

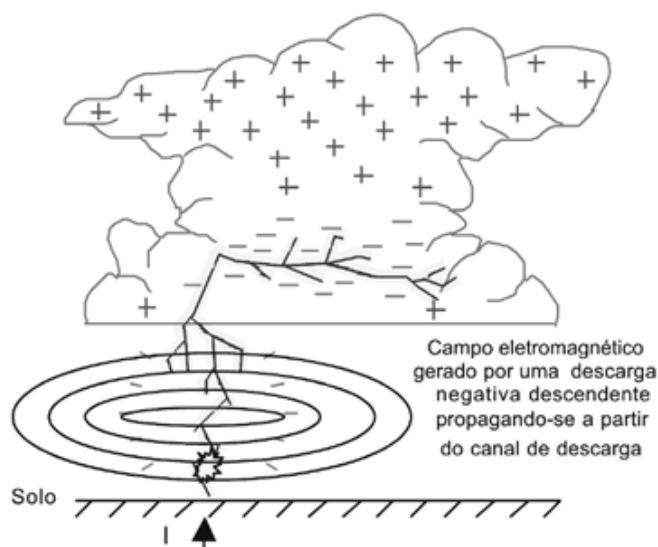
$$i(z, t) = u \left(t - \frac{z}{v} \right) \cdot e^{-\frac{z}{\lambda}} \cdot i \left(0, t - \frac{z}{v} \right). \quad (4)$$

Entretanto, o modelo TL não descreve o comportamento da carga removida ao longo do canal de descarga, o que faz com que os campos produzidos não sejam apropriados para longas distâncias (NUCCI et al., 1990). Contudo, tanto o modelo TL quanto o modelo MTLE são amplamente utilizados na literatura o que facilita a validação dos estudos análises dos resultados e possíveis comparações. Por essas razões, neste trabalho, nos estudos realizados são utilizados ambos os modelos.

2.1.2 Campos eletromagnéticos associados ao fenômeno descargas atmosféricas

A variação da corrente de retorno, que viaja ao longo do canal de descarga, faz surgir campos eletromagnéticos, também variáveis no tempo. Os campos eletromagnéticos são irradiados a partir do ponto de incidência da descarga através do ar, como ilustrado na Figura 5. Quando tais campos eletromagnéticos iluminam os condutores de uma linha de transmissão, induz sobretensões nos mesmos. As sobretensões induzidas, por sua vez, propagam-se pelos condutores da linha podendo danificar os equipamentos elétricos a ela conectados (DE CAMPOS, 2012).

Figura 5 – Propagação do campo eletromagnético através do canal de retorno.



Fonte: Visacro (2005, p. 145).

As tensões induzidas no sistema de distribuição de energia elétrica podem atingir valores na ordem de kV, conforme a distância do local de incidência da

descarga até a linha de distribuição. Para uma distância de 200 metros, a sobretensão propagada pode ultrapassar os 100 kV (VISACRO, 2005).

Então, para que sejam obtidos os valores das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas, faz-se necessário o cálculo dos campos eletromagnéticos associados. Neste contexto, um dos primeiros modelos para o cálculo dos campos eletromagnéticos foi proposto por Rusck (1957). O estudo se baseou no modelo de Wagner e McCann (1942) para calcular as componentes do campo elétrico em termos da corrente de retorno. No modelo proposto por Rusck (1957) foi desprezada a condutividade do solo no cálculo do campo elétrico. No entanto, a influência da condutividade finita do solo nos campos eletromagnéticos que iluminam os condutores influencia significativa na tensão induzida (BARBOSA, 2009). Neste sentido, tendo como base o modelo de Rusck (1957), Barbosa e Paulino propõem um modelo para o cálculo dos campos eletromagnéticos devido a descargas atmosféricas incluindo o efeito da condutividade finita do solo (BARBOSA; PAULINO, 2007). As equações propostas por Barbosa e Paulino (2007) são descritas pelas Equações (5) a (10)

$$e_r(r, z, t) = e_{r,q}(r, z, t) + e_{r,i}(r, 0, t), \quad (5)$$

$$e_{r,q}(r, z, t) = e_s(r, z) \cdot u\left(t - \frac{r}{c}\right) \left\{ 1 - \frac{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 + \left(v \cdot \frac{t}{r}\right)^2\right]^{1,5}} \right\}, \quad (6)$$

$$e_s(r, z) = \frac{z_E \cdot i_d \cdot z}{2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{c} \cdot r^2}, \quad (7)$$

$$e_{r,i}(r, 0, t) = -z_E \cdot h_{\phi,d0} \left\{ \frac{\varepsilon_R + \frac{a(t-t_0)}{z}}{[\varepsilon_R + a(t-t_0)]^{1,5}} \right\}, \quad (8)$$

$$h_{\phi,d}(r, 0, t) = \frac{i_d \cdot v \cdot t}{2 \cdot \pi \cdot r} \left\{ (v \cdot t)^2 + \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] r^2 \right\}^{-0,5}, \quad (9)$$

$$E_{z,r} = \frac{(t-t_0)}{T} E_0 + \frac{z_E \cdot I_0 \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot v_R \cdot T \cdot v} \ln \left[\frac{vt + \sqrt{(vt)^2 + \lambda r_0^2}}{r_0 (1 + v_R)} \right], \quad (10)$$

em que Z_E é a impedância no espaço livre ($Z_E = 377 \Omega$), ε_R é a permissividade relativa do solo, v_R é a velocidade da descarga de retorno em relação à velocidade da luz c , r_0 é a distância entre a descarga e o ponto de estudo, E_Z é o campo elétrico vertical e

$$\lambda = (1 - v_R^2).$$

A equação (5) representa a decomposição do campo elétrico horizontal gerado por descargas. O termo $e_{r,q}$ descreve o campo elétrico horizontal assumindo solo condutor perfeito e $e_{r,i}$ descreve a influência das perdas no solo. Como o efeito

das perdas do solo no cálculo do campo elétrico vertical ($E_{z,r}$) pode ser negligenciado (COORAY, 2003), ($E_{z,r}$) é obtido assumindo solo condutor perfeito [vide equação (10)] (BARBOSA, 2009).

A principal vantagem do modelo de Barbosa e Paulino (2007), no contexto deste trabalho, é o fato de que suas equações são analíticas e descritas diretamente no domínio do tempo. Isso torna o cálculo dos campos eletromagnéticos mais eficiente por evitar a utilização de técnicas numéricas de integração, como é o caso das equações propostas por Norton (1936). Além de evitar a necessidade de transformadas numéricas para converter as grandezas obtidas no domínio da frequência para o domínio do tempo, como é o caso das equações utilizadas em Bannister (1984). Ademais facilita sua utilização com os modelos de acoplamento.

2.1.3 Modelos de linha para cálculo de tensão induzida

A proposição de modelos para cálculo de tensão induzida é realizada principalmente pela solução das equações dos chamados modelos de acoplamento. Os modelos de acoplamento permitem incorporar às tradicionais equações do telegrafista a influência dos campos eletromagnéticos que iluminam seus condutores (PAOLONE et al., 2005b). Ou seja, modelos de acoplamento são técnicas utilizadas para inserir os efeitos dos campos eletromagnéticos gerados por fontes externas (PAOLONE et al., 2009), exemplo descargas atmosféricas, nas tradicionais equações de linha de transmissão.

No contexto de tensão induzida por descargas atmosféricas, as equações obtidas podem ser resolvidas no domínio da frequência ou no domínio do tempo. Conforme explicado por Leal (2020), os modelos no domínio da frequência possuem solução mais simples, contudo, a representação de elementos não lineares, que naturalmente compõem uma rede de distribuição, como os para-raios e transformadores, não é uma tarefa trivial. Além disso, a solução no domínio da frequência exige grande esforço computacional, uma vez que, os cálculos precisam ser refeitos para uma grande faixa de valores de frequência. Por outro lado, os modelos no domínio do tempo são, geralmente mais eficientes e, a representação de elementos não-lineares é uma tarefa relativamente simples. Ademais, a representação no domínio do tempo facilita a utilização de ferramentas

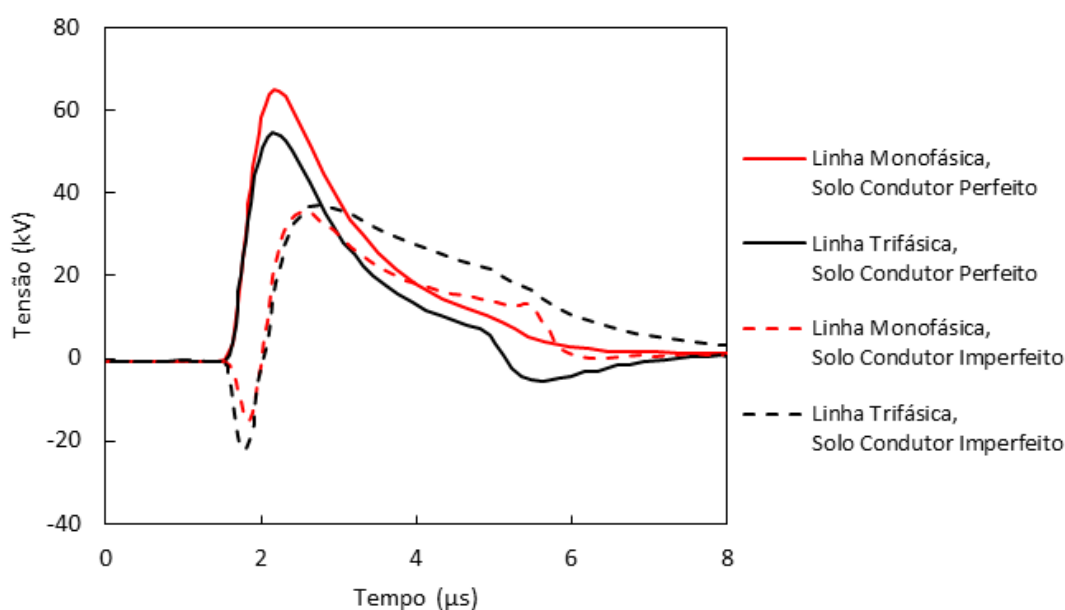
computacionais, haja vista que tais ferramentas são predominantemente desenvolvidas para estudos no domínio do tempo. Entretanto, a utilização de modelos desenvolvidos no domínio do tempo dificulta a representação de grandezas cujos parâmetros são dependentes da frequência, como o comportamento da resistividade do solo (VISACRO, 2002). Para representar esses fenômenos faz-se necessário o uso de integrais de convolução, que também apresentam custo computacional considerável. No entanto, com os avanços tecnológicos na área da computação, o tempo de resolução das equações, no domínio do tempo e no domínio da frequência está tornando-se admissível (DE CONTI, 2006). Diante disso, devido às características das redes com topologias complexas, foco dos estudos realizados neste trabalho, e dos vários elementos não lineares que a compõem priorizou-se o uso de modelos desenvolvidos diretamente no domínio do tempo ou de conversão simplificada.

Existem vários modelos de acoplamento eletromagnético (AGRAWAL et al., 1980; PAOLONE, 2001; PAUL, 1976; TAYLOR et al., 1965). Dentre os quais os modelos de Agrawal (1980), Paolone (2001), e Taylor (1965) são desenvolvidos diretamente no domínio do tempo. Segundo De Conti (2006), dentre os modelos disponíveis, o modelo de Agrawal representa um dos modelos mais utilizados em estudos de tensão induzida. Uma das vantagens do modelo de Agrawal (1980) é a possibilidade de se incluir o efeito da resistividade do solo no cálculo da tensão induzida.

Geralmente, na solução dos modelos de acoplamento, considera-se o solo como condutor perfeito, haja vista que a transformada inversa de Fourier da matriz de impedâncias associada ao efeito do solo, pode tornar a resolução dos modelos de acoplamento uma tarefa demasiadamente complexa (DE CONTI et al., 2012). No entanto, negligenciar a representação do efeito da resistividade do solo no cálculo das tensões induzidas pode conduzir a erros (RACHIDI, 1999). Em Rachidi (1999) foi realizada uma análise sistemática para mitigar a influência dos parâmetros do solo nas tensões induzidas considerando diferentes resistividades do solo. Em seus estudos foram utilizadas duas configurações diferentes: na primeira utilizou-se uma linha monofásica a uma altura de dez metros e, na segunda, uma linha contendo três fases equidistantes horizontalmente e a dez metros de altura foi utilizada. Em ambas as configurações a linha possui dez quilômetros de comprimento. Os campos eletromagnéticos gerados pela corrente de retorno foram calculados utilizando o

modelo MTL, utilizando solo condutor perfeito (condutividade infinita) e solo com perdas (neste caso, condutividade constante de $\sigma_g = 0,001 \text{ S/m}$ e permissividade relativa $\varepsilon_{rg} = 10$). Os resultados são mostrados na Figura 6. Pode-se observar que a condutividade do solo tem grande efeito na magnitude e na forma de onda da tensão induzida. Ou seja, desprezar a influência do solo no cálculo dos campos eletromagnéticos associados pode introduzir erros consideráveis nos resultados (RACHIDI, 1999).

Figura 6 – Tensões induzidas de acordo com as características do solo.



Fonte: Adaptado de Rachidi (1999, p. 7).

A partir dos modelos de acoplamento foram propostos vários modelos de linha para estudos de tensão induzidas por descargas atmosféricas. Esses modelos podem ser divididos entre analíticos (ANDREOTTI et al., 2001) e numéricos, como os modelos LIOV (ANDREOTTI et al., 2015), acrônimo de *Lightning-Induced OverVoltage*, LIV (HØIDALEN, 1999), acrônimo de *Lightning-Induced Voltage* (XÉMARD et al., 1995) (LIU et al., 2018). Dentre estes, somente o modelo LIOV está disponível na biblioteca de uma plataforma de simulação, neste caso, no programa de transitórios eletromagnéticos EMTP (acrônimo de *Electromagnetic Transients Program*) (EMTP, 2022). No entanto, o *software* EMTP não possui licença livre, o que dificulta o acesso a pesquisadores e empresas de pequeno porte. Contudo, recentemente foi proposto por De Conti e Leal (2021a, 2021b) dois modelos para o cálculo de tensão induzidas em linhas de transmissão no domínio do tempo que inclui

a variação dos parâmetros do solo com a frequência denominados modelo estendido no domínio modal (EMD do inglês *Extended Modal-Domain*) e modelo estendido no domínio das fases (EPD do inglês *Extended Phase-Domain*). A grande vantagem dos modelos propostos por De Conti e Leal (2021a, 2021b) é a possibilidade de se utilizar os modelos de linha já existente nas plataformas de simulação. Isso evita que o usuário implemente, na plataforma, um modelo de linha dedicado ao cálculo de tensão induzida. Como, neste trabalho, foi utilizado a plataforma de transitórios eletromagnéticos ATP, optou-se por utilizar o modelo EMD, cujas equações base são descritas nas Equações de (11) a (16) (DE CONTI E LEAL, 2021a; 2021b), acoplado ao modelo de linha proposto por Marti (1982).

$$u_0(t) \approx - \int_0^\ell t_v a_{mod}(x, t) * [t_v^{-1} e_x(x, t)] dx - h e_z(0, t) + t_v a_{mod}(\ell, t) * [t_v^{-1} h e_z(\ell, t)], \quad (11)$$

$$u_\ell(t) \approx \int_0^\ell t_v a_{mod}(x, t) [t_v^{-1} e_x(\ell - x, t)] dx - h e_z(\ell, t) + t_v a_{mod}(\ell, t) * [t_v^{-1} h e_z(0, t)], \quad (12)$$

$$u'_0(t) = a_\ell(t) * [u_\ell(t) - u'_\ell(t)], \quad (13)$$

$$u'_\ell(t) = a_\ell(t) * [u_0(t) - u'_0(t)], \quad (14)$$

Ao definir $\bar{u}_0(t) = u_0(t) - u'_0(t)$ e $\bar{u}_\ell(t) = u_\ell(t) - u'_\ell(t)$, tem-se:

$$\bar{u}_0(t) = u_0(t) - a_\ell(t) * \bar{u}_\ell(t), \quad (15)$$

$$\bar{u}_\ell(t) = u_\ell(t) - a_\ell(t) * \bar{u}_0(t), \quad (16)$$

em que $u_0(t)$ e $u_\ell(t)$ são as fontes de tensão que contabiliza o efeito dos campos eletromagnéticos externos, ℓ é o comprimento da linha de transmissão, t_v é a matriz de transformação real, constante e calculada em uma frequência especificada pelo usuário. A matriz t_v é obtida a partir dos autovetores do produto ZY , sendo Z e Y as matrizes de impedância longitudinal e admitância transversal da linha, $a(x, t)$ é a matriz contendo a transformada inversa de Laplace de $e^{-\gamma x}$, conhecida como função de propagação da linha, onde $\gamma = \sqrt{ZY}$, e_x é a componente horizontal do campo elétrico incidente ao longo de cada condutor (parcela de $e_r(r, z = h, t)$ na direção do condutor) e h é a matriz diagonal contendo as alturas dos condutores.

O modelo de linha de transmissão proposto por Marti (1982) é um dos modelos mais utilizados em simulações de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão. O modelo se destaca por ser de parâmetros distribuídos no qual a

variação dos parâmetros de linha com a frequência é determinada automaticamente em rotinas disponíveis nos simuladores (DE CONTI; EMÍDIO, 2015). Na literatura é possível encontrar modelos mais rigorosos como é o caso do ULM (modelo de linha universal, do inglês *universal line model*) (MORCHED et al., 1999) e modelos baseados na técnica de FDTD (diferenças finitas no domínio do tempo, do inglês *finite difference time domain*) (YEE, 1966). Contudo, tais modelos desenvolvidos no domínio das fases com o ULM e FDTD ainda não estão disponíveis em plataformas de simulação gratuitas. Portanto, dentre os modelos de linhas disponíveis em plataforma de simulação gratuitas, mais especificamente no ATP, o modelo proposto por Marti é o mais rigoroso (EEUG, 2020).

Conforme Bañuelos-Cabral et al., (2019ab), o modelo de Marti (1985), chamado JMarti, baseia-se nas equações (17) e (18) do telegrafista que governam a propagação de onda eletromagnética ao longo de uma linha de n -condutores:

$$\frac{d^2 \mathbf{V}}{dx^2} = \mathbf{ZYV}, \quad (17)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{I}}{dx^2} = \mathbf{YZI}. \quad (18)$$

Onde \mathbf{V} e \mathbf{I} são vetores de comprimento n de tensão e corrente e as equações (19) e (20) são matrizes simétricas de dimensão $n \times n$.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L}, \quad (19)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\omega\mathbf{C}, \quad (20)$$

onde \mathbf{Z} é a impedância, \mathbf{R} é a resistência, \mathbf{L} a indutância, \mathbf{Y} é a admitância, \mathbf{G} é a condutância e \mathbf{C} é a capacitância da linha, todos por unidade de comprimento. Nas extremidades da linha $x = 0$ e $x = l$, as equações (21) e (22) relacionam as ondas de corrente com as reflexões terminais:

$$\mathbf{I}_0 - \mathbf{Y}_c \mathbf{V}_0 = -\mathbf{H} [\mathbf{I}_L + \mathbf{Y}_c \mathbf{V}_L], \quad (21)$$

$$\mathbf{I}_L - \mathbf{Y}_c \mathbf{V}_L = -\mathbf{H} [\mathbf{I}_0 + \mathbf{Y}_c \mathbf{V}_0], \quad (22)$$

no qual

$$\mathbf{Y}_c = \mathbf{Z}^{-1} \sqrt{\mathbf{ZY}} = \sqrt{(\mathbf{YZ})^{-1}}, \quad (23)$$

$$\mathbf{H} = e^{-\sqrt{\mathbf{YZ}}l}, \quad (24)$$

onde \mathbf{Y}_c é a matriz de admitância característica, \mathbf{H} é matriz de função de propagação e l é o comprimento da linha.

A partir disso, tem se as equações (25) e (26):

$$\mathbf{I} = \mathbf{T}_I \mathbf{I}^m, \quad (25)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{T}_V \mathbf{V}^m, \quad (26)$$

onde \mathbf{T}_I e \mathbf{T}_V são as matrizes de autovetores de \mathbf{YZ} e \mathbf{ZY} . A partir do método de Bode (1945), é feita uma aproximação de \mathbf{Y}_c e da matriz de impedância característica \mathbf{Z}_c que no domínio modal pode ser definida pela equação (27):

$$Z_{c,i}^m \cong \sum_{k=1}^{Nz_i} \frac{c_{i,k}}{s - p_{i,k}} + d_{i,k}, \quad (27)$$

no qual Nz_i é a ordem de enquadramento, $c_{i,k}$ é o k -ésimo resíduo que corresponde à i -ésima quantidade modal, $d_{i,k}$ é a k -ésima constante correspondente à quantidade modal e $p_{i,k}$ é o k -ésimo polo correspondente ao encaixe da quantidade modal. De modo similar, a equação (28) representa a aproximação da função de propagação:

$$H_i^m \cong \sum_{k=1}^{Nh_i} \frac{c_{i,k}}{s - p_{i,k}} e^{-s \tau_i}, \quad (28)$$

em que τ_i representa o tempo associado com a i -ésima quantidade modal. No modelo JMarti, \mathbf{H} e \mathbf{Z}_c são representados na forma de polos (p_m) e zeros (z_n), conforme a equação (29):

$$F(s) \cong h \frac{(s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_n)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_m)}. \quad (29)$$

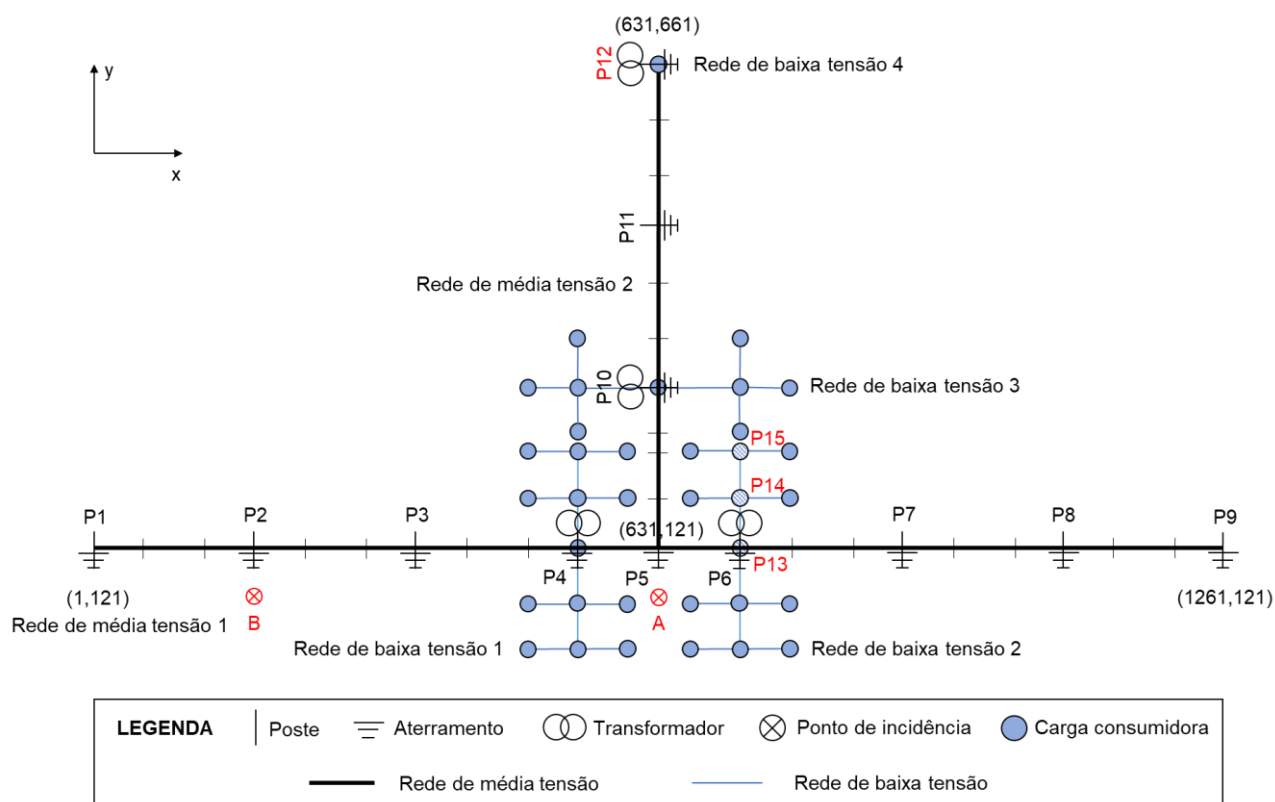
2.2 Topologia da rede de distribuição

A rede de distribuição no Brasil possui topologia tipicamente radial, operando em níveis de tensão entre 11,9 kV e 34,5 kV. A topologia radial é caracterizada pelo caminho único entre o consumidor e a subestação de energia, visando baixo custo de implementação e operação (MARTINS, 2018). Neste trabalho, entende-se como redes de distribuição com topologia complexa como sendo um conjunto de equipamentos interligados como linhas de distribuição, incluindo condutores de média e baixa tensão, ramificações, aterramentos de condutores e equipamentos, transformadores,

para-raios e as cargas e demais equipamentos com intuito de conectar os consumidores ao sistema de transmissão.

Um exemplo de rede de distribuição complexa é mostrado na Figura 7. A rede é composta por linhas de distribuição de média e baixa tensão, transformadores aterrados, ramais de ligação, cargas e para-raios. Estruturas típicas linhas de distribuição de média e baixa tensão são ilustradas na Figura 7.

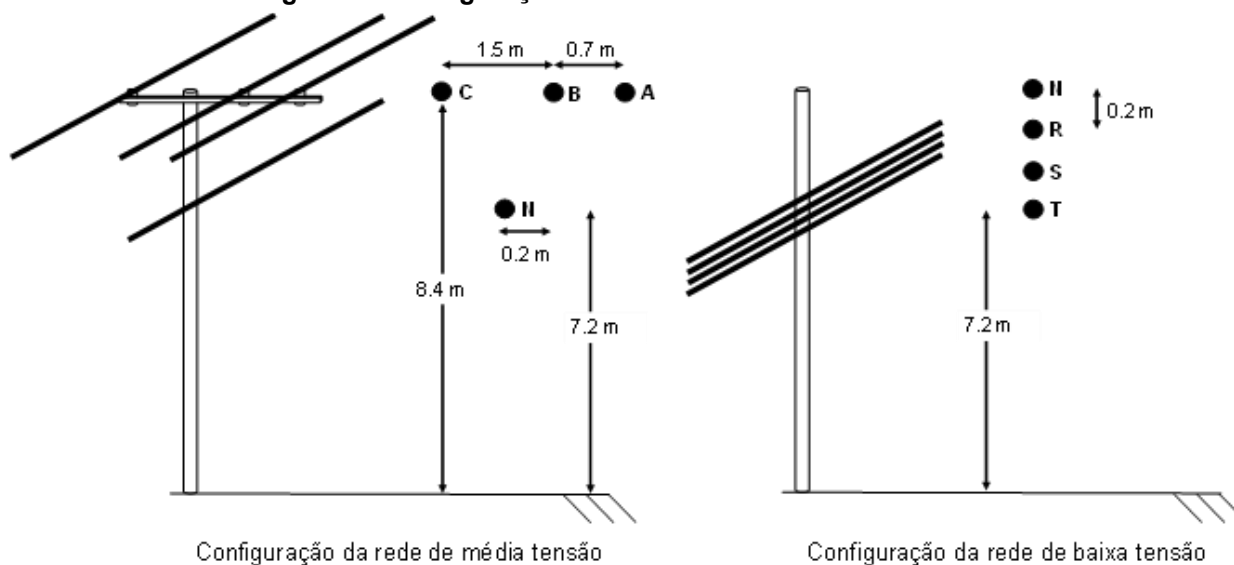
Figura 7 – Modelo de rede de distribuição de média e baixa tensão.



Fonte: Adaptado de De Conti et al. (2011, p. 8).

Conforme mostrado na Figura 8(a) a linha de distribuição composta de três condutores fases e um neutro, todos possuem raio de 0,85 cm. Já as linhas de baixa tensão, mostrada na Figura 8(b), é composta de três condutores fases e um neutro simetricamente espaçados com raio de 0,47 cm.

Figura 8 – Configurações das redes de baixa e média tensão.



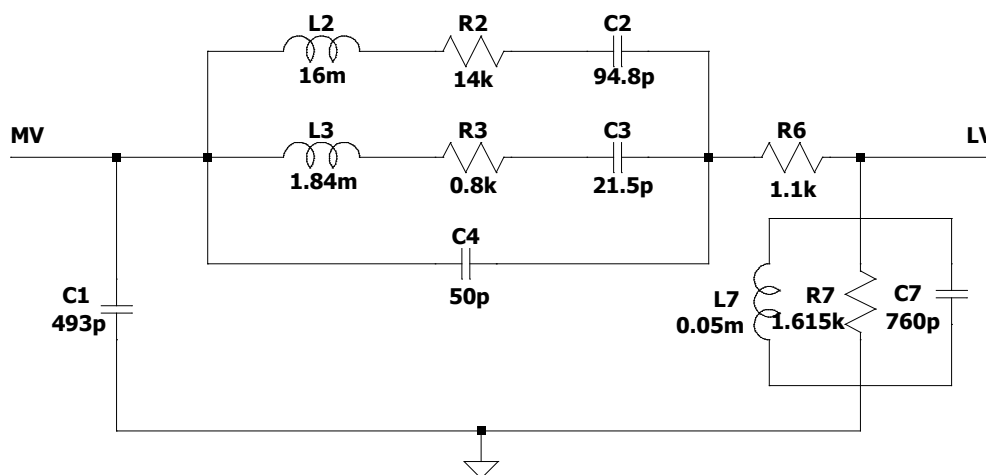
Fonte: Adaptado de De Conti et al. (2011, p. 8).

Uma breve descrição dos modelos dos equipamentos que constituem uma rede com topologia complexa, comumente utilizados para os estudos de sobretensões devido a descargas atmosféricas, são descritos nas seções 2.2.1 a 2.2.5.

2.2.1 Modelo de transformador

Para a análise dos surtos transferidos para a rede de baixa tensão, é necessária a modelagem do comportamento em alta frequência do transformador de distribuição (PIANTINI, 2020). Contudo, a obtenção de um modelo de transformador válidos para uma ampla faixa de frequência não é uma tarefa fácil. Na literatura, é possível encontrar modelos rigorosos de transformador (TRAN-ANH et al., 2006) (GHAREHPETIAN et al., 1998). Porém, geralmente é necessário realizar medições individuais no transformador que se deseja representar para obter os parâmetros de entrada do modelo. Um modelo de transformador simples que pode ser utilizado é apresentado em Piantini, Malagodi (1999). O modelo proposto busca descrever o comportamento do transformador por um conjunto de circuitos RLC como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Modelo simplificado de uma das fases do transformador de distribuição.



Fonte: Adaptado de Piantini e Malagodi (1999).

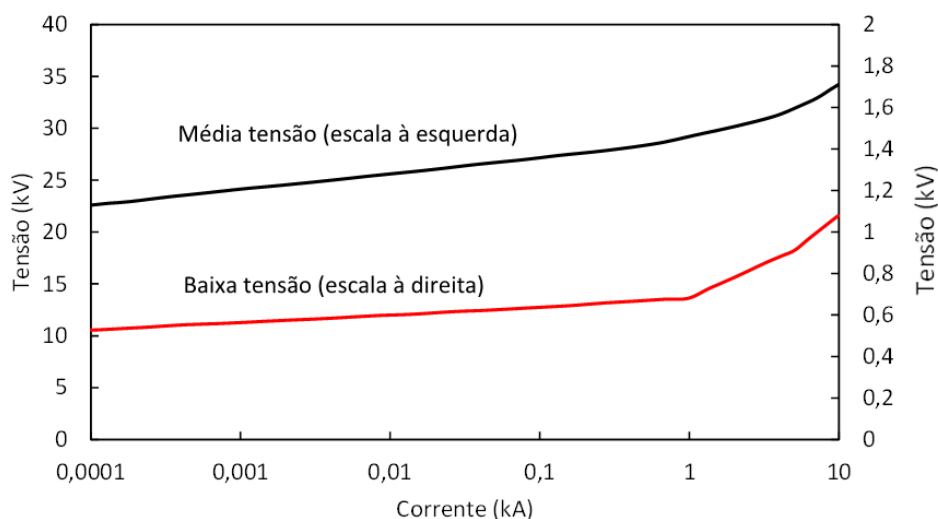
Este é um modelo simplificado para transformadores de distribuição trifásicos utilizado com sucesso em estudos de fenômeno de tensão induzida (PIANTINI; MALAGODI, 1999). Os valores apresentados no circuito descrito na Figura 9 foram obtidos para uma das fases de um transformador de distribuição de 13,8 kV – 220/127 V, conexão triângulo-estrela e 30 kVA.

2.2.2 Modelo de para-raios

Os para-raios de óxido de zinco utilizados em redes de média e baixa tensão funcionam de modo que o resistor não linear atua como uma resistência pequena para casos de sobre tensões, e uma resistência grande para tensões normais de operação (MARROQUES, 2015). Os para-raios são instalados nos lados primário e secundário dos transformadores da rede de distribuição, em equipamentos, pontos de transição da rede e pontos finais (DE CONTI, 2006).

A modelagem do para-raios é feita através da curva $V \times I$ do resistor não-linear do para-raios comumente utilizado na rede de distribuição, representada na Figura 10. A Figura 10 ilustra o comportamento dos para-raios utilizados na média tensão, cuja tensão de corte é 30 kV, e na baixa tensão, cuja tensão de corte é de 1kV.

Figura 10 – Curva $V \times I$ do elemento não linear do para-raios.

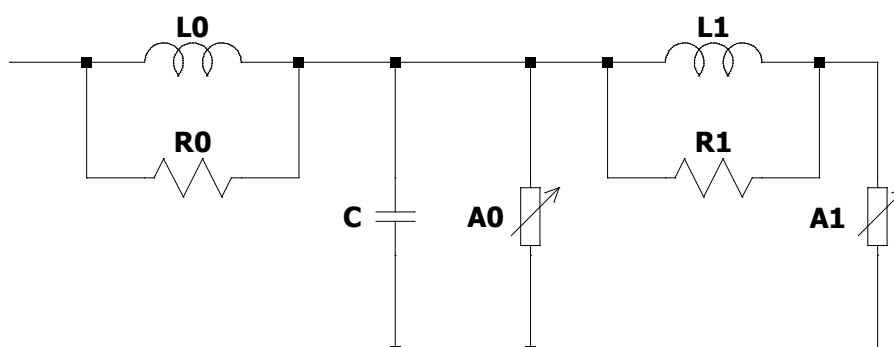


Fonte: Adaptado de De Conti (2006, p. 143).

Os parâmetros são obtidos através das dimensões do para-raios e do número de colunas de materiais de óxido de zinco (MARROQUES, 2015). Estas informações acerca das características de funcionamento do equipamento devem ser fornecidas pelo fabricante (IEEE, 1992).

No modelo descrito em IEEE (1992), o para-raios dependente de frequência visto na Figura 11 pode ser utilizado para estudos de descargas atmosféricas, uma vez que apresenta bons resultados para correntes de surto com tempos de pico entre 0,5 e 40 μ s.

Figura 11 – Circuito equivalente do resistor não-linear.



Fonte: Adaptado de IEEE (1992, p. 303).

Neste modelo, a característica não linear $V \times I$ do para-raios é representada pelas seções A_0 e A_1 , separadas por um filtro R-L. Para correntes com maior tempo

de frente, como no caso das causadas por tensões induzidas provenientes de descargas atmosféricas, a impedância do filtro R-L se torna mais significativa. Isso resulta em uma corrente maior na seção A_0 do que na A_1 . As características de A_0 e A_1 podem ser obtidas a partir da curva do resistor.

2.2.3 Modelo de aterramento

O aterramento é uma conexão com a terra que provém um caminho de descarregamento para correntes provenientes de descargas elétricas, minimizando o risco de choque elétrico (ALEXANDER; SADIKU, 2007). Conforme a Copel (2019), o aterramento dos condutores de baixa tensão, nas redes de distribuição urbana, é realizado através do aterramento do neutro da rede secundária com cabos nus a cada 150 m, com uma única haste, de maneira sólida e permanente. Além disso, também deve haver aterramento do neutro da rede de baixa tensão em todo fim de rede secundária, desde que o condutor neutro não tenha sido aterrado no poste anterior.

Em estudos de transitórios eletromagnéticos é importante uma correta representação dos sistemas de aterramentos utilizados. Tais modelos devem ser capazes de descrever o comportamento do sistema de aterramento em uma ampla faixa de frequência. Neste sentido, um modelo de aterramento simples e eficiente foi proposto por De Conti (2006). O modelo proposto por De Conti reproduz satisfatoriamente o comportamento dos sistemas de aterramento tipicamente utilizados em redes de distribuição. O circuito proposto é composto por uma associação de um resistor em paralelo com um capacitor. Os valores de resistência e capacitâncias foram definidos a partir do valor da resistividade do solo medido em baixas frequências. O modelo foi validado para as configurações de aterramento contendo uma única haste e três hastes paralelas, para solo cuja resistividade seja de $100 \Omega\text{m}$, $500 \Omega\text{m}$, $1000 \Omega\text{m}$ e $2000 \Omega\text{m}$. A Tabela 1 descreve os valores da resistência R_T e capacitância C_T do circuito, para solos de diferentes resistividades, assumindo sistema de aterramento composto por uma haste. Por outro lado, na Tabela 2 são mostrados os valores de R_T e de C_T assumindo-se que o sistema de aterramento é composto por três hastes.

Tabela 1 – Parâmetros de circuito para representar aterramento de rede de distribuição composto por uma haste.

Parâmetros	$\rho = 100 \Omega m$	$\rho = 500 \Omega m$	$\rho = 1000 \Omega m$	$\rho = 2000 \Omega m$
R (Ω)	31,5	158,4	316,8	634,6
C (nF)	1,11	1,00	0,8373	0,8364

Fonte: De Conti (2006).

Tabela 2 – Parâmetros de circuito para representar aterramento de rede de distribuição composto por três hastes.

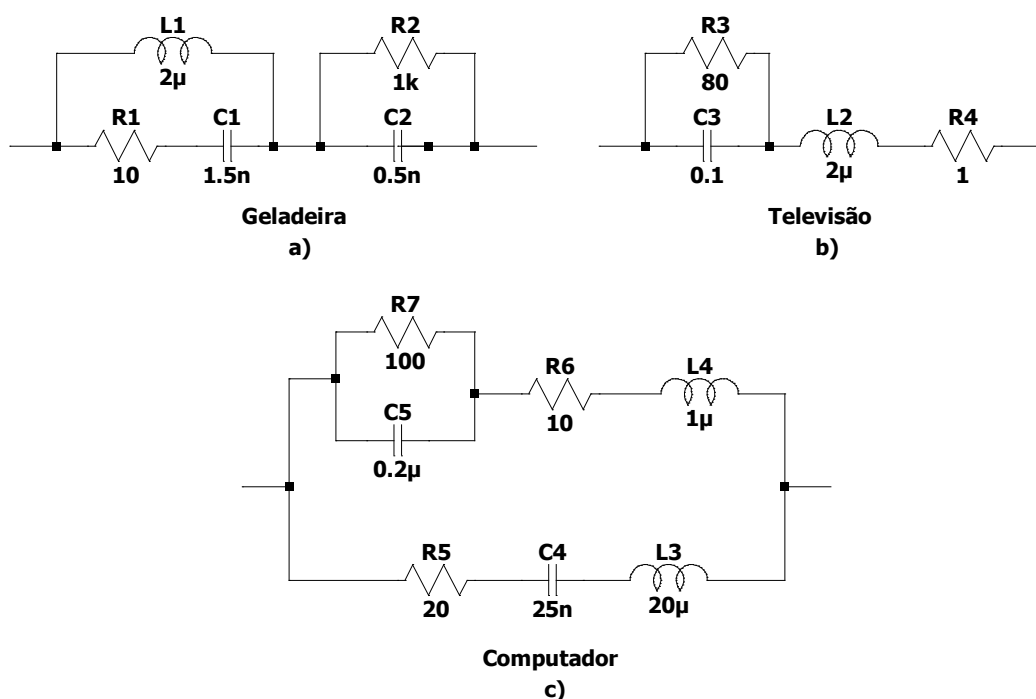
Parâmetros	$\rho = 100 \Omega m$	$\rho = 500 \Omega m$	$\rho = 1000 \Omega m$	$\rho = 2000 \Omega m$
R (Ω)	11,3	56,2	112,6	225,3
C (nF)	-	3,50	2,86	2,62

Fonte: De Conti (2006).

2.2.4 Modelo de cargas

O modelo de cargas escolhido foi proposto por Bassi, Burani, Janiszewski (2005), e consiste de resistores conectados entre uma fase e o neutro. Esse modelo serve para representar cargas tipicamente ligadas na rede de baixa tensão, como geladeira [Figura 12(a)], televisão [Figura 12(b)], e computador [Figura 12(c)].

Figura 12 – Circuitos equivalentes de cargas consumidoras.



Fonte: Adaptado de Bassi, Burani e Janiszewski (2005).

As cargas são consideradas como parte de uma unidade consumidora trifásica, modelada como proposto por De Conti (2006), ligada na rede de baixa tensão através de um ramal multiplexado de 15 m de comprimento. O ramal utiliza o circuito π equivalente, no qual o condutor neutro está a 7,2 m de altura e as fases estão distribuídas ao redor do condutor neutro a 1,5 cm de espaçamento entre os centros. Os condutores escolhidos possuem resistência interna de 0,852 Ω /m e raio de 0,426 cm.

3 RESULTADOS

Este capítulo apresenta a validação do modelo de rede de distribuição descrito a partir da comparação com o modelo proposto por De Conti et al. (2012), bem como os resultados obtidos com os modelos escolhidos. Além disso, apresenta-se uma análise comparativa considerando ou não as perdas associadas ao efeito do solo nos sinais que se propagam na linha de transmissão.

3.1 Estudo de caso

Para analisar a influência do efeito do solo nos surtos de tensão induzidas nos condutores de uma rede com topologia complexa contendo ramificações e vários equipamentos, comumente presente nas redes de distribuição, a rede descrita na seção 2.2 foi utilizada. O software utilizado para realizar os cálculos do transitório foi o ATP, através do ATP Draw. Os modelos de carga, transformadores, para-raios e linhas de transmissão descritos no Capítulo 2 foram utilizados para descrever cada um dos equipamentos conectados à rede.

A rede considerada contém doze postes que conectam quatro circuitos de média tensão e dos circuitos de baixa tensão. A média tensão possui um condutor neutro aterrado a cada 180 m, através de uma haste vertical de 2,4 m, com exceção dos postes com transformador onde três hastes horizontais com espaçamento de 3 m são utilizadas. Na rede de baixa tensão o aterramento é feito no poste do transformador e nas entradas de serviço. Para-raios do tipo ZnO estão conectados no primário e secundário do transformador.

Como o ATP não possui em sua biblioteca nenhum modelo de linha que permite o cálculo de tensão induzida que inclui o efeito da resistividade finita do solo nos surtos de tensão induzida que viajam na linha, o EMD, proposto por (DE CONTI; LEAL, 2021), juntamente com o modelo de linha do Marti (1982) foi utilizado. Tal estratégia de solução reproduz resultados de modelos já consolidados como o LIOV (ANDREOTTI et al., 2015), modelos baseados na técnica de FDTD (YEE, 1966) e medições em redes reais (WANG et al., 2015) ou de escala reduzida (PIANTINI, 1997). A etapa de cálculo das fontes indutoras é realizada no MATLAB.

Para reproduzir o fenômeno descarga atmosférica utilizou-se o modelo MTLE, assumindo constante de atenuação de 2000 e velocidade de propagação da corrente ao longo do canal de 130.000 km/s, para descrever o comportamento da corrente de retorno ao longo do canal de descarga. O cálculo dos campos eletromagnéticos foi realizado utilizando as equações (5), (6) e (8) propostas por Barbosa e Paulino (2007). Os circuitos de média e de baixa tensão descritos na Figura 7 são utilizados, assumindo que os condutores possuem resistividade de 118,72 mΩ/km para as fases e 1,3403 Ω/km para neutro. Todas as tensões induzidas analisadas são entre fase e neutro.

Os dados da Tabela 3 são valores de primeiro *stroke* de uma descarga observada na Suíça, com valor de pico de 31 kA (DE CONTI; VISACRO, 2007) (ANDERSON; ERIKSSON, 1980). Os dados foram selecionados de forma a facilitar reprodutibilidade dos resultados.

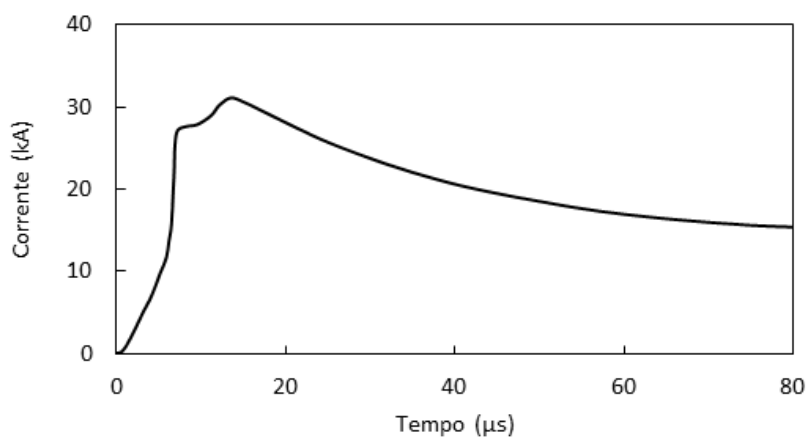
Tabela 3 – Parâmetros de corrente de canal de descarga.

k	I_k (kA)	n_k	$\tau_{k,1}$ (μ s)	$\tau_{k,2}$ (μ s)
1	3	2	3	76
2	4,5	3	3,5	25
3	3	5	5,2	20
4	3,8	7	6	60
5	13,6	44	6,6	60
6	11	2	10	600
7	5,7	15	11,7	48,5

Fonte: Adaptado de De Conti, Visacro (2007).

A partir dos dados da tabela, é gerada a curva da corrente de canal de descarga utilizada para cálculo ilustrada na Figura 13.

Figura 13 – Simulação de corrente de descarga atmosférica.



Fonte: Adaptado de De Conti et al. (2012).

3.2 Validação

Antes de realizar as simulações considerando solo condutor finito, uma etapa de validação é necessária. O objetivo dessa etapa é avaliar se o circuito e respectivas conexões foram realizadas corretamente. Primeiramente, foi realizada a verificação da correta parametrização do modelo de linha EMD. Em um segundo momento, foi feita a validação do circuito implementado a partir das comparações com os resultados apresentados em De Conti et al. (2012), obtidos assumindo linha sem perdas.

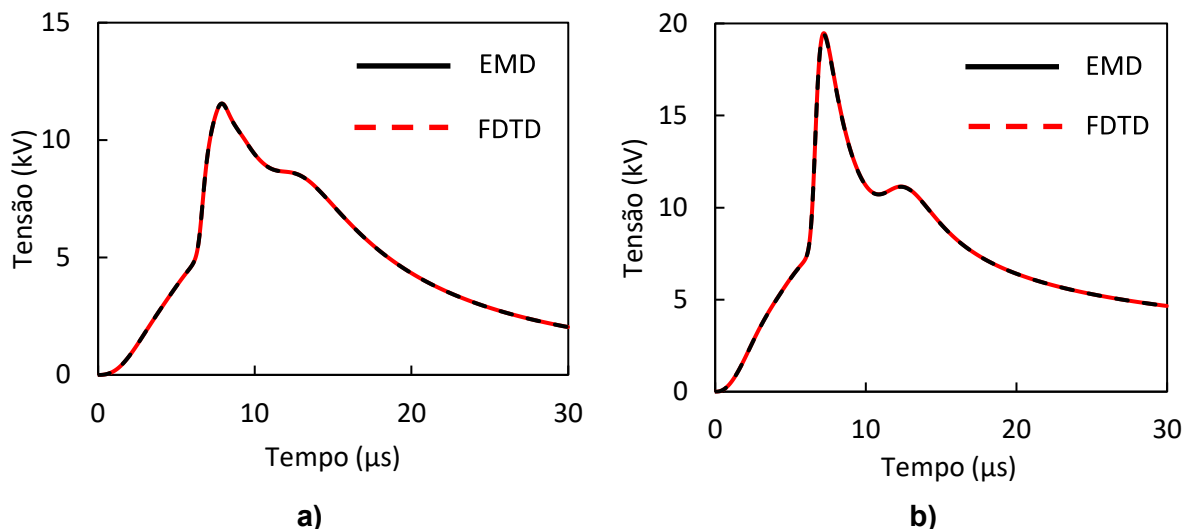
3.2.1 Parametrização do modelo de linha

Para verificar se os parâmetros de entrada do EMD foram corretamente inseridos na ferramenta, foi simulada uma descarga no ponto A, da Figura 7, e verificadas as tensões induzidas de fase nos postes 12 e 15 das redes de média e baixa tensão a 540 m e 134 m de distância, respectivamente. Um modelo de linha baseado na técnica de FDTD implementado e validado por Leal e De Conti (2021) foi utilizado como referência.

Nas Figura 14(a) e (b) pode-se observar que o EMD reproduz exatamente o comportamento das tensões induzidas calculada com o FDTD em ambas as

terminações. Dessa forma, verifica-se que a configuração do modelo EMD foi realizada corretamente.

Figura 14 – a) Tensões induzidas no poste 12 da rede de média tensão e; b) tensões induzidas no poste 15 da rede de baixa tensão.

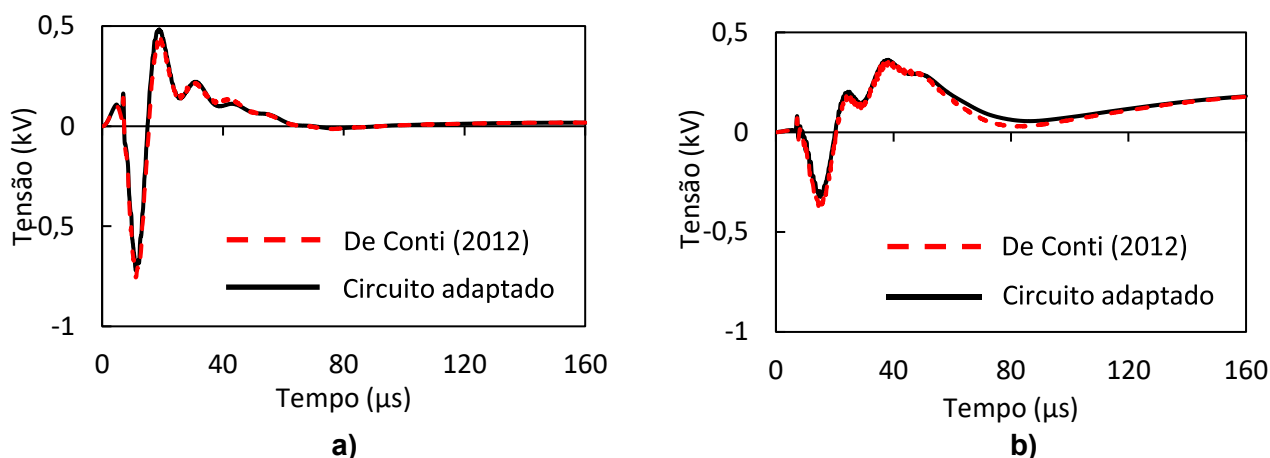


Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Validação de circuito completo

Para validar a implementação do circuito completo na plataforma ATP, foi feita a simulação de uma descarga atmosférica incidente no ponto A, conforme descrito na Figura 7, desprezando a influência das perdas no solo nos surtos que viajam na linha. As tensões induzidas foram calculadas em dois pontos do circuito 2 de baixa tensão. Na Figura 15(a) são comparadas as tensões induzidas no poste 13 obtidas por De Conti et al. (2012) e obtidas com o circuito ATP (denominado circuito adaptado). Na Figura 15(b) é feita a comparação de tensões induzidas no poste 14. As diferenças entre as curvas podem ser atribuídas a possíveis diferenças nas técnicas de solução utilizadas para o cálculo dos campos eletromagnéticos associados às descargas atmosféricas e ao fato de que, no trabalho de De Conti (2012), foi utilizado um modelo de linha sem perdas, neste trabalho as perdas são negligenciadas assumindo $\sigma = 1 \times 10^6 S/m$. Portanto, pode-se concluir que o circuito foi implementado corretamente, uma vez que as curvas das tensões induzidas são muito próximas.

Figura 15 – a) Tensões induzidas no poste 13 da rede de baixa tensão e; b) tensões induzidas no poste 14 da rede de baixa tensão.



Fonte: Autoria própria.

3.3 Análise de influência do solo

Para avaliar a influência da condutividade do solo no cálculo das tensões induzidas por descarga atmosférica, foram realizadas simulações para solos de resistividades (ρ) de $100 \Omega\text{m}$, $500 \Omega\text{m}$ e $1000 \Omega\text{m}$, considerando os parâmetros de linha com perdas e sem perdas, ou seja, n , solo condutor perfeito. As simulações para linhas sem perdas são realizadas assumindo um solo de resistividade $\rho = 1 \mu\Omega\text{m}$ somente no cálculo dos parâmetros da linha. Além disso, foram calculadas as tensões induzidas para dois pontos de incidência de descarga atmosférica, chamados A e B, conforme indicados na Figura 7. Foram executadas simulações considerando somente a rede de média tensão ligada e simulações considerando a rede completa ligada.

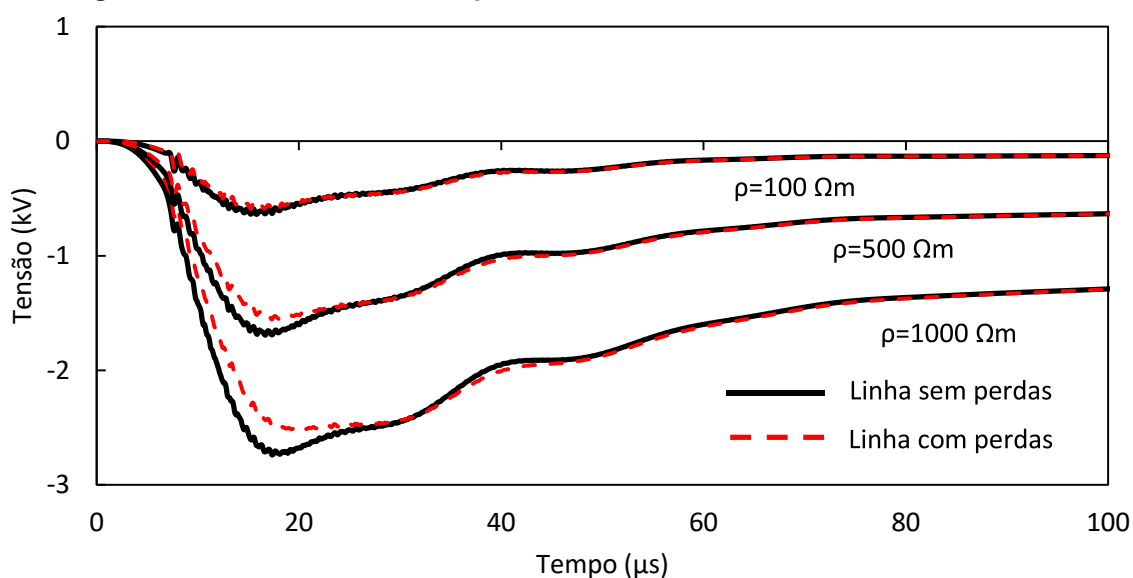
3.3.1 Rede de média tensão

Neste caso, a rede é composta somente pelo circuito de média tensão supondo solo de resistividade $100 \Omega\text{m}$, $500 \Omega\text{m}$ e $1000 \Omega\text{m}$. A tensão induzida calculada no poste 15 é mostrada na Figura 16, assumindo descarga atmosférica incidindo no ponto A.

Para resistividade de solo de $100 \Omega\text{m}$ é possível observar, somente nos primeiros instantes, uma leve diferença na tensão calculada. Isso confirma que para solos de baixa resistividade, supor linha sem perdas não acarreta grandes diferenças

numéricas nos cálculos. Mas, ao se considerar linha sem perdas, para solos de $500 \Omega m$ ou $1000 \Omega m$, uma diferença nítida no primeiro pico negativo de tensão é observada. Ou seja, com o aumento da resistividade de solo o desvio observado supondo linhas sem perdas aumentam.

Figura 16 – Tensão induzida no poste 15, circuito de média tensão, evento A.



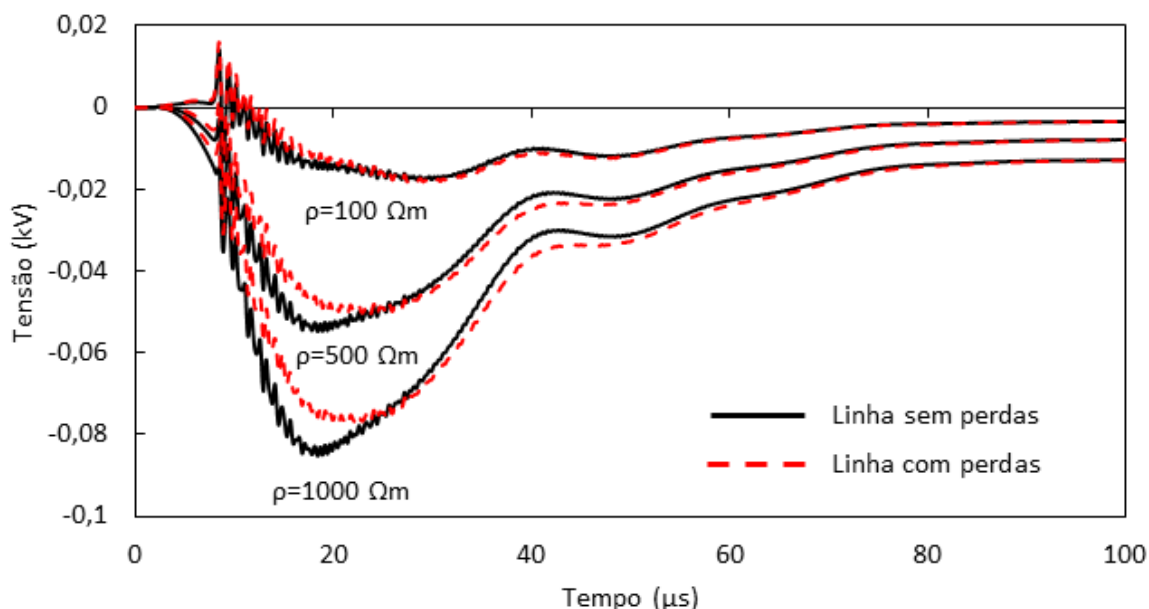
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 17 é mostrada a tensão induzida no poste 15, porém, assumindo que o ponto de incidência seja o ponto B e considerando, novamente, solo de $100 \Omega m$, $500 \Omega m$ e $1000 \Omega m$. Neste caso, observam-se várias oscilações nos instantes iniciais tanto para o caso de linha sem perdas quanto para linhas com perdas. Tais oscilações são provenientes das múltiplas reflexões que ocorrem em cada ponto de descontinuidades do circuito. Ao se considerar a influência do solo nos sinais que viajam na linha, as oscilações são atenuadas em razão das distorções e atenuações causadas pelo solo, isso justifica a redução na amplitude das oscilações calculadas. Além disso, as diferenças observadas na Figura 16 se mantém. Entretanto, quando o ponto de incidência se afasta do ponto de observação, diferenças também são observadas na forma de onda da cauda da tensão.

Em Rachidi et al., (1996) e Cooray (2009) é mostrado que para linhas cujo comprimento é inferior a 1 km a influência do solo no cálculo dos parâmetros da linha pode ser desprezada em estudos de tensão induzida. Porém, os resultados mostram que para solo cuja resistividade seja superior a $100 \Omega m$, em se tratando de redes contendo várias descontinuidades, tal afirmação deve ser vista com cautela mesmo

para circuitos relativamente pequenos. Contudo, mesmo para um circuito de tamanho reduzido, arbitrar solo sem perdas no cálculo dos sinais que viajam na linha pode conduzir a desvios na tensão induzida calculada.

Figura 17 – Tensão induzida no poste 15, circuito de média tensão, evento B.



Fonte: Autoria própria.

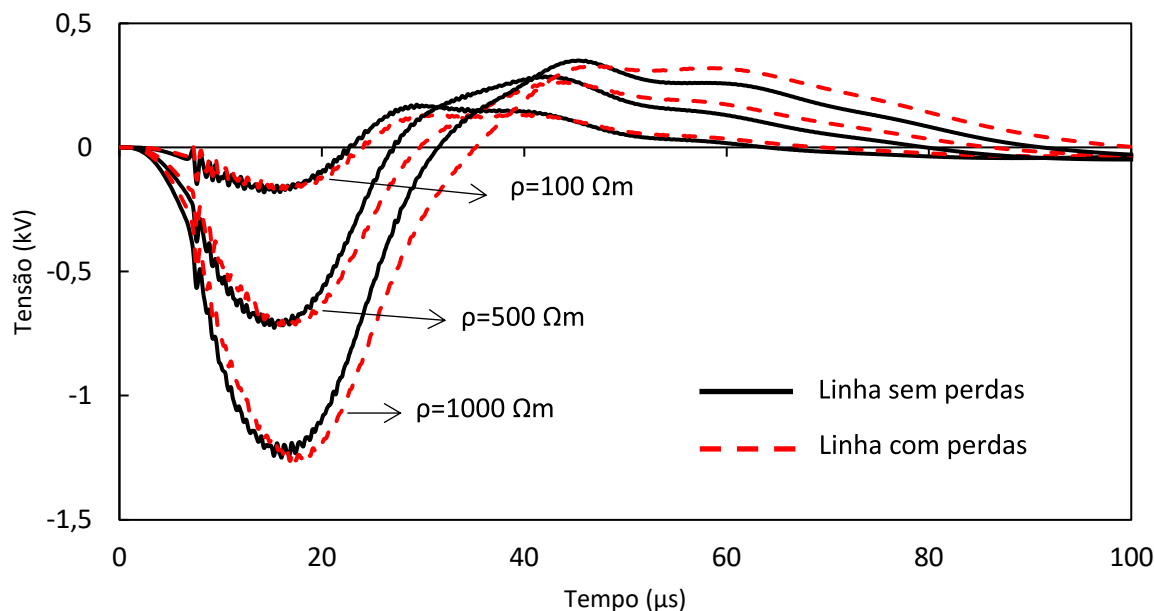
3.3.2 Circuito completo

As simulações realizadas no subitem 3.3.1 são novamente realizadas assumindo todo o circuito mostrado na Figura 7. O objetivo é avaliar o impacto da inclusão da rede de média tensão nas tensões induzidas observadas ao considerar a influência do solo no cálculo dos parâmetros da linha.

Como visto na Figura 18, que mostra as tensões induzidas calculadas no poste 15, as diferenças já observadas nos casos anteriores continuam presentes. Neste caso, percebe-se distorções em toda a forma de onda do sinal para o tempo considerado. Isso mostra que a inclusão da rede de baixa tensão no circuito, que aumenta o comprimento linear da rede, causa atenuações e distorções que modelos que assumem linha sem perdas não são capazes de reproduzir. Além disso, novos pontos de descontinuidades, como cargas, aterramentos e para-raios também são inseridos. Tais pontos introduzem novas reflexões nas tensões induzidas que viajam

de uma terminação a outra até que sejam totalmente atenuadas. Esse comportamento do sinal é similar ao aumento no comprimento dos segmentos de linha (LEAL, 2020).

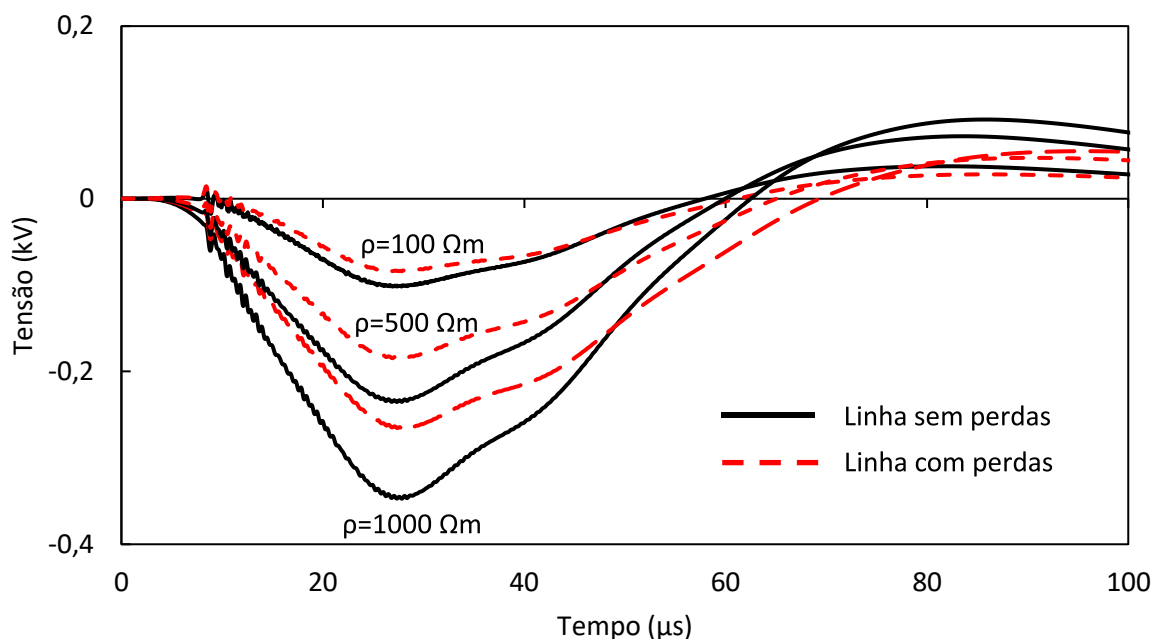
Figura 18 – Tensão induzida no poste 15, rede completa ligada, evento A.



Fonte: Autoria própria.

Nesta próxima análise, cujos resultados são ilustrados na Figura 19, o circuito completo permanece ligado, porém a descarga acontece no ponto B. Analisando, uma vez mais a tensão induzida calculada no poste 15 localizado na rede de baixa tensão a 466 m de distância do ponto de incidência, verifica-se que as diferenças na tensão induzida obtida assumindo linha sem perdas ocorrem mesmo para solos de baixa resistividade (a partir de $\rho = 100 \Omega\text{m}$). Isso pode ser justificado devido ao ponto B estar a uma distância maior em relação ao ponto de incidência da descarga, quando comparado ao caso mostrado na Figura 16. Logo o efeito distribuído ao longo dos condutores das linhas presente na rede, percebido na forma de tensão induzida que viajam ao longo da rede, é largamente atenuado e distorcido antes de incidir no poste 15.

Figura 19 – Tensão induzida no poste 15, rede completa ligada, evento B.



Fonte: Autoria própria.

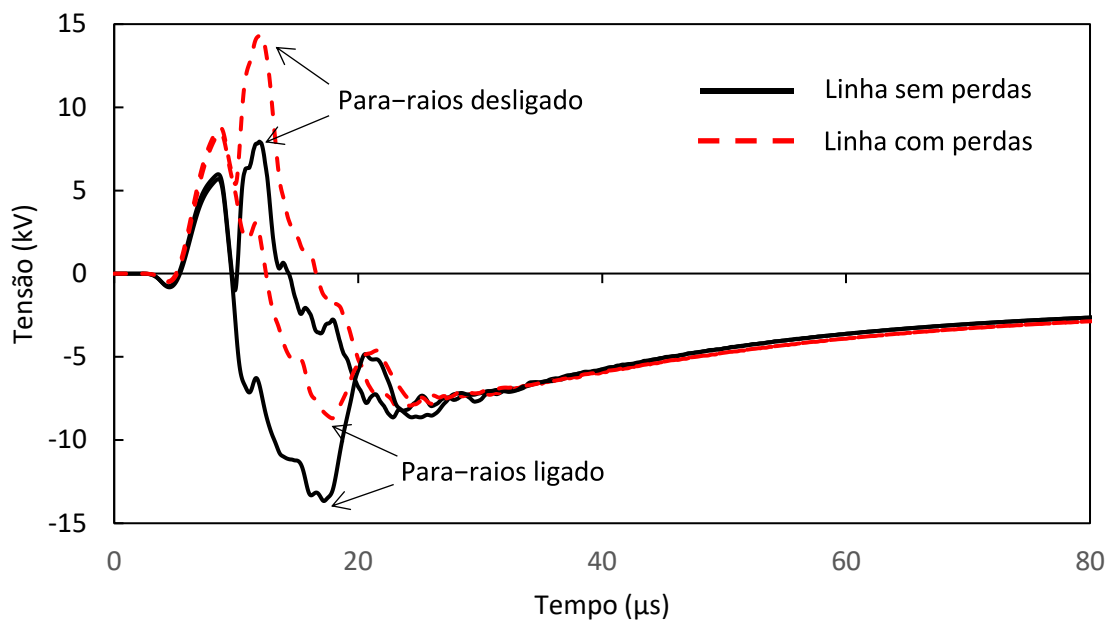
3.3.3 Análise de influência de para-raios

Neste último caso, a tensão induzida calculada no poste 12 (vide Figura 7) localizado a 703 m de incidência da descarga atmosférica (ponto B) é analisada. A configuração de rede completa é novamente utilizada assumindo todos os para-raios conectados (assim como na subseção 3.3.2) ou desprezando-se todos os raios, assumindo resistividade do solo de $\rho = 500 \Omega\text{m}$. A tensão de corte do para-raios utilizado é de 30 kV (DE CONTI et al., 2012).

A Figura 20 descreve a tensão induzida no poste 12. Percebe-se que a presença dos para-raios causa uma alteração no formato da curva. Isso pode ser atribuído ao fato de que os para-raios limitam a tensão em seus terminais a 30 kV. Ou seja, as diferenças entre a tensão induzida, observada no circuito com e sem para-raios, confirma a atuação de no mínimo um dispositivo na rede. A atuação do para-raios, além de limitar o nível máximo da tensão, introduz um novo ponto de descontinuidades. Observa-se também que, no caso da linha sem perdas, a sobretensão foi maior na presença dos dispositivos para-raios. Isso aponta que, neste caso, o uso de para-raios é prejudicial ao rigor da análise de tensão induzida. O oposto disso pode ser observado no caso da linha com perdas, pois o uso dos para-raios diminuiu os picos de tensão. A Figura 20 mostra também que os desvios acentuados

entre os resultados obtidos considerando ou desprezando a influência do solo nos sinais que viajam ao longo da linha continuam sendo observados. Portanto, assim como nos demais casos já discutido neste texto, assumir linha sem perdas não é suficientemente adequado para reproduzir os efeitos da influência do solo na tensão induzida calculada.

Figura 20 – Comparação de tensão induzida no poste 12 da média tensão entre para-raios ligados e desligados, evento B.



Fonte: Autoria própria.

4 CONCLUSÃO

4.1 Resultados do trabalho

Os estudos disponíveis na literatura relacionados a tensões induzidas por descargas atmosféricas mostram que é possível considerar solo condutor perfeito na representação das distorções e atenuações dos sinais que viajam nos condutores da linha (RACHIDI et al., 1996) (COORAY, 2009). Entretanto, segundo Paolone et al. (2005a) em redes contendo ramificações e vários pontos de descontinuidades assumir solo sem perdas pode conduzir a erros no cálculo da tensão induzida. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a análise das tensões induzidas por descargas atmosféricas considerando solo com perdas em uma rede de menos de 1 km de comprimento contendo ramificações, aterramentos, transformadores, cargas, para-raios etc.

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que, mesmo para uma rede de distribuição composta por linhas cujo comprimento é menor que 1 km, negligenciar a influência do solo nos sinais que se propagam nos condutores da linha pode resultar em desvios na forma de onda das tensões induzidas. Como esperado, observou-se que os desvios são maiores em solos de maior resistividade. Isso ocorre porque as atenuações e distorções são maiores em solo de maior resistividade. Os desvios são ainda mais evidentes, nas simulações cuja rede é protegida por para-raios, onde observou-se uma elevação no pico máximo de tensão de 7,5 kV para 14 kV ao assumir linha sem perdas. Por outro lado, ao incluir as perdas a efetiva proteção por para-raios é mais clara, haja vista que o pico máximo observado reduz de 14 kV para 8,5 kV.

Dessa forma, tem-se que para estudos de tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas em redes de distribuição com topologia complexa negligenciar o efeito do solo nos sinais que viajam nos condutores pode levar a desvios consideráveis quando comparados a modelos mais rigorosos.

4.2 Dificuldades encontradas

Durante a realização deste trabalho houveram diversas dificuldades. Algumas delas são listadas:

- ✓ Pouco conhecimento do *software* ATP haja vista que esse *software* não é utilizado ou estudado em nenhuma disciplina do curso.
- ✓ Dificuldade para implementar todo o circuito no *software* ATP. Como a rede possui muitos equipamentos, inclui-los se mostrou uma tarefa complexa mesmo sendo uma adaptação de uma rede disponível na literatura.
- ✓ Alto custo computacional de cada simulação. O custo computacional aumenta o tempo de processamento de cada simulação. Esse fato dificulta a validação e configuração adequada do circuito implementado.

4.3 Propostas de continuidade

Durante as pesquisas várias questões foram levantadas, mas nem todas foram abordadas devido ao tempo necessário para a conclusão do texto. Isso culminou em propostas de continuidade. As principais propostas de continuidade são:

- ✓ Incluir o efeito corona no cálculo dos parâmetros da linha;
- ✓ Incluir efeito da variação dos parâmetros do solo com a frequência;
- ✓ Simular rede de distribuição complexa composta por linhas de distribuição compacta;
- ✓ Considerar a formação de arco elétrico nos pontos em que há a ruptura da isolação;
- ✓ Realizar estudos estatísticos para confirmar a generalidade dos resultados frente a diferentes descargas atmosféricas;

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, A. K.; PRICE, H. J.; GURBAXANI, S. H., **Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. EMC-22, n. 2, p. 119–129, 1980.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O., **Fundamentals of Electric Circuits**. 6. ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2007.
- ANDERSON, R. B.; ERIKSSON, A. J., **Lightning Parameters for Engineering Application**. Electra, Nº 69, p. 65-102, Março, 1980.
- ANDREOTTI, A.; MARTINIS, U. D.; MAFFUCCI, A.; MIANO, G., **A mixed frequency and time domain approach for accurate evaluation of the dynamics of lemp-excited lossy multiconductor power lines**. Electrical Engineering, v. 83, n. 3, p. 147–155, 2001.
- ANDREOTTI, A.; PIERNO, A.; RAKOV, V. A., **A New Tool for Calculation of Lightning-Induced Voltages in Power Systems—Part I: Development of Circuit Model**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 326-333, Fevereiro, 2015.
- ATP, **Alternative Transients Program**, 2022. [Online]. Available: www.eeug.org
- BANNISTER, P. R., **Extension of finitely conducting earth-image-theory results to any range**. New London: Naval Underwater systems center, 1984.
- BAÑUELOS-CABRAL, E.; GUTIÉRREZ-ROBLES, J; GARCIA-SÁNCHEZ, J. SOTELO-CASTAÑÓN, J.; GALVÁN-SÁNCHEZ, V. (2019). **Accuracy enhancement of the JMarti model by using real poles through vector fitting**. Electrical Engineering. 101, 2019.
- BARBOSA, C. F.; PAULINO, J. O. S., **An approximate time-domain formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 49, n. 3, p. 593–601, 2007.
- BARBOSA, C. F., **Campos eletromagnéticos produzidos por descargas atmosféricas: uma abordagem analítica no domínio do tempo**. Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Maio, 2009.

BASSI, W.; BURANI, G. F.; JANISZEWSKI, J. M., **Impedance Frequency Characteristics and Modeling of Residential Appliances for Lightning Transient Analysis**. Proceedings of VIII SIPDA - International Symposium on Lightning Protection, p. 495-498, São Paulo, Brasil, Novembro, 2005.

BICHELS, A., **Sistemas Elétricos de Potência: métodos de análise e solução**. Curitiba: EDUTFPR, 2018.

BODE, H. W., **Network Analysis and Feedback Amplifier Design**. Van Nostrand, Princeton, 1945.

BRAFINSKII, S. I., **Theory of the development of a spark channel**, Sov. Phys. – JETP 34, 7,1068, 1958.

BRASIL. **Lei n. 14.052**, de 08 de Setembro de 2020.

BRIGNONE, M.; MESTRINER, D.; PROCOPIO, R.; DELFINO, F., **A review on the return stroke engineering models attenuation function: Proposed expressions, validation and identification methods**. Electric Power Systems Research, 2019.

CARVALHO, J. F., **Energia e sociedade**. Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

COORAY, V., **The lightning flash**. 2. ed. London: Institution of Engineering and Technology, 2003.

COORAY, V., **Propagation effects due to finitely conducting ground on lightning generated magnetic fields evaluated using Sommerfeld's integrals**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 51, n. 3 PART 1, p. 526–531, 2009.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL), **Manual de Instruções Técnicas – Aterramento de Redes de Distribuição**. 2019.

DE CAMPOS, A. F. M., **Cálculo de sobretensões causadas por descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição aéreas considerando falhas de isolamento**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

DE CONTI, A., **Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

DE CONTI, A.; VISACRO, S., **Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 49, n. 2, p. 448–451, 2007.

DE CONTI, A.; CAMPOS, F. M.; SILVEIRA, F. H.; LIMA, J. L. C.; COSTA, S. E., **Calculation of lightning flashovers on distribution lines**. 2011 International Symposium on Lightning Protection, pp. 205-210, 2011.

DE CONTI, A. R.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. F., **Lightning overvoltages on complex low-voltage distribution networks**. Electric Power Systems Research, v. 85, p. 7–15, 2012.

DE CONTI, A. R.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S., **On the role of transformer grounding and surge arresters on protecting loads from lightning-induced voltages in complex distribution networks**. International Conference on Lightning (ICLP), Vienna, Austria, 2012.

DE CONTI, A. R.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.; CARDOSO, T. C. M., **A review of return-stroke models based on transmission line theory**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 136, p. 52–60, 2015.

DE CONTI, A.; EMÍDIO, M. P. S., **Extension of a modal-domain transmission line model to include frequency-dependent ground parameters**. Electric Power Systems Research, v. 138, p. 120–130, 2016.

DE CONTI, A. R.; LEAL, O. E. S., **Time-Domain Procedures for Lightning-Induced Voltage Calculation in Electromagnetic Transient Simulators**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 36. No.1, 2021a.

EEUG., **European EMTP-ATP Users Group e.v.** Disponível em: <<https://www.eeug.org/>>. Acesso em: 20 de Julho de 2022.

EMTP, **Electromagnetic Transients Program**, 2022. [Online]. Available: www.emtp.com

FERREIRA, I. A.; DAMASCENO DA NOBREGA, D., **Confiabilidade de sistemas no setor elétrico: estudo de caso envolvendo ocorrências de queimadas em linhas de transmissões**. XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Joinville, 2017.

GHAREHPETIAN, G. B.; MOHSENI, H.; MOLLER, K., **Hybrid modelling of inhomogeneous transformer winding for very fast transient overvoltage studies**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 1, pp. 157-163, Jan. 1998

HØIDALEN, H. K., **Lightning-Induced Voltages in Low-Voltage Systems and its Dependency on Voltage Line Terminations**. Proceedings of 24th ICLP - International Conference on Lightning Protection, Birmingham, Inglaterra, p. 287-292, 1998.

HØIDALEN, H. K., **Calculation of lightning-induced voltages in models including lossy ground effects**. Proc. Int. Conf. Power Syst. Transients, Nova Orleans, Estados Unidos da América, pp. 1–6., 2003.

IEEE WORKING GROUP 3.4.11., **IEEE guide for modeling of metal oxide surge arresters**. Transactions on Power Delivery, Vol. 7 No.1, Janeiro, 1992.

INSTITUTO ACENDE BRASIL. **Qualidade do fornecimento de energia elétrica: confiabilidade, conformidade e prestação**. WHITE PAPER, 2014.

LEAL, O. E. S., **Modelos no domínio do tempo para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

LEAL, O. E. S.; DE CONTI, A. R., **Evaluation of the extended modal-domain model in the calculation of lightning-induced voltages on parallel and double-circuit distribution line configurations**. Electric Power Systems Research, Volume 194, 107100, ISSN 0378-7796, 2021b.

LIU, X.; FAN, G.; LIANG, G.; WANG, L., **Calculation of lightning induced overvoltages on overhead lines: model and interface with Matlab/Simulink**. IEEE Access, v. 6, p. 47308–47318, 2018.

MARROQUES, L. S., **Modeling and positioning of surge arresters at underground networks of wind farms connected to overhead networks using the ATP**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

MARTI, J. R., **Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-101, n. 1, p. 147–157, 1982.

MARTINS, C., **Fluxo de carga em redes de distribuição operando em emergência**. Dissertação (Pós Graduação) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

MASLOSWKI, G.; RAKOV, V. A., **A new formulation for lightning return-stroke models of engineering type**. 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 175-178, 2007.

MATHWORKS, Inc. **MATLAB: the Language of Technical Computing: Computation, Visualization, Programming: Installation Guide for UNIX Version 5**. Natwick: Math Works Inc., 1996.

MORCHED, A.; GUSTAVSEN, B.; TARTIBI, M., **A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 14, n. 3, p. 1032–1038, 1999.

NORTON, K. A., **The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere**. Proceedings of the Institute of Radio Engineers. v. 24, n. 0731-5996, p. 1367–1387, 1936.

NUCCI, C. A.; MAZZETTI, C.; RACHIDI, F.; IANOZ, M., **On lightning return stroke models for LEMP calculations**. 19th International Conference on Lightning Protection, 1988.

NUCCI, C. A.; DIENDORFER, G.; UMAN, M. A.; RACHIDI, F.; IANOZ, M.; MAZZETTI, C., **Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 95(D12), 1990.

PAOLONE, M. **Modeling of lightning-induced voltages on distribution networks for the solution of power quality problems**. Bologna: PhD Thesis, University of Bologna Department of Electrical Engineering XIV course, 2001.

PAOLONE, M.; PEREZ, E.; BORGHETTI, A.; NUCCI, C., **Comparison of two computational programs for the calculation of lightning-induced voltages on distribution systems**. International Conference on Power Systems (IPST), 2005a.

PAOLONE, M.; PETRACHE, E.; RACHIDI, F.; NUCCI, C. A.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; SCHOENE, J., **Lightning induced disturbances in buried cables-part II: experiment and model validation**. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 47(3), 509-520, 2005b.

PAOLONE, M.; RACHIDI, F.; BORGHETTI, A.; NUCCI, C. A.; RUBINSTEIN, M.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A., **Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: Theory, numerical simulations, and experimental validation**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 51(3), 532-547, 2009.

PAUL, C. R., **Frequency response of multiconductor transmission lines illuminated by an electromagnetic field**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 18, n. 4, p. 183-190, 1976.

PERGENTINO, L. A., **Avaliação do Impacto de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição a Partir de Medidas em Campo**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

PIANTINI, A., **Tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas em linhas aéreas, rurais e urbanas, considerando diferentes métodos de proteção – modelagens teórica e experimental e aplicação ao cálculo de interrupções.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo Fevereiro, 1997.

PIANTINI, A.; MALAGODI, C. V., **Voltage surges transferred to the secondary of distribution transformers.** In 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering (Vol. 1, pp. 365-368). IET, Agosto, 1999.

PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M.; BORGHETTI, A.; NUCCI, C. A.; PAOLONE, M., **A scale model for the study of the LEMP response of complex power distribution networks.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, p. 710-720, 2007.

PIANTINI, A., **Lightning interaction with low-voltage overhead power distribution networks.** Lightning interaction with power systems, 2, 173-226, 2020.

PODGOSRKI, A. S.; LANDT, J. A., **Three Dimensional Time Domain Modelling of Lightning.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 2, no. 3, pp. 931-938, Julho, 1987.

PRICE, G. H.; PIERCE, E. T., **The modeling of channel current in the lightning return stroke.** Radio Science, vol. 12, no. 3, pp. 381-388, Junho, 1977.

RACHIDI, F.; NUCCI, C. A.; IANOZ, M.; MAZZETTI, C., **Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines.** IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 38, n. 3, p. 250–264, 1996.

RACHIDI, F.; NUCCI, C. A.; IANOZ, M., **Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 1, p. 294–302, 1999.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A., **Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application.** IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 40, n. 4, p. 403–426, 1998.

RAKOV, V. A., **Transient response of a tall object to lightning.** IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 43(4), 654-661, 2001.

RAMELI, N.; AB-KADIR, M. Z. A.; IZADI, M.; GOMES, C.; AZIS, N., **Effect of soil resistivity on magnetic field in the case of lightning strike to a tall structure.** 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 1-6, 2016.

RUSCK, S., **Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks.** [s.l.] Royal Inst. Technol., 1957.

SALARI FILHO, J. C., **Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Freqüência**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SEKIOKA, S., **An equivalent circuit for analysis of lightning-induced voltages on multiconductor system using an analytical expression**. Proc. Int. Conf. Power Syst. Transients, Montreal, PQ, Canada, pp. 1–6, 2005.

SILVA NETO, A., **Tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes de distribuição de baixa tensão**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TAYLOR, C.; SATTERWHITE, R.; HARRISON, C., **The response of a terminated two wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 13, n. 6, p. 987–989, 1965.

TRAN-ANH, T.; AURIOL, P.; TRAN-QUOC, T., **High frequency power transformer modeling for Power Line Communication applications**. 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 1069-1074, 2006

TRONCHONI, A. B. **Identificação de Causa de Desligamentos Não Programados em Redes de Distribuição**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

UMAN, M.A., **Lightning**. Dover books on earth sciences. McGraw-Hill, 264p. Minnesota, 1968.

UMAN, M.A.; MCLAIN, D.K., **Magnetic field of the lightning return stroke**. Journal of Geophysical Research, v. 74, n. 28, p. 6899-6910, 1969.

VISACRO, S. F., **Aterramentos elétricos**. 1. ed. São Paulo: Artiliber Editora Ltda, 2002.

VISACRO, S. F., **Descargas atmosféricas: Uma abordagem de engenharia**. 1. ed. São Paulo: Artiliber Editora Ltda, 2005.

WAGNER, C. F.; MCCANN, G. D., **Induced Voltage on Transmission Lines**. AIEE. Trans., Vol. 61, pp. 916-930, 1942.

WANG, D.; TAKAGI, N.; GAMEROTA, W. R.; UMAN, M. A.; JORDAN, D. M., **Lightning attachment processes of three natural lightning discharges**. Canadian Journal of Physics, v. 120, p. 10637–10644, 2015.

XÉMARD, A.; BARATON, P.; BOUTET, F., **Modelling with EMTP of overhead lines illuminated by an external electromagnetic field.** International Conference on Power Systems Transients (IPST), 1995.

YEE, K. S., **Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 14, n. 3, p. 302–307, 1966.