

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SOBRETENSÕES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO  
DECORRENTES DA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS  
EM TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

MARCELO DE ALMEIDA FELIPE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SOBRETENSÕES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO  
DECORRENTES DA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS  
EM TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

MARCELO DE ALMEIDA FELIPE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência  
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

**Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho**  
**Coorientador: Peterson de Resende**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEE  
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – CPDEE  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG  
BELO HORIZONTE  
DEZEMBRO – 2007

---

## AGRADECIMENTOS

Não há outra maneira de iniciar essa dissertação do que agradecendo a todos que me apoiaram durante o período do mestrado. Jamais suportaria as longas horas de estudos, pesquisas e revisões sem a ajuda e incentivo daqueles que estiveram ao meu lado. Esses, sim, terão sempre meu reconhecimento.

Primeiramente devo tudo a Deus, agradeço-O pelo que sou e pela Sua eterna presença em minha vida.

Ao professor Silvério Visacro Filho, que me orientou não somente nesse trabalho, como em boa parte de minha formação, agradeço pelo suporte financeiro e intelectual, além do exemplo de postura profissional. Consegui concluir essa dissertação graças às conversas amigas que tivemos.

À minha família, pela forma que me guiaram até o presente dia; sei que não é fácil educar alguém. Agradeço aos meus pais, Carlos Felipe e Angela Rosa, pois me colocaram como prioridade em suas vidas, o que permitiu meu crescimento. Espero um dia retribuir. Aos meus irmãos, Bruno e Carlos Rafael, obrigado pela atenção e carinho que sempre me dispensaram. Se alguém quer o meu melhor, com certeza são vocês!

Aos companheiros de LRC: Cláudia Mesquita, Rosilene Dias, Alisson Ladeira, Guilherme Murici, Fabrício Chaves, Alberto de Conti, Antônia Navarro, Werveson Rocha e Walmir, com alguns de vocês estou junto a mais de seis anos, enfrentando dificuldades e tendo alegrias.

Aos meu amigos, Fernando Silveira, Renato Zica, Fuad Almeida, Adelino Pinheiro, Luiz Mariano, Fábio Henrique, Paulo César, Bruno Araújo, Paulo Rafael, Luís Fernando, Joseane e Thiago Bernadinho, Fernando e Nívia, Guilherme e Kénia, Laura, agradeço os bons momentos que passamos juntos, os tenho como minha família, precisarei sempre de vocês.

Aos amigos da Polícia Civil e do CEFET, especialmente aos mais próximos, meu muito obrigado pelo período que passamos juntos e aos que ainda viveremos.

“Quem me vê sempre parado, distante  
Garante que eu não sei sambar  
Tô me guardando pra quando o carnaval chegar...  
...E quem me vê apanhando da vida duvida que eu vá revidar  
Tô me guardando pra quando o carnaval chegar”

**Quando o carnaval chegar (1972) – Chico Buarque de Hollanda**

Dedico este trabalho aos meus  
queridos pais, Carlos Felipe e  
Angela Rosa, e aos meus irmãos,  
Bruno Felipe e Carlos Rafael.

---

# SUMÁRIO

1. <u>Introdução</u>	1
1.1. Relevância da investigação .....	1
1.2. Objetivo .....	3
1.3. Organização do texto .....	3
2. <u>Efeito da presença de torres de telecomunicações em regiões próximas: considerações preliminares</u>	5
2.1. Introdução .....	5
2.2. Influência quanto à incidência de descargas – Distribuição de descargas.....	6
2.2.1. Influência quanto ao perfil de distribuição de descargas na região ....	7
2.2.2. Utilização do modelo eletrogeométrico .....	11
2.3. Proteção das imediações da torre quanto à descarga atmosférica direta. ....	14
2.4. Influência quanto à forma da tensão induzida e à elevação de potencial nas redondezas da torre .....	17
2.5. Comentário finais .....	18
3. <u>Caracterização das descargas atmosféricas nuvem-solo</u> .....	19
3.1. Introdução.....	19
3.2. Tipificação das descargas atmosféricas .....	20
3.2.1. Processo de formação da descarga única / primeira.....	21
3.2.2. Processo de formação das descargas subseqüentes.....	22
3.2.3. Diferenciação das descargas Positivas e das Negativas.....	23
3.3. Parâmetros de interesse das Descargas Atmosféricas.....	23
3.3.1. Parâmetros da descarga negativa descendente única ou primeira ....	24
3.3.1.1. Amplitude da corrente de descarga .....	24
3.3.1.2. Tempo de frente da onda de corrente da descarga atmosférica ..	25
3.3.1.3. Tempo de meia onda da corrente de descarga atmosférica .....	26
3.3.2. Parâmetros das descargas negativas subseqüentes .....	27

---

3.3.2.1.	Introdução.....	27
3.3.2.2.	Amplitude das descargas subseqüentes.....	27
3.3.2.3.	Tempo de frente de onda da descarga subseqüente.....	27
3.3.2.4.	Tempo de meia onda da descarga subseqüente.....	28
4.	<u>Representação do sistema e a dinâmica das sobretensões nas redes de distribuição próximas à torre atingida.....</u>	<u>29</u>
4.1.	Introdução.....	29
4.2.	Modelo para cálculo - HEM.....	30
4.3.	Configuração típica da estação de telecomunicações (estação rádio-base).....	35
4.3.1.	Considerações gerais .....	35
4.3.2.	A torre de telecomunicações.....	38
4.3.3.	O aterramento elétrico da estação.....	38
4.4.	Representação da rede de distribuição simulada.....	39
4.5.	Processo de incidência e a propagação das ondas de corrente elétrica e tensão no sistema da estação, no solo e na estrutura da rede.....	40
4.5.1.	Modelagem da onda de corrente.....	41
4.5.2.	Composição da sobretensão resultante no sistema elétrico.....	43
5.	<u>Metodologia, Resultados e Análises.....</u>	<u>46</u>
5.1	Introdução.....	46
5.2	Descrição das simulações realizadas.....	47
5.2.1.	Simulação do comportamento do aterramento da torre de telecomunicações.....	47
5.2.2.	Simulação do efeito da tensão induzida.....	48
5.2.3.	Simulação da rede de distribuição com dois condutores.....	49
5.3	Resultados.....	54
5.3.1.	Comportamento do aterramento da estação.....	55
5.3.2.	Avaliação preliminar da tensão induzida num condutor horizontal único, por uma corrente fluindo por um canal vertical, a partir de sua base .....	57
5.3.3.	Sobretensão em uma rede de distribuição de dois condutores com carga.....	60

---

5.3.4.	Sobretensão em uma rede de distribuição sem carga com dois condutores, com o neutro conectado ao aterramento da torre.....	64
5.3.5.	Sobretensão em uma rede de distribuição sem carga com dois condutores. ....	66
5.3.6.	Sobretensão em uma rede de distribuição com dois condutores distanciados de 50 m da torre de telecomunicações.....	70
5.3.7.	Sobretensão em uma rede de distribuição com dois condutores com o ponto de attachment a 300 m de altura.....	71
5.3.8.	Sobretensão em uma rede de distribuição de 340 m com dois condutores.....	74
5.3.9.	Sobretensão em uma rede de distribuição separando o efeito da tensão causada pela conduzida no solo da induzida.....	76
5.3.9.1.	Sobretensões na fase de uma rede de distribuição com dois condutores, sem carga entre eles.....	76
5.3.9.2.	Sobretensão em uma rede de distribuição com dois condutores, com carga entre eles.....	77
5.3.9.3.	Sobretensão em uma rede de distribuição com dois condutores distanciada de 50 m de uma torre de telecomunicações.....	78
5.3.9.4.	Sobretensão em uma rede de distribuição com dois condutores com o ponto de attachment a 300 m de altura.....	79
5.3.9.5.	Sobretensão em uma rede de distribuição de 340 m com dois condutores .....	80
5.4	Comentários finais.....	81
6.	<u>Conclusões e proposta de continuidade.....</u>	<u>83</u>
6.1	Introdução.....	83
6.2	Conclusão.....	84
6.3	Proposta de continuidade.....	86
7.	<u>Referências Bibliográficas.....</u>	<u>87</u>

---

## RESUMO

A presença de estações rádio-base, também conhecidas como de telecomunicações, tem se tornado cada vez mais freqüente em meios urbanos. Tais estruturas estão instaladas próximas às redes de distribuição de energia elétrica. Normalmente, as estações de telecomunicações possuem torres ou postes elevados, nas quais são fixadas as antenas para a transmissão e a recepção de dados. Como se sabe, estruturas elevadas são pontos preferenciais para a ocorrência de Descargas Atmosféricas que são as principais causas de danos nos sistemas elétricos.

O quadro descrito motivou a realização de uma pesquisa que possui como tema as “sobretensões em redes de distribuição decorrentes da incidência de descargas atmosféricas em torres de telecomunicações”.

Nesse contexto, insere-se a presente dissertação de mestrado, que tem como objetivos principais (1) a investigação das sobretensões resultantes nos sistemas de distribuição junto à estação de rádio-base e às cargas consumidoras próximas, em decorrência da incidência de descargas na torre, e (2) a avaliação dos diversos fatores que afetam a amplitude e a forma das solicitações eletromagnéticas.

Foram realizadas simulações sistemáticas de casos que representam uma rede de distribuição próxima de uma estação de telecomunicações. Na torre foram aplicadas ondas de corrente modelando descargas atmosféricas, e registraram-se os valores de sobretensão na rede. Nas simulações foi empregado um elaborado modelo computacional, designado HEM – Hybrid Electromagnetic Model.

Os resultados encontrados permitiram uma análise da influência dos parâmetros de maior relevância nas sobretensões em redes de distribuição, separando as parcelas relativas à tensão induzida e à elevação de potencial gerada pelo fluxo de corrente pelo solo. Os resultados levaram, também, a conclusões acerca da severidade destas sobretensões desenvolvidas, mostrando que estas podem gerar desligamentos nos sistemas de distribuição e danos para as cargas consumidoras.

---

## ABSTRACT

The number of radio-base telecommunication stations has been increasing significantly in urban areas. These stations are installed next to electric supplying distribution systems and always include elevated structures such as their towers or poles. These structures are frequently stricken by lightning, which is a major cause of damage to electric systems.

This picture described above motivated this research entitled “lightning overvoltage in distribution line next to telecommunication towers”.

In this context, this thesis was developed with the following objectives: (1) to investigate overvoltage resulting from lightning strikes to the tower in the distribution systems next to telecommunication station and in the loads of nearby consumers and (2) to evaluate the role played by the many factors that affect the amplitude and shape of such overvoltage.

Strikes to the tower with representative lightning current waves were simulated systematically in order to evaluate the corresponding overvoltage developed at the distribution line close to the communication tower. An elaborate computational model – HEM (Hybrid Electromagnetic Model) was used to perform the simulations.

The results revealed the influence of the most relevant parameters on the overvoltage developed at distribution lines, allowing separating the parcels associated to the induced voltage and to the grounding potential rise due to the current flow to the soil. The developments led to some relevant conclusions about the severity of such overvoltage that confirmed it as a potential source of distribution-system outages and of damages to the consumers' loads.

---

# 1 Introdução

## *1.1 – Relevância da investigação*

Os sistemas elétricos de potência e os de telecomunicações são muito sensíveis aos efeitos das descargas atmosféricas, constituindo-se na principal fonte de desligamentos e de danos.

As descargas atmosféricas atuam nestes sistemas basicamente de três formas: por meio das descargas diretas, das tensões induzidas por descargas próximas e por correntes elétricas conduzidas para o sistema por meio dos aterramentos.

---

As descargas diretas são as que causam efeitos mais severos por injetarem no sistema correntes de valores muito elevados. Entretanto, seu efeito é usualmente localizado, abrangendo principalmente o ponto de incidência e a região próxima a este. Já as tensões induzidas por descargas próximas correspondem a menores valores de sobretensão na rede se comparadas com aquelas provenientes de descargas diretas, apresentando, contudo, uma frequência muito maior de ocorrência (Visacro et al., 2003b).

Outro efeito relevante é o da elevação de potencial gerado pelas correntes conduzidas no solo por meio dos aterramentos elétricos. Essas correntes circulam por estruturas metálicas, pelo solo ou por qualquer outro meio de ligação entre o ponto de incidência da descarga e o elemento que está sendo afetado.

Neste trabalho, são considerados os efeitos em sistemas de distribuição de energia da incidência de descargas atmosféricas próximas, mais especificamente os efeitos da incidência em torres de telecomunicações posicionadas em estações de rádio-base. Nesse caso, os efeitos predominantes são a tensão induzida na rede pela corrente que flui no canal e na torre, e a elevação de potencial gerada pelas correntes injetadas no solo por meio da torre e dos aterramentos da estação (Visacro, 2005c).

Como as torres de telecomunicações constituem-se em pontos preferenciais de incidência de descargas atmosféricas, elas são responsáveis pelo aumento dos surtos de sobretensões observados nos sistemas de distribuição próximos e nos consumidores alimentados por estes. Tais surtos comprometem a qualidade da energia elétrica e são responsáveis por danos em diversos tipos de equipamentos, implicando em despesas para concessionárias e consumidores. Em Visacro et al. (2003a), foram apresentadas as formas de influência das descargas atmosféricas em sistemas de baixa tensão, bem como algumas formas de proteção contra tal fenômeno.

Neste contexto, para definir o tipo de proteção contra descargas e seu dimensionamento para posteriormente aplicá-lo em diversos tipos de sistemas, mostra-se necessário o conhecimento dos parâmetros mais relevantes deste fenômeno e a forma com que esses variam por região. Por meio do conhecimento de parâmetros como o da amplitude, dos tempos da onda impulsiva, da densidade de descargas locais e dos

---

---

períodos críticos de ocorrência, podem-se determinar a intensidade e a probabilidade de ocorrência de surtos por tensão induzida e por descarga direta (Visacro et al., 2002).

Tal aspecto confere relevância à investigação em foco deste trabalho que pretende avaliar os níveis destas solicitações e os parâmetros que nela influenciam.

## ***1.2 – Objetivo***

O objetivo fundamental deste trabalho consiste na investigação das sobretensões resultantes nos sistemas de distribuição junto à estação rádio-base e nas cargas consumidoras próximas em decorrência da incidência de descargas.

Por meio de simulação computacional utilizando o modelo para cálculo HEM (Visacro e Soares, 2005b), análises de sensibilidade foram desenvolvidas para avaliar o efeito de diversos fatores na sobretensão resultante no sistema elétrico. Tais avaliações proporcionam elementos consistentes para a identificação de ações mitigadoras contra esse tipo de solicitações.

## ***1.3 - Organização do texto***

O texto desta dissertação é dividido em 7 capítulos, iniciando com a presente **Introdução**.

No **Capítulo 2**, *“Efeito da presença de torres de telecomunicações em regiões próximas: considerações preliminares”*, é realizada uma análise do efeito da inserção de uma torre de telecomunicações em uma região, avaliando aspectos como raio de atração e perfil de incidência de descargas atmosféricas, tanto na estação rádio-base, quanto na região circunvizinha.

O **Capítulo 3**, *“Caracterização das descargas atmosféricas nuvem-solo”*, apresenta os tipos de descargas atmosféricas nuvem-solo, mostrando os parâmetros de

---

---

maior influência na tensão induzida em linhas de transmissão e em redes de distribuição de energia.

No **Capítulo 4**, “*Representação do sistema e a dinâmica das sobretensões nas redes de distribuição próximas à torre atingida*”, são mostradas a configuração da estação rádio-base que é utilizada neste trabalho e uma modelagem da forma de propagação das ondas de corrente de descarga no canal. Nesse capítulo, também há o modelo de cálculo utilizado para realizar as simulações

O **Capítulo 5**, “*Metodologia, Resultados e Análises*”, descreve de forma detalhada as configurações utilizadas e mostra os resultados obtidos durante o trabalho de simulação computacional.

As conclusões finais desta dissertação de mestrado, decorrentes dos resultados e análises realizados nos capítulos 2 e 5, assim como os possíveis desdobramentos relativos às propostas de continuidade, são apresentadas no **Capítulo 6**, “*Conclusão e Proposta de Continuidade*”.

E, para finalizar, o **Capítulo 7** contém as “*Referências Bibliográficas*” utilizadas durante a realização deste texto.

---

# **2**

## **Efeito da Presença de Torres de Telecomunicações em Regiões Próximas: Considerações Preliminares**

### ***2.1 – Introdução***

No que concerne às descargas atmosféricas, a presença de torres elevadas numa região influencia a área adjacente, segundo duas perspectivas.

Primeiramente, a presença da torre afeta a distribuição da incidência direta de descargas na região próxima, tendendo a concentrar a incidência de descargas. Isso ocorre devido ao efeito da atração que a torre ou canais ascendentes que nela se iniciam exercem em eventuais canais descendentes que se aproximam do solo na região.

Outro efeito relevante da presença da torre de telecomunicação em uma região é proveniente do fluxo da corrente de descarga incidente na torre, que promove elevação do potencial no solo no entorno de sua base. Esta é capaz de causar a injeção de corrente nos sistemas de distribuição que alimentam a torre e nos consumidores próximos, por meio dos respectivos eletrodos de aterramento colocados no solo.

Nos próximos itens deste capítulo, apresenta-se uma avaliação prospectiva desses efeitos citados nos dois parágrafos anteriores.

## ***2.2 – Influência quanto à incidência de descargas – Distribuição de descargas***

A inserção de uma torre de telecomunicação em uma região altera a distribuição de incidência de descargas atmosféricas nessa área, uma vez que a torre se apresenta como um ponto de destaque (ponto elevado) em relação ao terreno circunvizinho. A rede de distribuição, com a inserção da torre de telecomunicação próxima, passa a ser uma região com um ponto crítico de desempenho. A instalação dessa torre altera não só o perfil das distribuições de amplitude de corrente das descargas atmosféricas, como também a densidade de ocorrência de descargas na região que engloba a torre. Dias et al. (2004) e (2005) apresentam uma série de dados práticos, obtidos pelo Sistema de Localização de Descargas (LLS<sup>1</sup> - CEMIG) (Mesquita, 2001), que comprovam o aumento da densidade de descargas atmosféricas em locais de relevo mais acidentado (com picos elevados) em relação aos terrenos adjacentes.

---

<sup>1</sup> LLS Sistema de Localização de Descargas, derivado do inglês, *Lightning Location System*.

---

### 2.2.1 – Influência quanto ao perfil de distribuição de descargas na região

Visacro (2005a) apresenta a filosofia de proteção contra incidência de descargas atmosféricas através de *captos tipo Franklin*<sup>2</sup> cuja proteção se baseia em uma angulação em relação à haste vertical, como demonstrado na Figura 2.1 e na Figura 2.2. Esse método de cálculo é conhecido como “Filosofia Franklin”.

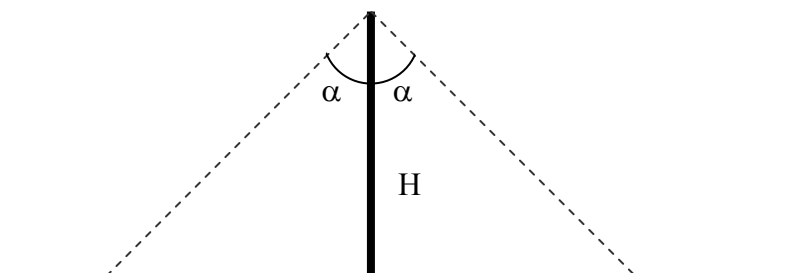


Figura 2.1: Representação do ângulo de proteção ( $\alpha$ ) da haste vertical de altura H.

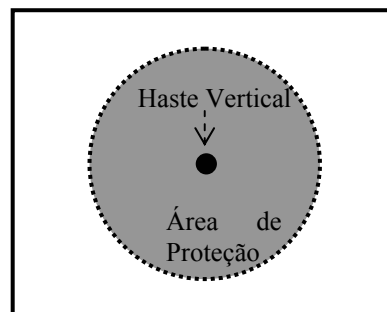


Figura 2.2: Visão superior da área protegida em torno da haste vertical.

A altura da torre (H) e o ângulo de proteção ( $\alpha$ ) da torre determinam a área de proteção contra descargas atmosféricas. O valor de  $\alpha$  depende do perfil do relevo da região e do grau de conservadorismo a ser aplicado. Quanto menor o valor de  $\alpha$  maior a probabilidade de uma descarga que incidiria na região atingir a haste. Na literatura

<sup>2</sup> Captos tipo Franklin: São hastes verticais metálicas de destaque em relação ao terreno adjacente, que se mostram como pontos de maior probabilidade de incidência de descarga.

encontram-se valores de  $\alpha$  entre  $25^\circ$  e  $55^\circ$  (ABNT NBR 5419, 2001) para estruturas não elevadas (alturas inferiores à 20 m).

Eriksson (1987) propôs uma forma analítica para cálculo de raio de atração<sup>3</sup> aplicável para descargas elétricas de intensidade de até 200 kA e torres de até 500 m de altura. Essas condições englobam a configuração utilizada nessa dissertação como padrão de torre de telecomunicações, que é de 50 m de altura, como será descrito no capítulo 4.

A equação (2.1) representa a fórmula analítica de Eriksson.

$$R_a = H^{(0,66+2I_p \times 10^{-4})} \times I_p^{0,64} \quad (2.1)$$

Nessa fórmula, “H” é a altura da torre (em metros) e “I<sub>p</sub>” é o pico da corrente de descarga (em kA). Logo o raio de atração é calculado para cada valor de pico de corrente. Neste trabalho utilizam-se correntes de 1 kA até 250 kA, valores esses que abrangem a grande maioria das descargas atmosféricas encontradas nas referências. Sabe-se que valores de corrente próximos ao limite superior (250 kA) são muito improváveis, e essa ponderação é inserida na distribuição lognormal de correntes de descarga descrita a seguir nesse tópico.

A definição de raio de atração proposta por Eriksson determina uma região esférica com centro no topo da torre e de raio igual ao raio de atração, na qual as descargas atmosféricas que, na ausência da torre, passariam por essa região e incidiriam no solo terão uma elevada probabilidade de serem atraídas pela torre e incidirem nessa. A Figura 2.3 representa o modelo de raio de atração a partir do topo da torre.

---

<sup>3</sup> Raio de atração: É a distância entre o canal descendente e uma determinada estrutura terrestre de destaque em relação ao local que esteja instalada na qual haja uma grande probabilidade do canal descendente se fechar com um canal ascendente iniciado na estrutura (Visacro, 2005a).

---

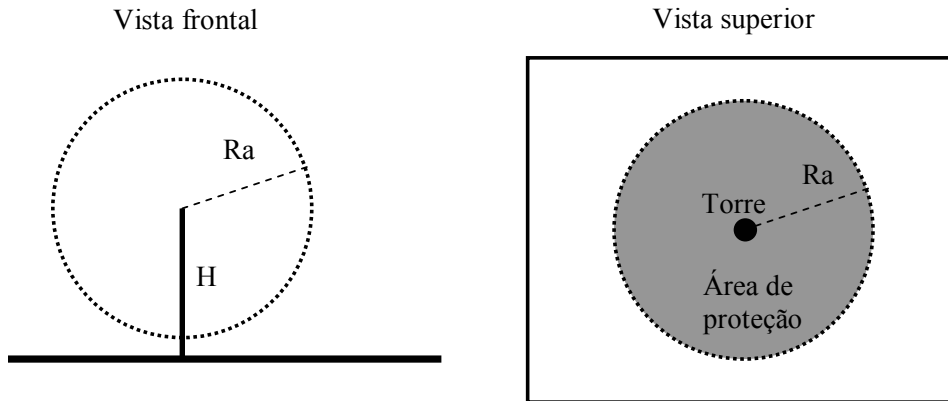


Figura 2.3: Representação do raio da atração de uma torre de altura H, apresentando a vista frontal e a superior.

A modelagem de raio de atração ( $R_a$ ) apresentado por Eriksson implica em uma área de proteção ( $S_a$ ) ao nível do solo na qual é improvável a incidência de descargas diretas. Essa área é calculada pela equação básica da área da circunferência, equação (2.2).

$$S_a = \pi \times R_a^2 \quad (2.2)$$

O cômputo da probabilidade de ocorrência de uma descarga com certa faixa de intensidade de corrente,  $P_{(I)}$ , pode ser determinada a partir de uma distribuição lognormal, utilizando-se, para tal a equação (2.3).

$$P_{(I)} = \frac{1}{I_p \sqrt{2\pi\sigma_g^2}} \times e^{-\frac{(\ln I_p - \mu_g)^2}{2\sigma_g^2}} \quad (2.3)$$

sendo que  $\mu_g$  e  $\sigma_g^4$  são parâmetros definidos para a base de dados.

---

<sup>4</sup>  $\sigma_g$  e  $\mu_g$  são os parâmetros da distribuição de corrente no solo;  $\sigma$  e  $\mu$  são parâmetros obtidos em medições em torres instrumentadas.

O método de definição dos parâmetros  $\mu_g$  e  $\sigma_g$  foi desenvolvido de forma analítica por meio de medições sucessíveis de descargas em torres instrumentadas por Pettersson (1991), e é apresentado na equação (2.4).

$$\bar{I} = \bar{I}_g [\exp(b\sigma_g^2)]^2 \quad ; \quad \sigma_g = \sigma \quad ; \quad b = 0,64 \quad (2.4)$$

sendo que:

$$\bar{I} = \exp(\mu + 0,5\sigma^2) \quad ; \quad \bar{I}_g = \exp(\mu_g + 0,5\sigma_g^2)$$

Os valores de  $\mu$  e de  $\sigma$  são obtidos por meio de medições dos valores de pico das correntes de descargas atmosféricas diretas em torres instrumentadas instaladas na região de interesse. Nessa dissertação, utilizam-se os valores de  $\mu$  e de  $\sigma$  presentes na referência (Dias, 2006) que foram obtidos a partir dos dados das medições da estação do Morro do Cachimbo.

Com o histórico de dados obtidos no Morro do Cachimbo, Dias definiu os valores de  $\mu$  e de  $\sigma$ , para as condições desta região como, respectivamente, 3,72855 e 0,597193. No entanto, os valores calculados de  $\mu$  e de  $\sigma$  são “contaminados” pela presença da Torre do Morro do Cachimbo. Para se obterem os valores para a condição de ausência da torre, deve-se utilizar a equação (2.4). A partir daí, obtêm-se como valores de  $\mu_g$  e de  $\sigma_g$ , respectivamente, 3,272051 e 0,597193.

Com essa metodologia, para se obter o número de descargas atmosféricas por ano em uma região ( $N_{DA}$ ), separadas por intensidade de corrente, basta aplicar a equação (2.5):

$$N_{DA(I)} = P_{(I)} \times N_g \times S \quad (2.5)$$

sendo que o  $N_g$  é o número de incidência de descargas atmosféricas por  $\text{km}^2$  por ano na região, e  $S$  é a área de interesse.

---

Para obter o número de descargas atmosféricas por ano que incide em uma torre ( $N_{DT}$ ), basta realizar o somatório dos valores de  $N_{DA(l)}$  da equação (2.5) para todos os valores de corrente propostos, substituindo  $S$  pela área de proteção encontrada a partir do raio de atração ( $S_a$ ), equação (2.2).

$$N_{DT} = \sum_{l=1}^{250} (P_{(l)} \times N_g \times S_a) \quad (2.6)$$

O número total de descargas incidentes em um ano, tanto para uma região ( $N_{DA}$ ), quanto para uma torre ( $N_{DT}$ ), é obtido pelo somatório das descargas incidentes por nível de corrente.

Essa segunda metodologia é nomeada como modelo eletrogeométrico.

### ***2.2.2 – Utilização do modelo eletrogeométrico***

Aplicando o modelo eletrogeométrico, determinou-se a influência da inserção de uma torre de telecomunicações na distribuição das descargas atmosféricas, apresentada nesse item.

Inicialmente, avalia-se o raio da atração e, em conseqüência, a área de proteção de uma torre de telecomunicações de 50 m de altura, instalada em uma região plana, para cada nível de corrente de descarga, obtendo, então, a Figura 2.4 e a Figura 2.5, em função do pico da corrente de descarga.

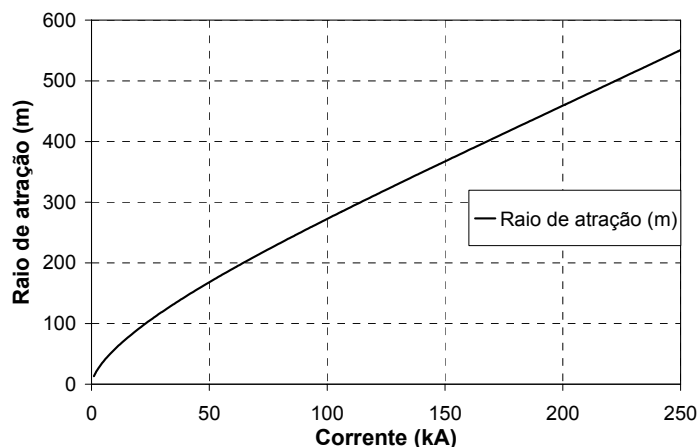


Figura 2.4: Raio de atração de uma torre de 50 m de altura para os diversos níveis de corrente de descarga.

Observa-se a partir da Figura 2.4 que, com o aumento da intensidade das correntes de descarga atmosférica, ocorre uma elevação do valor do raio de atração. Sendo assim, a inserção de uma torre de telecomunicações altera o perfil da distribuição de amplitude da corrente das descargas na região. Na torre incidirá um número maior de descargas atmosféricas com amplitudes de correntes elevadas em relação ao que ocorreria com a ausência da torre. Por exemplo, uma descarga de amplitude de 50 kA, que inicialmente incidiria a uma distância de 160 m da estação rádio-base, é atraída para a torre. Por outro lado, uma descarga de 20 kA incidindo à mesma distância da torre não seria atraída.

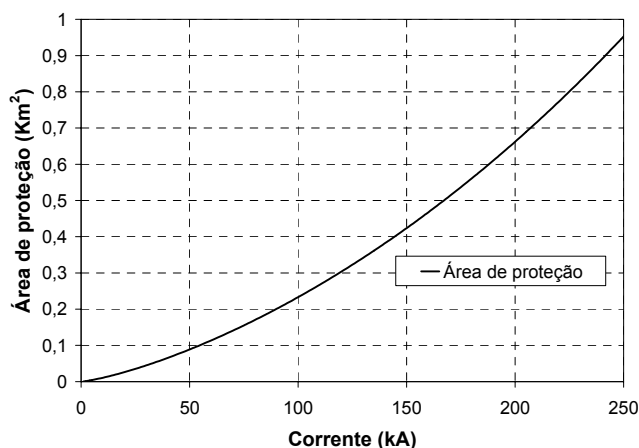


Figura 2.5: Área de proteção de uma torre de 50 m de altura para os diversos níveis de corrente de descarga.

Para avaliar o perfil das correntes das descargas atmosféricas que incidem em uma região, para uma condição com ou sem a torre de telecomunicações de 50 m de

altura, efetuou-se o cômputo das descargas que incidem por ano em um lote padrão de 15x15 m (225 m<sup>2</sup>) com e sem a presença da estação rádio-base. Utilizou-se essa dimensão de lote para exemplificar e estudar os efeitos em uma região específica. Para melhor enfatizar a proporção de descargas para cada nível de corrente nas duas condições, normalizaram-se as curvas em relação aos seus valores máximos, obtendo-se, então, a Figura 2.6.

A probabilidade do total das correntes de descargas ocorridas no lote sem a torre de telecomunicações, para uma região com densidade de incidência de 6 descargas/Km<sup>2</sup>/ano <sup>5</sup>, é de aproximadamente  $1,3 \times 10^{-3}$ . Para as mesmas condições com a presença da torre de telecomunicações de 50 m de altura, a probabilidade de ocorrência de descargas no lote (na torre instalada) se eleva para  $315 \times 10^{-3}$ , valor aproximadamente 233 vezes superior.

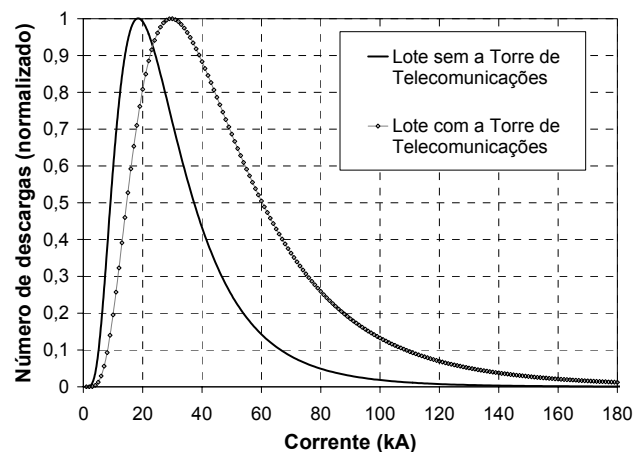


Figura 2.6: Curvas normalizadas da incidência de descargas atmosféricas, separadas por níveis de correntes, para um lote de 225 m<sup>2</sup> com e sem a presença de uma torre de telecomunicações de 50 m de altura.

Na condição do lote com a presença da torre de telecomunicações, praticamente todas as descargas que incidiriam de forma direta no lote, passam a atingir a torre. Além dessas, algumas descargas que incidiriam em outros lotes próximos também são atraídas. A torre possui um maior raio de atração para as descargas de maior intensidade. Com isso, há uma tendência de aumento do número de descargas de maior

<sup>5</sup> Valor de densidade típico de Belo Horizonte-MG (Visacro, 2005a)

amplitude na torre, o que explica o deslocamento da mediana da curva de número de descargas para uma intensidade de corrente superior.

### ***2.3 – Proteção das imediações da torre quanto à descarga atmosférica direta***

Com a instalação de uma torre de telecomunicações, a probabilidade de haver uma descarga atmosférica direta na região em torno da torre diminui. Isso gera uma proteção desejável na região próxima da torre, protegendo, por exemplo, as linhas de transmissão e as redes de distribuição de energia próximas contra descargas atmosféricas diretas (Visacro, 2007b). A extensão do trecho no qual a torre de telecomunicação possui influência quanto à atração de descarga depende sobremaneira da altura da torre e dos níveis de correntes das descargas, como já apresentado no item 2.2 dessa dissertação.

Como exemplo de proteção da região em torno da torre de telecomunicação para descargas atmosféricas, computou-se a influência, quanto à incidência de descargas, da inserção de uma torre de 50 m de altura distanciada dos lotes de interesse em 25, 35, 45, 50, 100, 150, 200, 300, 400 m. Essas distâncias são medidas do centro do lote à torre. Esse terreno possui forma quadrada de 225 m<sup>2</sup> de área, como apresentado na Figura 2.7.

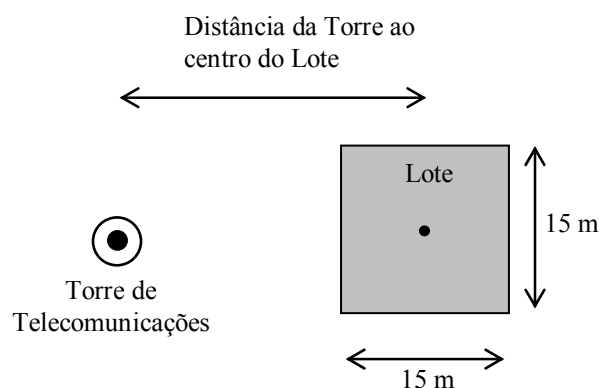


Figura 2.7: Desenho esquemático da torre de telecomunicações próxima ao lote que sofre a influência da proteção.

---

Com o cômputo nas condições citadas anteriormente, considerando uma densidade de descargas atmosféricas de 6 descargas/Km<sup>2</sup>/ano e um perfil de incidência típica da estação do Morro do Cachimbo, obteve-se a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Relação da influência de uma torre de telecomunicações nos lotes vizinhos a essa.

Distância da torre ao centro do lote (m)	Probabilidade aproximada de ocorrência de descargas no lote por ano		Nível superior das correntes de descarga no lote (kA)	Mediana da amplitude das descargas no lote (kA)
	Valores Absolutos	Porcentagem em relação à condição sem a torre		
Na torre	0,315	-----	-----	43
Sem torre	1,35 x10 <sup>-03</sup>	100 %	< 250	23
400	1,35 x10 <sup>-03</sup>	100 %	< 167	23
300	1,34 x10 <sup>-03</sup>	99,26 %	< 114	23
200	1,26 x10 <sup>-03</sup>	93,33 %	< 64	23
150	1,57x10 <sup>-03</sup>	78,89 %	< 42	22
100	0,67x10 <sup>-03</sup>	42,22 %	< 23	15
75	2,57x10 <sup>-04</sup>	18,67 %	< 15	12
50	3,90x10 <sup>-05</sup>	2,89 %	< 8	7
45	1,27x10 <sup>-05</sup>	0,94 %	<6	5
35	1,98x10 <sup>-06</sup>	0,15 %	<4	3
25	4,05x10 <sup>-07</sup>	0,03 %	< 3	2

A terceira linha da Tabela 2.1 (“Sem torre”) apresenta a probabilidade de ocorrência de descargas no lote de 225 m<sup>2</sup> se não houver uma torre de telecomunicações próxima. A terceira coluna da Tabela 2.1 é obtida com referência a essa linha, dividindo a probabilidade de ocorrência de descargas com a torre a uma determinada distância (segunda coluna da Tabela 2.1) pelo mesmo valor sem a torre, apresentando o resultado encontrado em porcentagem.

Os lotes próximos à torre estarão protegidos para as descargas de maior intensidade (maior raio de atração da torre), havendo uma probabilidade de ocorrer descargas de menor amplitude. Esse nível de corrente que o lote está protegido é apresentado na quarta coluna da Tabela 2.1. Por exemplo, um lote com centro distanciado de 100 m da torre de telecomunicações estará sujeito as correntes de descargas inferiores a 23 kA, as superiores a esse nível terão maior probabilidade de incidirem na torre.

---

A partir da Tabela 2.1, monta-se o gráfico presente na Figura 2.8, que representa a porcentagem das descargas que atingem o lote com a presença da torre próxima em relação à quantidade de descargas que ocorreria com a ausência da estação. No eixo da abscissa está a distância da torre ao centro do lote, e no eixo da ordenada há a probabilidade de ocorrência de uma descargas em relação à ausência da torre (valor apresentado em porcentagem).

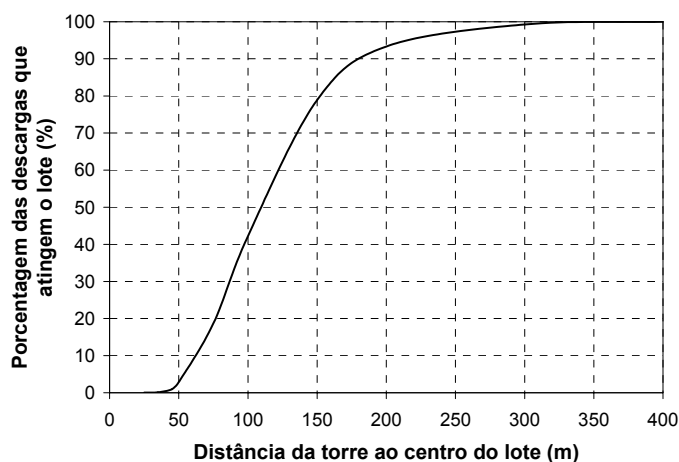


Figura 2.8: Gráfico da porcentagem relativa de descargas que atingem um lote de 225 m<sup>2</sup> com uma torre de telecomunicações de 50 m de altura em função da distância do centro desse.

O gráfico tridimensional presente na Figura 2.9 foi construído a partir da Tabela 2.1. A curva representa a distribuição de corrente de descargas incidentes em um lote (eixo nomeado por “Corrente”) e a probabilidade de ocorrência das mesmas (eixo P(I)), variando a distância entre a torre e o lote. Para facilitar a visualização e compreensão dos dados presentes no gráfico tridimensional, esse foi inserido na Figura 2.9 em duas perspectivas diferentes.

Na Figura 2.9 observa-se uma proteção elevada (baixa incidência de descargas) para o lote próximo da torre. Ao aumentar essa distância, tanto a distribuição de corrente de descarga quanto a probabilidade de incidência crescem rapidamente. No entanto, para um distanciamento superior a 200 m, essas grandezas praticamente se estabilizam.

Para realizar a Figura 2.9 foram utilizados os valores de distância entre a torre e o lote de 25, 35, 45, 50, 75, 100, 150, 200, 300 e 400 m. Na distância da torre ao lote de 400 m, pode-se considerar desprezível a influência da torre no perfil da incidência de

descargas no lote. Para esse distanciamento a mediana e a moda deste perfil é de, respectivamente, 26 kA e 18 kA.

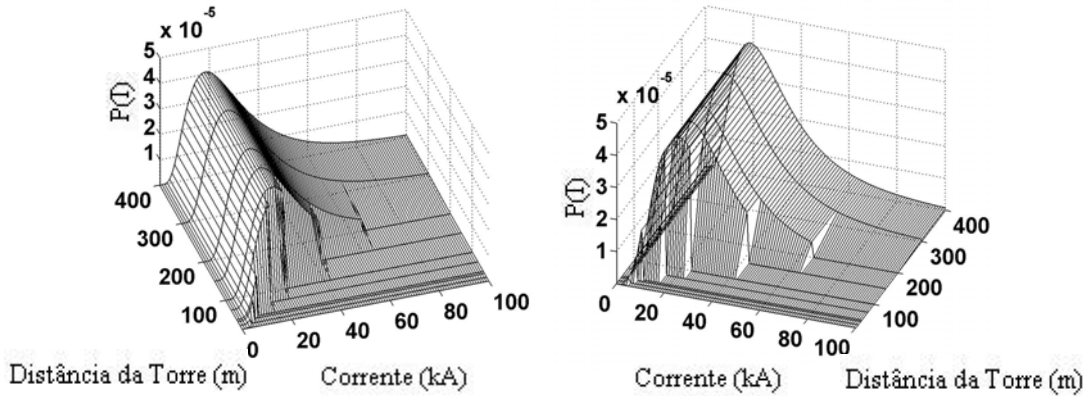


Figura 2.9: Probabilidade de incidência de descargas em um lote distanciado de uma torre de telecomunicações.

## 2.4 – Influência quanto à forma da tensão induzida e à elevação de potencial nas redondezas da torre

A presença da torre próxima de uma rede de distribuição promove certa proteção quanto à descarga direta. No entanto, como é visto posteriormente, aumenta a probabilidade de tensões induzidas por esse fenômeno.

A onda de corrente da descarga atmosférica sofre reflexões ao mudar de meio de propagação, o que altera ao campo eletromagnético gerado pelo fluxo de corrente. Como a descarga atmosférica, ao incidir na torre, muda de meio de propagação (ar - torre metálica - aterramento metálico) há a presença de reflexões de ondas que, na descarga incidente diretamente no solo, não ocorreriam (Visacro et al., 2004d). As ondas refletidas mudam, por consequência, o formato da elevação de potencial em redes de distribuição e em linhas de transmissão próximas (Silveira e Visacro, 2006b).

Outra influência da presença da torre de telecomunicações na elevação da tensão na rede de distribuição é causada pelos condutores de aterramento da base da torre (Visacro, 1992). Esses condutores elevam o efeito da elevação de potencial devido às

correntes conduzidas pelo solo, uma vez que oferecem um meio condutor (metálico) para que as correntes de descargas fluam até a região próxima dos aterramentos da rede de distribuição de energia.

No capítulo 5 dessa dissertação, são apresentadas simulações que visam, entre outros objetivos, a mensuração da influência da torre de telecomunicações no perfil da sobretensão na rede de distribuição próxima à torre. Essa análise engloba tanto a parte relativa à tensão induzida quanto ao efeito da elevação de potencial no solo causada pela corrente conduzida pelo mesmo.

## ***2.5 – Comentários finais***

Neste capítulo, foi observado o efeito severo da concentração de descargas em uma estrutura elevada. Esse efeito possui como benefício a proteção contra descargas diretas na região próxima da torre. Entretanto, como malefício, a concentração torna a redondeza da torre muito vulnerável a outros efeitos da descarga atmosférica, como a tensão induzida e a elevação de potencial do solo. Além disso, o raio de atração de uma torre aumenta com a intensidade da corrente, tornando a mediana do pico das correntes de descargas incidentes quase 50 % maior.

Em termos de incidência de descargas em um lote próximo da torre, foi obtida uma maior proteção para os lotes mais próximos da estação. Ao distanciá-los, aumenta a probabilidade de incidência de descargas no lote, principalmente as de menor corrente de pico. Para lotes distanciados mais de 300 m de uma torre de 50 m de altura, o efeito da presença dessa é praticamente desprezível. Efeito oposto é observado para terrenos afastados 50 m da estrutura elevada nos quais a incidência de descarga se reduz em mais de 97 %.

---

# 3

## Caracterização das Descargas Atmosféricas Nuvem-Solo

### *3.1 – Introdução*

Neste capítulo interessa realçar, de forma objetiva, os parâmetros das descargas atmosféricas que possuem maiores aplicações na presente investigação e que serão utilizados nos capítulos posteriores.

Nesta perspectiva, a descarga atmosférica nuvem-solo é o tipo de descarga que possui relevância nos estudos de incidência direta e de tensão induzida em redes de distribuição e transmissão de energia (Visacro et al., 2004e). Sendo assim, não são apresentados nesse trabalho estudos relacionados aos demais tipos de descarga.

Na abordagem desenvolvida, evita-se a repetição de conhecimentos já apresentados sobre o fenômeno descarga atmosférica que são detalhados na referência (Visacro, 2005a). A caracterização dos parâmetros de descargas, inclusive aqueles das medições realizadas na Estação do Morro do Cachimbo no Brasil e no Monte San Salvatore na Suíça, pode ser encontrada nas referências (Visacro et al., 2004a) e (Berger et al., 1975).

Tendo-se em vista o processo de formação do raio, é possível separar as descargas atmosféricas em dois tipos: A descarga única (ou primeira) e a(s) descarga(s) subsequente(s). São apresentados, nessa dissertação, os parâmetros de cada uma delas quanto ao tempo de frente, tempo de meia-onda e amplitudes típicas, entre outros dados que são importantes durante as simulações presentes nos capítulos posteriores a esse.

Para simplificar a apresentação do mecanismo de formação da descarga atmosférica, considera-se, no item 3.2 desse capítulo, apenas o da descarga negativa, uma vez que essa predomina em estatística de ocorrência em relação à descarga positiva. Dados apresentados em Schroeder (2001) mostram que, no resumo das 79 descargas atmosféricas registradas na Estação do Morro do Cachimbo no período de 1987 a 1999, 64 (81%) foram descargas negativas, 13 (16,5%) foram descargas positivas e 2 (2,5%) não tiveram a sua polaridade definida.

### ***3.2 – Tipificação das descargas atmosféricas***

As nuvens de tempestade são a principal fonte de descargas atmosféricas. Estas possuem regiões de concentração de cargas positivas e de cargas negativas. Pouco acima da base da nuvem de tempestade há uma forte concentração de cargas negativas. Já as partes superior e mediana da nuvem possuem concentração de cargas positivas relativamente espalhadas, ocupando um grande volume, como sugere a Figura 3.1, sendo que o somatório das cargas tende a ser neutro (Visacro, 2005a).

---

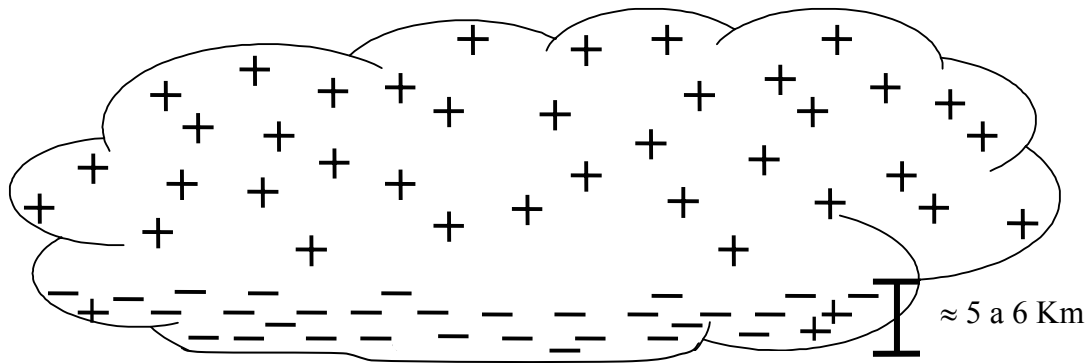


Figura 3.1: Representação da distribuição típica das cargas em uma nuvem de descarga atmosférica.

A concentração de cargas negativas presentes na base da nuvem, por estar mais próxima da terra, estabelece um forte campo elétrico na região entre a nuvem e o solo. Já as cargas positivas, mais distantes desta região, não causam uma influência tão relevante. Ocorre, então, por efeito de indução, uma concentração de cargas positivas no solo que se mostra mais intensa nas extremidades (“Poder das Pontas”), sobretudo nos pontos mais elevados, como, por exemplo, as torres de telecomunicações das estações rádio-base.

### ***3.2.1 – Processo de formação da descarga única / primeira***

O campo elétrico estabelecido pela base da nuvem gera uma diferença de potencial elétrico entre a nuvem e o solo da ordem de centenas de megavolts. Essa tensão é extremamente elevada, embora não seja ainda capaz de romper diretamente a rigidez dielétrica do ar entre a base da nuvem e o solo. Ocorre, então, um processo de rompimento por passos. Na região próxima à nuvem, onde o campo elétrico se apresenta mais intenso, ocorre a ruptura da rigidez dielétrica do ar, com o estabelecimento de uma descarga elétrica, cujo percurso possui um comprimento da ordem de dezenas de metros. Constitui-se nesse percurso um canal de plasma, forma da matéria que possui alta condutividade. Cargas elétricas negativas se deslocam para a extremidade e para a região ao redor deste canal. A intensidade do campo elétrico na extremidade do canal aumenta com o acúmulo de cargas, ocorrendo, conseqüentemente, outra ruptura. Essas rupturas ocorrem aproximadamente a cada 50  $\mu$ s. Esse processo se estende de forma descendente – da nuvem para o solo, até certa altura do solo, cerca de

400 m. O campo elétrico próximo ao solo torna-se, então, muito elevado podendo ocorrer uma ruptura nesta região, com formação de um canal ascendente. Se o canal ascendente e o descendente se encontrarem – região conhecida na literatura como ponto de *attachment* – acontece o fechamento do canal de descarga. Este fenômeno ocorre em uma altura da ordem de algumas dezenas ou centenas de metros em relação ao nível do solo. A partir do fechamento do canal é que ocorre de fato a descarga atmosférica única ou primeira. A corrente elétrica impulsiva se deve ao descarregamento das cargas acumuladas no canal, constituindo a sua componente impulsiva. A essa componente pode suceder o fluxo de cargas da nuvem para o solo pelo canal de plasma, por meio de uma componente contínua da corrente de descarga atmosférica.

A descarga negativa descendente é nomeada como “única” quando não ocorrem descargas subseqüentes e nomeada como “primeira” quando elas ocorrem. Os processos de formação da descarga única e da descarga primeira, descritas neste parágrafo, são similares.

### ***3.2.2 – Processo de formação das descargas subseqüentes***

As descargas atmosféricas subseqüentes são aquelas que ocorrem logo após a primeira descarga e se utilizam da totalidade ou de parte do canal ionizado deixado no ar pela descarga anterior. Em apenas cerca de 20% dos casos, não há descargas subseqüentes.

Quando o canal é integralmente utilizado, a incidência se verifica para o mesmo local e nos casos em que o canal é usado apenas parcialmente, ocorrem “processo por passos” a partir da extremidade “acesa” do canal. A incidência se dá, nesses casos, em pontos no solo diferentes daquele da descarga anterior (distância da ordem de 2 km, com limite de 10 km).

---

### 3.2.3 – Diferenciação das Descargas Positivas e das Negativas

Durante o processo de formação da descarga atmosférica, surge um canal descendente partindo da nuvem de descarga em direção ao solo. Se esse canal se iniciar na parte inferior da nuvem, dotada de cargas negativas, a descarga atmosférica que se formará será nomeada como descarga negativa (tipo de descarga que ocorre em maior quantidade). Por outro lado, se o canal descendente se iniciar a partir da região positiva da nuvem, essa será designada como descarga positiva, como pode ser observado na Figura 3.2.

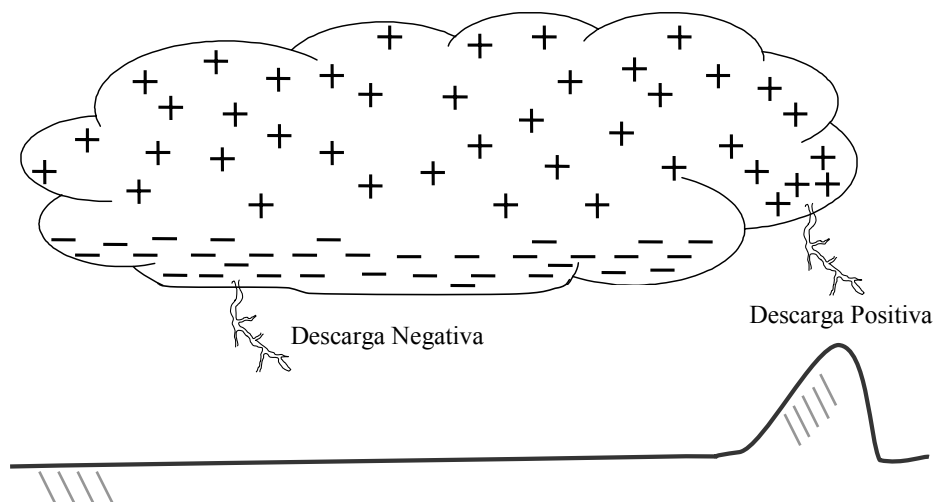


Figura 3.2: Representação das descargas negativas e positivas, enfatizando os centros de carga na nuvem relacionados a cada um dos fenômenos.

## 3.3 – Parâmetros de interesse das Descargas Atmosféricas

Os parâmetros da forma de onda das descargas atmosféricas, como amplitude, tempo de frente, tempo de meia onda, possuem natureza aleatória, variando entre descargas ocorridas na mesma região – mantendo-se, entretanto, em uma faixa de valores que são apresentados nesse item. Os valores medianos destes parâmetros foram obtidos por meio de exaustivas medições realizadas em torres instrumentadas como a da estação do Monte San Salvatore (Suíça), a do Morro do Cachimbo (Minas Gerais -

Brasil) e a instalada na África do Sul. Essas estações obtêm os parâmetros das descargas por meio de medidas diretas das correntes de descargas (Gomes et al., 2007) e (Visacro e Silveira, 2005d), utilizando-se da impedância de algum elemento no qual a corrente circula ou por meio do registro do campo eletromagnético próximo gerado pela descarga. Essa última forma de medição pode ser realizada, por exemplo, por “Elos Magnéticos”, pela Bobina de “Rogowski” e de “Pearson”.

### 3.3.1 – Parâmetros da descarga negativa descendente única ou primeira

A forma mediana da corrente de descarga atmosférica negativa única ou primeira pode ser observada na referência (Visacro, 2004a) e na Figura 3.3, as curvas foram obtida a partir de medições realizadas nas estações do Morro do Cachimbo e de San Salvatore. Os parâmetros principais desta descarga estão apresentados nos itens a seguir.

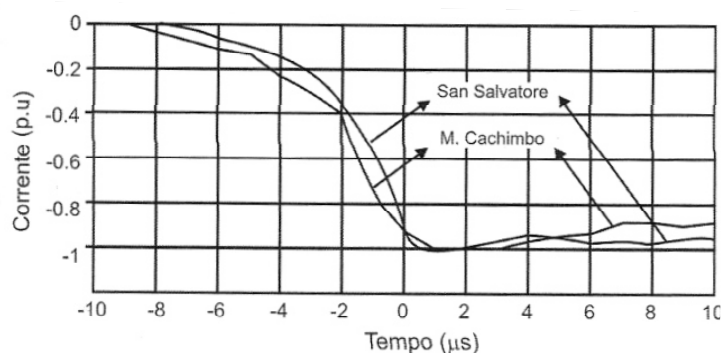


Figura 3.3: Mediana da corrente de descarga atmosférica negativa única ou primeira.

#### 3.3.1.1 – Amplitude da corrente de descarga

A corrente de pico da descarga é a amplitude desta onda de corrente. O valor mediano presente na literatura internacional é de 33 kA (Berger et al, 1975), mas esse valor pode variar sobremaneira, chegando a valores superiores a 100 kA. Medições registradas na Estação do Morro do Cachimbo, que são dados mais aplicáveis às condições do Estado de Minas Gerais, demonstram uma corrente mediana da ordem de

45 kA, valor acima da referência internacional (Visacro, 2005a). Nas simulações que são apresentadas no capítulo 5, as amplitudes das tensões foram obtidas para a injeção de 1 kA, e as unidades de tensão estão em quilo-Volt de tensão por cada quilo-Ampère de corrente elétrica injetada (kV/kA).

### ***3.3.1.2 – Tempo de frente da onda de corrente da descarga atmosférica***

O tempo de frente da onda é o tempo no qual a onda de corrente de descarga atmosférica parte de um valor próximo de zero e atinge o primeiro pico. Ao invés de se utilizar como tempo inicial o valor próximo de zero, o que de forma prática é difícil de definir, muitas vezes se utilizam os valores de T10 e T30, que são respectivamente o valor do intervalo de tempo desde 10% da corrente de pico ( $0,1.I_p$ ) até  $0,9 I_p$ , e desde  $0,3 I_p$  até  $0,9 I_p$  – como pode ser observado na Figura 3.4. A partir dos valores de T10 e T30 são definidos, respectivamente, os valores de  $T_{D10}$  e  $T_{D30}$ , que representam o tempo de frente de onda da descarga atmosférica calculados com referência nos valores de  $0,1I_p$ ,  $0,3I_p$  e  $0,9I_p$  como mostram as equações (3.1) e (3.2). Esses valores, assim como o da amplitude da corrente, possuem uma variação acentuada. Anderson et al. (1980) propõem tempos medianos de frente de onda definidos como  $T_{D10}$  e  $T_{D30}$  de, respectivamente,  $5,6 \mu s$  e  $3,8 \mu s$  para a descarga única ou primeira. Já os dados obtidos a partir das análises das descargas medidas pela estação do Morro do Cachimbo apresentam parâmetros medianos destas como sendo, respectivamente,  $7 \mu s$  e  $4,8 \mu s$ , valores significativamente maiores. Esse parâmetro da descarga atmosférica mostra-se muito relevante, uma vez que interfere diretamente na tensão induzida em redes de distribuição de energia elétrica. Posteriormente no capítulo 5 é apresentado um estudo da influência desse parâmetro na tensão induzida em redes de distribuição.

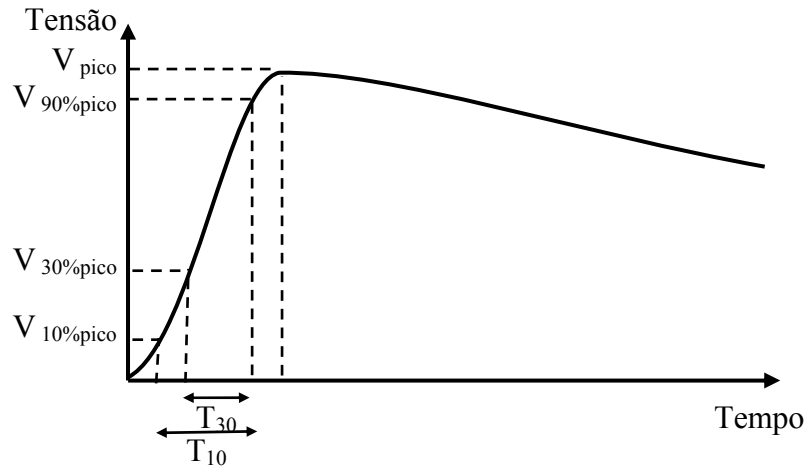


Figura 3.4: Onda representativa de sobretensão, indicando os tempos T10 e T30.

$$T_{D10} = \frac{0,9I_P - 0,1I_P}{0,8} = \frac{T_{10}}{0,8} \quad (3.1)$$

$$T_{D30} = \frac{0,9I_P - 0,3I_P}{0,6} = \frac{T_{30}}{0,6} \quad (3.2)$$

### 3.3.1.3 – Tempo de meia onda da corrente de descarga atmosférica

O tempo de meia onda é o tempo que a onda impulsiva gasta para partir de um valor próximo de zero, ultrapassar seu valor de amplitude de pico e atingir 50% deste valor. Esse parâmetro mostra-se relevante quando se analisa a energia transferida pela descarga ao elemento atingido. O valor de tempo de meia onda se associa às componentes de baixa frequência, sendo pouco relevante para a tensão induzida. Entretanto, influenciam nas correntes conduzidas pelo solo até a rede de distribuição. Berger et al (1975) obtiveram, por meio de medições em torres instrumentadas, um tempo de meia onda de 75  $\mu\text{s}$  para descargas primeiras ou únicas. Na estação do Morro do Cachimbo observa-se um valor mediano de tempo de meia onda para esse tipo de descarga de 53,5  $\mu\text{s}$  (Visacro, 2005a).

### ***3.3.2 – Parâmetros das descargas negativas subseqüentes***

#### ***3.3.2.1 – Introdução***

O intervalo de tempo típico entre descargas subseqüentes é da ordem de 60 ms. Mais raramente, pode alcançar um limite de 500 ms nos casos da descarga subseqüente ser precedida por componente contínua de longa duração e de valor mais elevado que o usual. Esse tipo de descargas pode não atingir o mesmo ponto, podendo, inclusive, uma torre de telecomunicações ser submetida à incidência de apenas descargas subseqüentes, uma vez que a descarga primeira pode incidir em um ponto distinto. Em uma descarga atmosférica o número de subseqüentes à primeira é muito variável. O valor típico é 3, embora multiplicidade superior a 20 já tenha sido observada.

#### ***3.3.2.2 – Amplitude das descargas subseqüentes***

O valor mediano da corrente das correntes de descargas subseqüentes é inferior ao da primeira descarga ou única, sendo da ordem de 12 kA. Medições registradas na Estação do Morro do Cachimbo indicam uma corrente mediana da ordem de 16 kA (Visacro, 2005), valor acima da referência internacional.

#### ***3.3.2.3 – Tempo de frente de onda da descarga subseqüente***

Para os valores de tempo de frente de onda das descargas subseqüentes, Anderson e Eriksson (1980) propõem como tempos medianos de frente definidos como  $T_{D10}$  e  $T_{D30}$  de, respectivamente, 0,75  $\mu$ s e 0,67  $\mu$ s. Já os dados obtidos a partir das análises das descargas medidas pela estação do Morro do Cachimbo apresentam parâmetros medianos destas descargas como sendo, respectivamente, 0,88  $\mu$ s e 0,67  $\mu$ s. Com base nesses valores, utiliza-se, neste trabalho para simular as ondas de corrente da descarga subseqüente, o tempo de frente de 1  $\mu$ s.

---

#### ***3.3.2.4 – Tempo de meia onda da descarga subsequente***

Como tempo de meia onda para descargas subsequentes, Berger e outros apresentam um valor mediano de 32  $\mu\text{s}$ . Na estação do Morro do Cachimbo foi observado um valor mediano de tempo de meia onda para esse tipo de descarga de 16,4  $\mu\text{s}$  (Schroeder, 2001a). Nas simulações presentes no capítulo 5 utiliza-se, para representar as descargas subsequentes, o tempo de meia onda de 50  $\mu\text{s}$ .

---

# **4** **Representação do Sistema e Dinâmica das Sobretensões nas Redes de Distribuição Próximas à Torre Atingida**

## ***4.1 Introdução***

Os resultados apresentados nesta dissertação de mestrado foram obtidos por meio de simulações sistemáticas com o programa HEM (Hybrid Electromagnetic Model) (Visacro e Soares, 2005b). Este modelo computacional foi desenvolvido pela equipe do LRC para avaliação de problemas relacionados às descargas atmosféricas. Para realizar tais simulações foi necessário modelar o sistema básico, onde se avaliaram os efeitos causados por descargas atmosféricas na estação rádio-base e proximidades, representando a dinâmica dos processos eletromagnéticos envolvidos.

O objetivo deste capítulo é apresentar a modelagem que permitiu tal representação.

## ***4.2 Modelo para cálculo – HEM***

O HEM é um modelo computacional utilizado para simulação dos efeitos gerados por descargas atmosféricas em sistemas elétricos, incluindo o comportamento de aterramentos elétricos submetidos às correntes de descargas. Apresenta como resultados a resposta do sistema no domínio da frequência e no domínio do tempo para uma forma de onda de corrente injetada em um ponto da estrutura simulada. O modelo é também utilizado para analisar o comportamento de condutores aéreos e estruturas de torres, tanto para efeitos da tensão causada pela corrente conduzida no solo ou pela própria estrutura metálica, bem como para efeitos de tensão induzida. O programa aborda o aterramento elétrico para fenômenos com altas componentes de frequência – caso da descarga atmosférica – e para fenômenos com componentes de baixa frequência – para simular curto-circuito. A definição de uma faixa de frequências como baixa ou alta depende diretamente da extensão dos condutores envolvidos, mas pode-se considerar uma frequência da ordem de 60 Hz como baixa e, da ordem ou superior a dezenas de quilohertz, como alta.

O modelo considera os efeitos de propagação no solo, realiza o cômputo da dependência com a frequência dos parâmetros físicos do meio, modelando o aterramento como impedâncias distribuídas. Esta representação é uma forma analítica de quantificar, a partir das equações de Maxwell, o comportamento de uma estrutura de aterramento no solo ou uma estrutura imersa no ar. Esse modelo permite calcular os potenciais, as correntes e as impedâncias em qualquer ponto do sistema a ser simulado (Visacro e Portela, 1995).

O HEM modela um condutor dividindo-o em diversos segmentos (elementos), sendo que cada segmento atua como uma fonte linear de corrente divergente “ $I_T$ ” (corrente transversal) e possui uma corrente que o percorre de forma longitudinal “ $I_L$ ”

---

(corrente longitudinal) ambas consideradas constantes em todo o segmento, apresentando variação de  $I_T$  e  $I_L$  apenas entre segmentos. Em cada par de elementos, o programa calcula o acoplamento eletromagnético, incluindo o cômputo do efeito de propagação de onda e a influência do solo em relação aos condutores aéreos. Analisando o acoplamento entre dois segmentos, um é considerado como emissor de campo (aqui nomeado como “j”) e o outro é o que sofre a influência do campo gerado pela circulação de corrente no condutor “j” (designado como “i”), como pode ser observado na Figura 4.1.

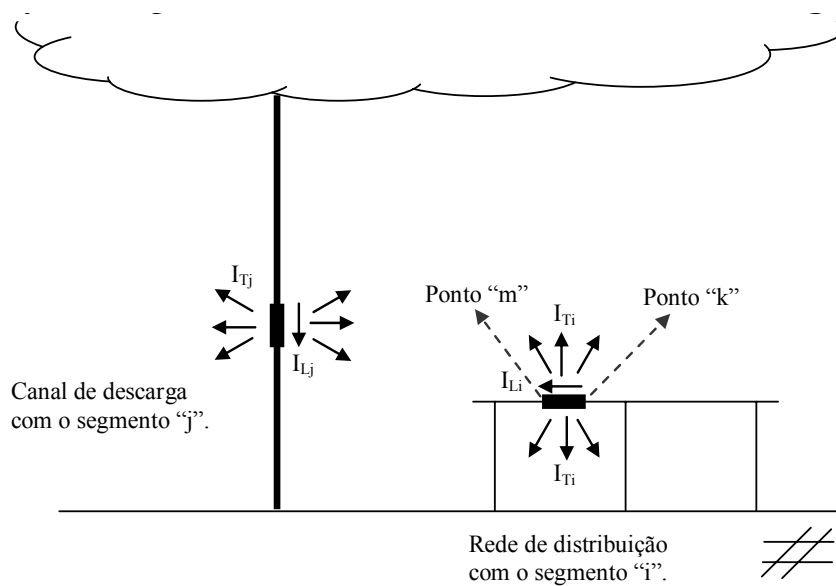


Figura 4.1: Desenho representativo de um sistema no qual há um segmento emissor de campo “j” e um receptor “i”.

O programa é executado inicialmente no domínio da frequência, realizando o cálculo das matrizes de impedância. As correntes  $I_T$  e  $I_L$ , calculadas durante a simulação, são correntes senoidais de frequência “f”. Cada simulação utiliza diversos valores de frequência para, assim, obter a resposta do sistema no domínio da frequência. Posteriormente, por meio da Transformada de Fourier, é possível obter a resposta do sistema no domínio do tempo. Para tal, aplica-se em um ponto pré-definido uma onda de corrente no domínio do tempo.

A corrente  $I_T$  promove os efeitos de acoplamento capacitivo e condutivo entre os segmentos.  $I_T$  se relaciona ao campo divergente e estabelece a elevação de potencial,

sendo responsável pela parcela conservativa. A corrente  $I_L$  promove os efeitos do acoplamento indutivo e resistivo, e o elemento  $\Delta V$  (a queda de potencial ao longo do condutor) se deve a essa corrente. A corrente longitudinal gera o campo não-conservativo. Desta forma o programa representa a estrutura de aterramento a partir das equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4).

$$V_{ij}=Z_{Tij} \cdot I_{Tj} \quad (4.1)$$

$$Z_{Tij} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)L_j L_i} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-K \cdot r}}{r} dl_j dl_i \quad (4.2)$$

$$\Delta V_{ij}=Z_{Lij} \cdot I_{Lj} \quad (4.3)$$

$$Z_{Lij} = -j \frac{\omega\mu}{4\pi} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-K \cdot r}}{r} d\vec{l}_j d\vec{l}_i \quad (4.4)$$

Nas equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4), “V” é o vetor potencial médio em cada segmento do condutor, “ $\Delta V$ ” é o vetor diferença de potencial entre as extremidades do segmento, “ $Z_T$ ” é a matriz de impedâncias transversais e “ $Z_L$ ” é a matriz de impedâncias longitudinais. “ $\varepsilon$ ”, “ $\mu$ ” e “ $\sigma$ ” são, respectivamente, a permissividade, a permeabilidade e a condutividade do meio no qual o segmento do condutor estiver inserido, “L” é o comprimento do segmento, “dl” é o deslocamento diferencial na direção do segmento, “K” é a constante de propagação no meio, “i” e “j” são índices indicativos dos segmentos, “r” é a distância da fonte de corrente ao segmento “i” e “ $\omega$ ” é a frequência angular.

Os termos das matrizes “ $Z_T$ ” e “ $Z_L$ ” são derivados das fontes de corrente no meio, e são obtidos pelas equações (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8).

$$V = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)} \int_{L_i} \frac{I_{Tj}}{L_j} \frac{e^{-K \cdot r}}{r} dl_i \quad (4.5)$$

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int_{L_i} I_{L_i} \frac{e^{-K \cdot r}}{r} dli \quad (4.6)$$

$$K = \sqrt{-w^2 \mu \varepsilon + jw \mu \sigma} \quad (4.7)$$

$$Z_{Tij} = \frac{V_{ij}}{I_{Tj}} \quad (4.8)$$

Para cada segmento do condutor, calcula-se o valor do potencial médio, utilizando, para tal, o efeito das fontes de correntes envolvidas no sistema e de suas imagens. O potencial no segmento “i” é o somatório das contribuições de todas as correntes transversais existentes no sistema ( $I_{T1}, I_{T2}, \dots, I_{Ti}, \dots, I_{Tj}, \dots, I_{Tn}$ ). A queda de potencial ao longo do segmento “i” é causada pela contribuição de todas as correntes longitudinais existentes ( $I_{L1}, I_{L2}, \dots, I_{Li}, \dots, I_{Lj}, \dots, I_{Ln}$ ).

Com isso, há dois tipos de sistemas lineares, um para o cálculo do potencial em cada condutor e o outro para o cálculo da queda de potencial no mesmo, seguindo as equações (4.9) e (4.10).

$$\underline{V} = \underline{Z}_T \cdot \underline{I}_T \quad (4.9)$$

$$\Delta \underline{V} = \underline{Z}_L \cdot \underline{I}_L \quad (4.10)$$

As equações 4.11 e 4.12 são obtidas pela inversão das equações 4.9 e 4.10.

$$\underline{I}_T = \underline{Y}_T \cdot \underline{V} \quad (4.11)$$

$$\underline{I}_L = \underline{Y}_L \cdot \Delta \underline{V} \quad (4.12)$$

A queda de potencial em cada segmento de corrente é descrita como sendo o potencial nodal ( $V_N$ ) no ponto anterior ao segmento (aqui nomeado como “k”) subtraído pelo potencial no ponto posterior ao segmento (ponto “m”), como pode ser observado na Figura 4.2. Obtém-se, então, a equação (4.13).

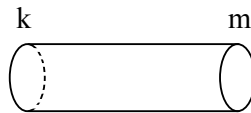


Figura 4.2: Representação do segmento do condutor com as extremidades “k” e “m”.

$$\Delta V_i = V_{Nk} - V_{Nm} \quad (4.13)$$

O potencial em um segmento “i” qualquer é dado pela média aritmética do potencial nas extremidades do segmento, como pode ser observado na equação (4.14).

$$V = (V_{Nk} + V_{Nm}) / 2 \quad (4.14)$$

Utilizando-se do princípio da continuidade da corrente - o somatório das correntes em um nó é igual à zero (2ª Lei de Kirchhoff), equação (4.15) – incluindo as correntes transversais e longitudinais no segmento, e considerando que cada corrente injetada no sistema seja modelada como um fonte de corrente em um segmento específico. Sendo assim, efetuam-se os cálculos necessários para a determinação das grandezas desejadas.

$$\sum I_N = 0 \quad (4.15)$$

Desta forma, é calculada a tensão nodal, e, posteriormente, as correntes longitudinais e transversais, assim como a queda de potencial em cada segmento. Esse cálculo é feito separadamente para cada frequência, sendo que o processo é repetido para as frequências de interesse.

Posteriormente, essas informações são passadas para o domínio do tempo. Para tal, é realizada a transformada inversa de Fourier e se injeta no ponto (anteriormente

---

especificado) uma forma de onda de corrente no tempo. Essa forma de onda pode ser definida ponto a ponto pelo usuário ou ser utilizada algum tipo de onda pré-definida, como as ondas dupla-exponencial, rampa, côncava entre outras.

Para as tensões induzidas por descargas atmosféricas, o programa HEM trabalha separadamente com duas parcelas do campo elétrico, a não-conservativa e a conservativa. Em um ponto da linha, a elevação de tensão atribuída ao campo elétrico conservativo se associa ao potencial escalar, tendo como fonte a corrente transversal (Silveira, 2001). Esse campo independe do caminho de integração para calculá-lo. Já o campo elétrico não-conservativo se relaciona ao potencial vetor, e depende de um caminho de integração. Esse potencial é gerado pela corrente longitudinal do canal de descarga (Visacro e Silveira, 2004c). Para as simulações apresentadas nessa dissertação foi utilizado um caminho retilíneo e vertical, iniciando no solo e finalizando na rede de distribuição.

Essa dissertação não pretende descrever minuciosamente a forma de cálculo e caracterizar a separação da parcela de campo elétrico conservativo e não-conservativo. Tal análise pode ser observada de forma detalhada na referência (Silveira, 2006c).

## ***4.3 – Configuração típica da estação de telecomunicações (estação rádio-base)***

### ***4.3.1 – Considerações Gerais***

Atualmente, em áreas urbanas de todo o mundo é muito comum a instalação de um padrão de configuração de estação de rádio-base, o qual foi tomado como referência para a realização da presente avaliação.

---

Tal estação possui usualmente uma estrutura elevada (poste ou torre) onde são instaladas as antenas de recepção e transmissão de microondas, e um contêiner que abriga os equipamentos eletrônicos de leitura, tratamento e transmissão de sinais. A torre e o contêiner ficam em uma área cercada. A estação possui um aterramento que tem função de proteger o sistema eletrônico para evitar ruídos internos e de reduzir a amplitude dos surtos de sobretensões gerados por descargas atmosféricas.

A Figura 4.3 apresenta uma fotografia que ilustra uma torre de telecomunicações instalada próxima da rede de distribuição de energia elétrica.

Em áreas urbanas, a estação é comumente alimentada pelo sistema de distribuição de energia, a partir da baixa tensão, nem sempre existe um transformador exclusivo para alimentar a estação. Isso significa que os consumidores de energia elétrica próximos estão compartilhando os condutores fases que energizam a estação, o que pode comprometer a qualidade de energia recebida por estes (De Conti e Visacro, 2005), (De Conti, 2006). Almeida (2005) apresenta as solicitações na rede de distribuição geradas por descargas atmosféricas, demonstrando seus efeitos em consumidores distantes do ponto de incidência da descarga. Percebe-se, a partir desse trabalho, que os efeitos de surtos de sobretensão e de sobrecorrente gerados pela incidência de descargas podem afetar diversos consumidores ligados à mesma rede elétrica. Como as torres de telecomunicações tendem a concentrar a incidência de descargas no local de sua instalação, esses surtos se tornam ainda mais frequentes.



Figura 4.3: Fotografia de uma torre típica de telecomunicação instalada em área urbana próxima a consumidores residenciais.

A Figura 4.4 ilustra o sistema elétrico de alimentação da estação e proximidade, enfatizando que usualmente o neutro da concessionária é conectado ao aterramento da estação.

---

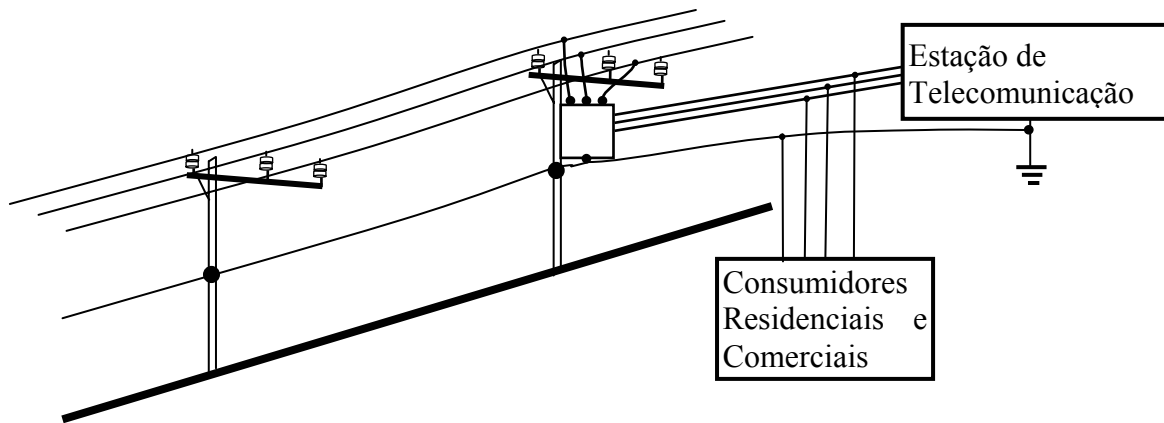


Figura 4.4: Desenho esquemático da alimentação elétrica da estação de telecomunicação e dos consumidores residenciais e comerciais.

### ***4.3.2 – A torre de telecomunicações***

As torres de telecomunicações usualmente são feitas de tubos e barras metálicos, possuem alturas da ordem de 50 m e largura de aproximadamente 50 cm de raio. A base da torre possui uma parte enterrada no solo, que alcança uma profundidade típica de 7 m. Isso confere sustentação mecânica à torre, além de atuar de forma relevante para o aterramento elétrico da estrutura.

### ***4.3.3 – O aterramento elétrico da estação***

A literatura apresenta diversos tipos de estruturas de aterramentos utilizadas em torres de telecomunicações, como as apresentadas em (Visacro et al., 1997). A estrutura de aterramento, adotada nessa dissertação como padrão, está presente em (Silveira et al., 2005) e é composta da parte da torre enterrada no solo e uma configuração de eletrodos metálicos horizontais enterrados a 0,5 m de profundidade. Contornando o poste e conectado a este, há uma configuração de eletrodos na forma de um quadrado de 4 m de lado. Na lateral oposta à conexão da torre com o quadrado, há um condutor de 1 m de extensão para interligação a outro retângulo de 6 m por 8 m. Conectado ao quadrado e ao retângulo há hastes verticais de 3 m, dispostas como mostrado na Figura 4.5. A

estrutura de aterramento possui grande influência no formato da sobretensão no sistema (estação rádio-base) gerada por descargas atmosféricas (Visacro, 2007a), sendo, assim, importante seu estudo.

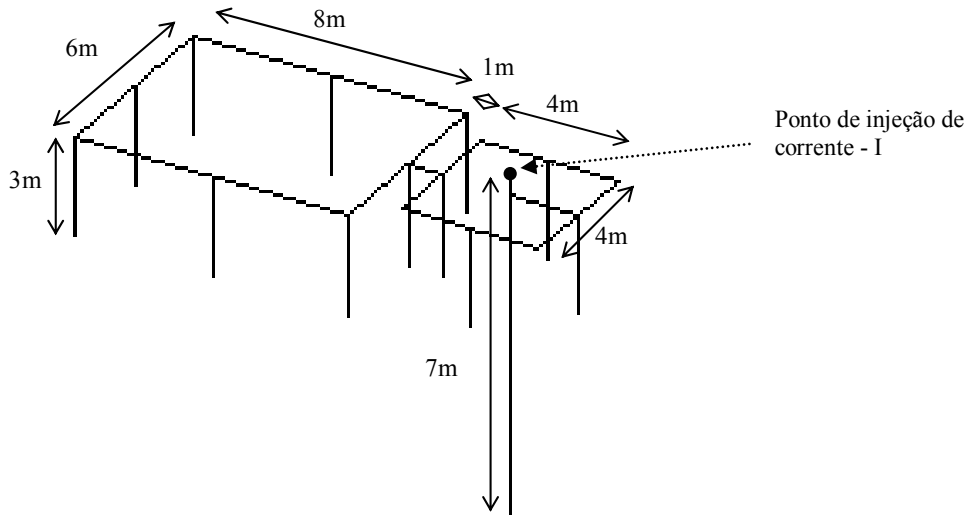


Figura 4.5: Estrutura de aterramento da torre de telecomunicação.

Para analisar a influência de cada componente do sistema nas sobretensões em estudo, foi simulada a condição da presença e da ausência de conexão do condutor neutro da rede à estrutura de aterramento da estação. Quando conectado, essa é realizada no centro do eletrodo de aterramento de 6 m mais distante da torre da estação rádio-base.

#### **4.4 – Representação da rede de distribuição simulada**

A rede de distribuição utilizada nas simulações possui dois condutores horizontais de 170 m de comprimento, o condutor fase e o neutro, sendo que o primeiro está a 7,2 m de altura e o segundo a 7 m. O condutor neutro é aterrado em três pontos, no centro e a 10 m das duas extremidades. Em cada extremidade dos condutores há um casamento de impedância, evitando que haja reflexões de correntes pelo condutor.

O aterramento do neutro é composto por uma haste vertical de 3 m de profundidade e 1 cm de diâmetro cravada no solo. Esta haste é conectada ao condutor neutro por meio de um condutor vertical de 2 cm de diâmetro. A Figura 4.6 representa o

desenho esquemático da forma simplificada da rede de distribuição de energia utilizada nas simulações.

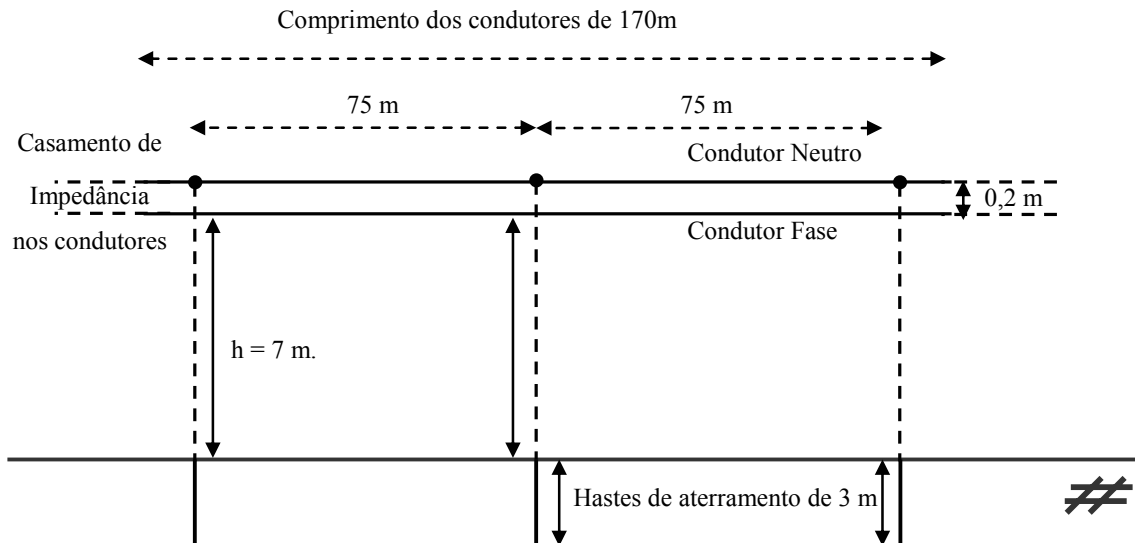


Figura 4.6: Representação da forma simplificada da rede de distribuição utilizada nas simulações.

#### ***4.5 – Processo de incidência e a propagação das ondas de corrente e tensão no sistema da estação, no solo e na estrutura da rede***

Como está detalhado no capítulo 3, durante a formação do canal de descarga, cargas negativas são deslocadas da nuvem em direção ao solo através de um canal descendente negativo. A certa altura, o campo elétrico é tão intenso que as cargas negativas do ar próximas ao solo tendem a se afastar. Com isso, ocorre a formação de um canal ascendente carregado positivamente. Esse processo tende a progredir até o encontro do canal ascendente com o descendente, a uma altura que varia entre alguns poucos metros até aproximadamente 200 m, chamado de ponto de *attachment*. A altura do ponto de *attachment* possui influência na tensão induzida por descarga atmosférica, como é apresentado no capítulo 5 dessa dissertação e na referência (Silveira et al., 2006a).

Nesta perspectiva, o item 4.5.1 apresenta a modelagem para a corrente de descarga utilizada nas simulações cujos resultados são apresentados no capítulo 5. No item 4.5.2 são abordados os efeitos que levam à sobretensão na rede próxima devida à incidência de descarga na torre de telecomunicações.

#### ***4.5.2 – Modelagem da onda de corrente***

A onda de corrente de descarga atmosférica pode ser modelada por duas ondas de corrente que inicialmente se propagam no canal a partir do ponto de *attachment*, Figura 4.7. Essas ondas são uma ascendente de +1pu (corrente positiva) e outra onda de corrente descendente de -1pu (corrente negativa). Esta representação modela o fenômeno físico das duas ondas de corrente. Utiliza-se a corrente em pu (por unidade) para facilitar a análise das curvas obtidas para os diversos valores de amplitude de descargas atmosférica. Essa modelagem é adotada para representar as duas ondas de corrente de mesma polaridade que se propagam em sentidos opostos a partir do ponto de *attachment*.

As simulações adotadas nessa dissertação consideram o potencial em um terra remoto igual a zero.

Para simular a descarga atmosférica incidindo em uma torre de telecomunicações, foi utilizada a modelagem de propagação de ondas a partir do ponto de *attachment*, separando-se o caso em duas simulações distintas, como apresentado nas Figuras 4.8 e 4.9. Posteriormente se sobrepõem os dois resultados obtidos.

A primeira simulação é a injeção de uma corrente positiva de +2pu em um trecho do canal de descarga. Este trecho inicia no ponto de *attachment* e vai até o topo da nuvem. A corrente é injetada no ponto de *attachment* e se desloca de forma ascendente até o topo da nuvem, onde é realizado um casamento de impedância para se evitar a reflexão da onda.

---

Na segunda simulação, utiliza-se a modelagem de toda a estrutura: o canal completo, a torre e o aterramento. No ponto de *attachment*, é injetada uma onda de corrente de  $-2pu$ . Esta corrente divide-se em duas de igual intensidade, uma ascendente e outra descendente. A onda de corrente ascendente desloca-se até o topo da nuvem, onde há um casamento de impedância. A onda descendente desloca-se do ponto de *attachment*, passando pela torre e atingindo o aterramento, sofrendo as devidas reflexões de onda em cada mudança de impedância do meio de propagação.

Sobrepondo-se os resultados das duas simulações, o trecho que vai do ponto de *attachment* até o topo da nuvem possuirá uma corrente ascendente de  $+2pu$  e uma corrente ascendente de  $-1pu$  provenientes, respectivamente, da primeira e da segunda simulações. Com a sobreposição destas duas correntes, obtém-se o equivalente a uma corrente de  $+1pu$  ascendente partindo do ponto de *attachment*. Como na primeira simulação não há circulação de corrente no trecho abaixo do ponto de *attachment*, verifica-se apenas a corrente da segunda simulação como corrente total circulando neste trecho. Assim, há uma corrente de  $-1pu$  descendente injetada no ponto de *attachment*. A Figura 4.7 apresenta a condição a ser simulada na modelagem do fluxo de corrente da descarga atmosférica, e as Figuras 4.8 e 4.9 demonstram os dois passos utilizados para realizar tal simulação. Desta forma, é modelado o fenômeno físico descarga atmosférica para o programa computacional HEM.

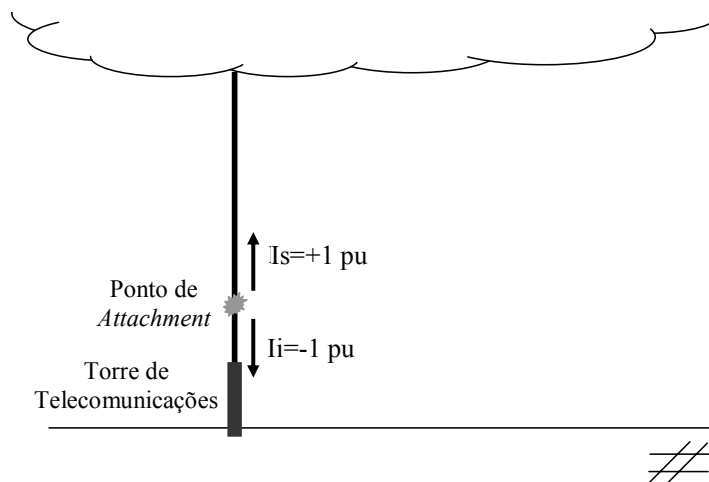


Figura 4.7: Condição de circulação de corrente a ser simulada.

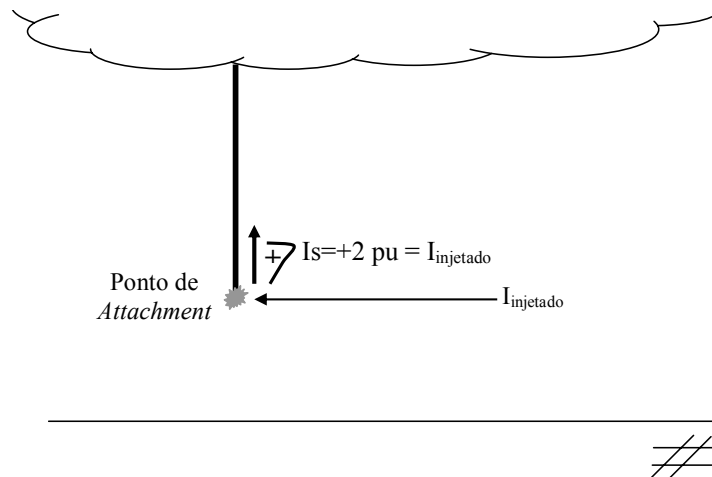


Figura 4.8: Primeira simulação - Injeção de uma corrente de +2pu no ponto de *attachment*, retirando a parte inferior do canal e a torre de telecomunicações.

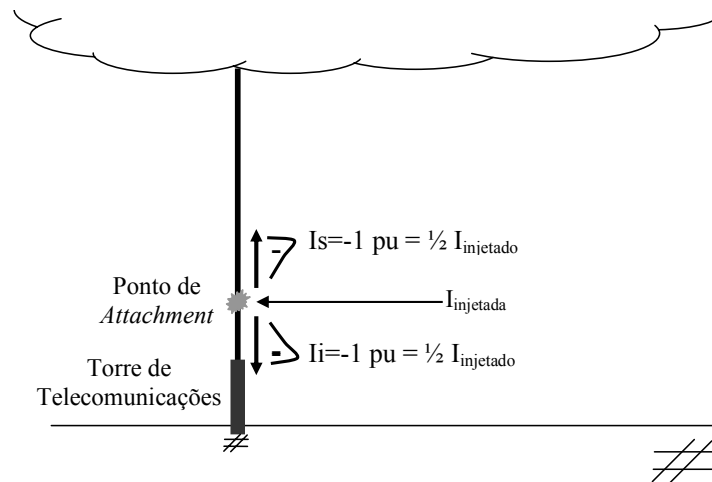


Figura 4.9: Segunda simulação - Injeção de uma corrente de -2pu no ponto de *attachment*.

### 4.5.3 – Composição da sobretensão resultante no sistema elétrico

A descarga atmosférica, quando incide próxima a uma rede de distribuição de energia, induz uma sobretensão nessa rede. A tensão induzida é proveniente do campo eletromagnético gerado pelo fluxo da corrente de retorno no canal. O campo elétrico associado pode ser decomposto em três parcelas: a parcela divergente (também chamada de parcela estática), a parcela de indução e a parcela da irradiação. A tensão induzida é quantificada pela integração do campo elétrico no espaço.

A parcela divergente do campo elétrico é inversamente proporcional ao cubo da distância da descarga ao condutor da rede ( $1/R^3$ ), como evidenciado pela equação (4.16), e está associada à carga depositada no canal. A integral da corrente na equação (4.16) é a carga elétrica do canal (Visacro, 2005a). Sendo que “ $r$ ” é a distância horizontal entre o canal de descarga e o ponto de observação, “ $R$ ” é a distância entre um segmento do canal e o ponto de observação, “ $z$ ” é altura do ponto de observação em relação ao solo, “ $z'$ ” é a altura de um segmento do canal em relação ao solo e  $H$  é a altura do canal, como pode ser observado na Figura 4.10.

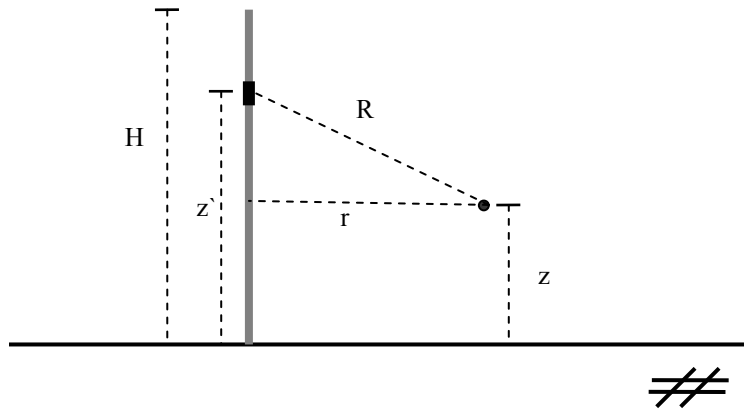


Figura 4.10: Esquema representativo da estrutura para o cálculo do campo elétrico.

$$E_r(r, z, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \frac{3r(z-z')}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau dz' \quad (4.16)$$

A parcela de Indução é inversamente proporcional ao quadrado da distância da descarga ao condutor da rede ( $1/R^2$ ) e se deve ao fluxo de corrente no canal, como pode ser deduzido a partir na equação (4.17).

$$E_r(r, z, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \frac{3r(z-z')}{cR^4} i(z', t - R/c) dz' \quad (4.17)$$

A parcela de Irradiação é inversamente proporcional à distância entre a descarga atmosférica e a rede de distribuição ( $1/R$ ) e se deve à variação da corrente elétrica no tempo, como se pode observar utilizando a equação (4.18).

$$E_r(r, z, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \frac{r(z-z')}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \quad (4.18)$$

Outro efeito relevante presente nas sobretensões geradas por descargas é a elevação de potencial causada pela corrente conduzida no solo, considerado a seguir.

No evento de incidência na torre, a corrente elétrica flui em direção ao solo e atinge o aterramento, que se comporta como uma impedância distribuída. A elevação de potencial na região do solo próxima à torre onde a corrente é injetada pode atingir valor elevado, dependendo da resistividade do solo. Como em Minas Gerais a resistividade do solo possui uma média muito alta (em torno de 2500  $\Omega.m$ ) e a sobretensão próxima às torres é usualmente muito elevada. A tensão desenvolvida no solo se distribui por uma distância da torre, que depende da dimensão do aterramento e da resistividade do solo. Caso esta alcance a região de outro aterramento, como por exemplo o de um consumidor ou o de uma rede de distribuição, pode ocorrer a injeção de uma parcela de corrente proveniente da descarga atmosférica no sistema. Sendo o condutor neutro das redes de distribuição de energia aterrado em cada poste, uma eventual elevação de potencial no solo em um desses aterramentos, poderá promover a circulação de corrente elétrica pelos demais aterramento. Essa corrente criará uma elevação da tensão fase-neutro, o que poderá, dependendo da intensidade, gerar uma ruptura do isolamento. Esse efeito é mais lento que a tensão induzida e mostra-se muito característico na forma de onda da tensão.

---

# 5 Metodologia, Resultados e Análises

## *5.1 - Introdução*

Este capítulo apresenta os casos simulados, descrevendo as variações entre as estruturas, item 5.2, e os resultados obtidos, item 5.3. Foi feita a seleção dos tipos de simulações que melhor definem a contribuição de cada elemento do sistema na sobretensão resultante na rede de distribuição.

Todas as ondas de elevação de potencial e de tensão induzida apresentadas nesse capítulo foram simuladas para o ponto central do vão da rede (ponto mais próximo da torre da estação rádio-base), com exceção das simulações em que se explicita outro ponto.

## ***5.2 – Descrição das simulações realizadas***

Visando a caracterização das sobretensões resultantes na estação de telecomunicações e na rede de distribuição próxima, foram realizadas as simulações que estão descritas neste tópico. Nestas simulações, diversos parâmetros foram variados, como o tempo de meia onda e o tempo de frente da forma de onda injetada, a topologia da rede de distribuição e a estrutura da torre de telecomunicações, incluindo seu aterramento.

### ***5.2.1 – Simulação do comportamento do aterramento da torre de telecomunicações***

Simulações foram realizadas para a obtenção da resposta do aterramento a uma onda de corrente típica de descargas atmosférica. Foi utilizada, para modelar a corrente de descarga, uma onda do tipo triangular com tempos de frente e de meia onda iguais a, respectivamente,  $1 \mu\text{s}$  e  $50 \mu\text{s}$  ( $1/50 \mu\text{s}$ ). O ponto de injeção da corrente de descarga foi a base da torre de telecomunicações, como pode ser observado na Figura 5.1. Foram considerados como eletrodos de aterramento a parte da torre metálica abaixo da superfície da terra e os demais condutores enterrados no solo. Variou-se a resistividade do solo em 100, 500, 1000, 2500 e 5000  $\Omega\cdot\text{m}$  e a permissividade relativa do mesmo em 10 e 100. A elevação de potencial em relação ao terra remoto foi determinada no ponto de injeção da corrente.

Essas simulações são denominadas de “**Simulações 1**”.

---

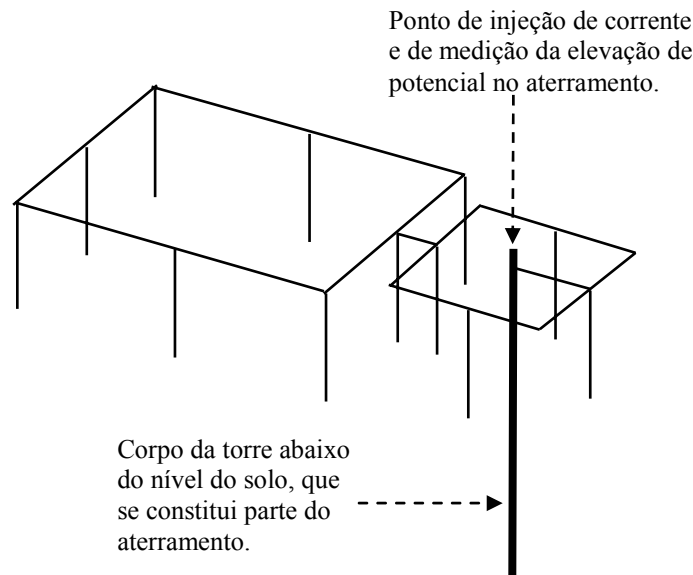


Figura 5.1: Estrutura de aterramento da torre de telecomunicações, ressaltando o ponto de injeção de corrente.

### 5.2.2 – Simulação do efeito da tensão induzida

Para caracterizar o efeito puramente da tensão induzida provocada pelo fluxo da corrente de retorno, como exemplo de estudo, simularam-se os casos em que havia um condutor vertical, semelhante a um canal de descarga de 1800 metros de comprimento e uma rede de distribuição representada por um condutor horizontal. Variou-se o comprimento desse condutor em 300 m e em 600 m, e considerou-se que as ondas de corrente aplicadas no canal foram de  $1/50 \mu\text{s}$  e  $4/80 \mu\text{s}$ . A rede de distribuição está centrada a uma distância de 50 metros do canal de descarga e a 10 metros de altura, como mostra a Figura 5.2. Esses valores foram escolhidos para exemplificar e modelar o fenômeno físico da descarga. Como pontos de cálculo da tensão induzida no condutor horizontal, utilizaram-se os do centro e da extremidade do condutor horizontal. Foram individualizadas as contribuições do campo elétrico não-conservativo e do campo conservativo. Considerou-se a injeção de corrente na base do canal. Como não havia estrutura de aterramento, a onda fluiu inteiramente de forma ascendente.

Essas simulações foram intituladas como “**Simulações 2**”.

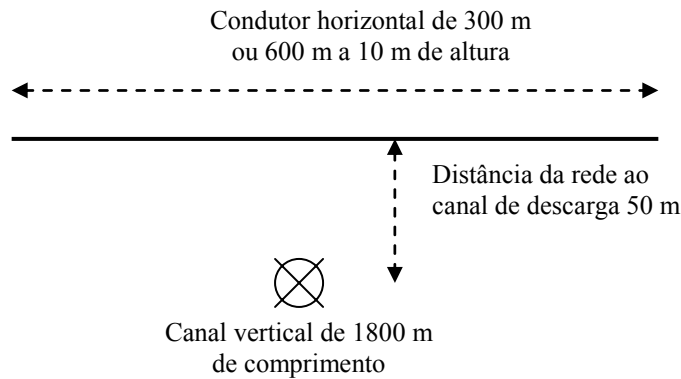


Figura 5.2: Representação esquemática das simulações de tensão induzida em um condutor horizontal devido a uma corrente fluindo em um condutor vertical.

### 5.2.3 – Simulação da rede de distribuição com dois condutores

Foram realizadas simulações que representam de forma mais completa o sistema de telecomunicações e a rede de distribuição, incluindo o efeito do ponto de *attachment* presente na descarga atmosférica única ou primeira. Para tal, utilizou-se uma estrutura de rede de distribuição de energia composta por um condutor fase e um condutor neutro. O neutro foi aterrado em três pontos (no ponto central e a 10 m de suas extremidades) – estrutura citada no capítulo 4 e representada na Figura 5.4. Nessa rede, o neutro está a uma altura de 7,2 m em relação ao solo e o condutor fase está a 0,2 m abaixo daquele. Os condutores possuem 170 m de comprimento e estão centrados em relação à estação de telecomunicações que, por sua vez, está a 20 m de distância do centro destes. Essas simulações foram realizadas com e sem a presença de cargas entre o neutro e a fase na rede. As cargas utilizadas foram representadas por três resistências concentradas de 30  $\Omega$ , instaladas no centro e a 10 m das duas extremidades dos condutores. Esses valores foram escolhidos para exemplificar e modelar o fenômeno físico da descarga.

Para avaliar a forma de onda de tensão resultante no centro de uma rede de distribuição de dois condutores, proveniente de uma descarga atmosférica incidindo no topo de uma torre de telecomunicações de 50 m de altura, simularam-se as injeções de ondas de corrente de 1/50  $\mu\text{s}$  e 4/80  $\mu\text{s}$ , conforme a metodologia descrita nesse item. A descarga foi composta por um canal vertical que se inicia no topo da torre e se propaga em linha reta até 1050 m de altitude, como pode ser observado na Figuras 5.3. A altura

do ponto de *attachment* utilizada foi de 150 m. As resistividades do solo utilizadas foram de 100 e 1000  $\Omega$ .m, e os valores de permissividade relativa do mesmo foram de 10 e de 100. Foram simulados tanto a estrutura completa representada pela Figura 5.6, quanto retirando a conexão entre o condutor neutro e a estrutura de aterramento (essa conexão será melhor descrita nas “**Simulações 4**”)

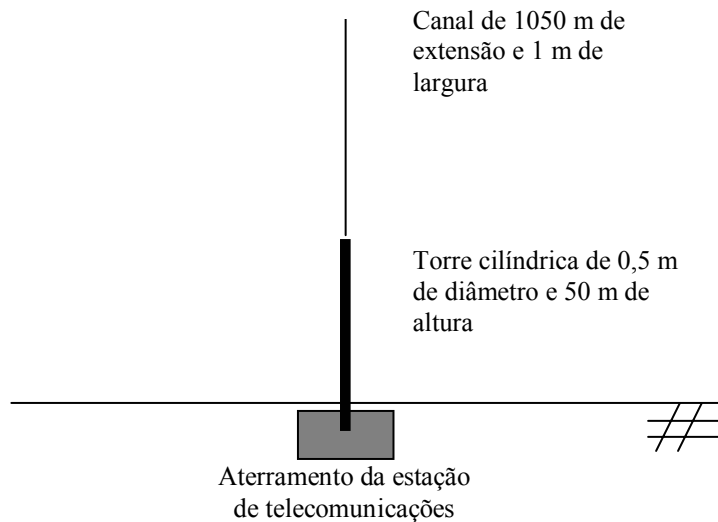


Figura 5.3: Representação esquemática do canal de descarga e da estrutura da torre de telecomunicações com seu aterramento – vista lateral.

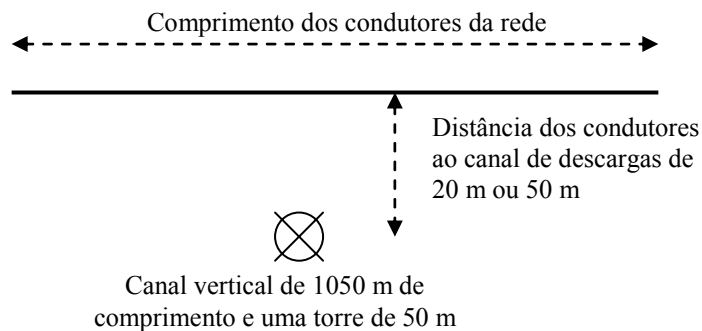


Figura 5.4: Representação esquemática da rede de distribuição e da torre com o canal de descarga – vista superior.

Os condutores da rede foram casados em suas extremidades. As simulações para as condições citadas, inserindo três cargas de 30  $\Omega$  na rede, conforme mostrado na Figura 5.5, são designadas como “**Simulações 3**”.

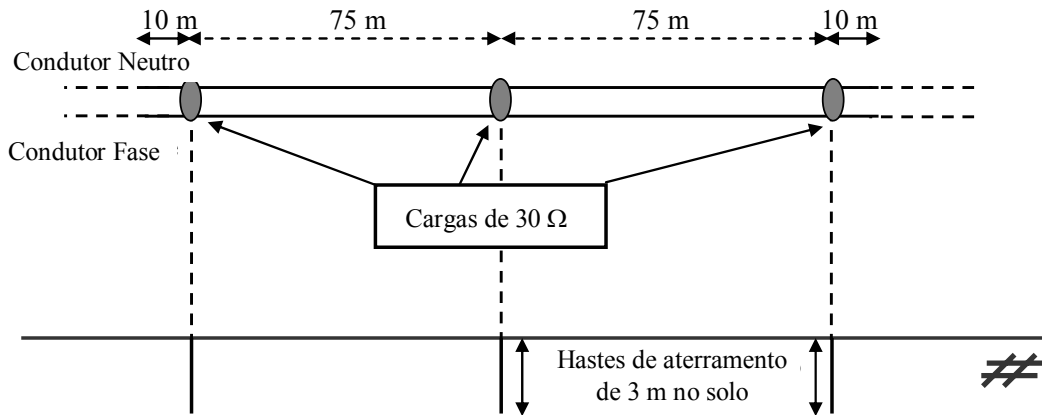


Figura 5.5: Imagem representativa da rede de distribuição com as três cargas de  $30 \Omega$  utilizada nas “Simulações 3”.

Visando a análise da influência da conexão entre o neutro da rede de distribuição ao aterramento da estação, foram simuladas as mesmas condições estabelecidas como “**Simulações 3**”, entretanto, foram retiradas as cargas da rede. A conexão da rede à estação ocorreu de forma aérea, interligando o ponto central do condutor neutro ao aterramento da torre. Essa conexão ocorreu por meio de um condutor instalado a 7,2 m de altura, estendendo-se em linha reta por 9 m, onde há uma descida vertical de 7,7 m para atingir o eletrodo de aterramento da estação, como demonstra a Figura 5.6. Nessas simulações foram utilizadas as resistividades do solo de 100 e 1000  $\Omega.m$ , uma permissividade relativa de 10 e retiraram-se as cargas da rede. A onda de corrente foi de  $1/50 \mu s$ . Essas simulações foram intituladas como “**Simulações 4**”.

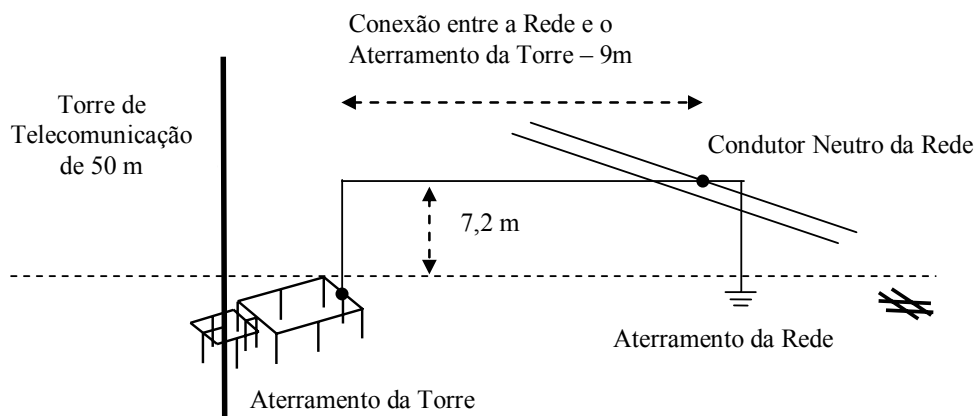


Figura 5.6: Representação da estação de telecomunicações e da rede de distribuição. Em destaque a conexão entre o aterramento da torre e o neutro da rede, condições presentes nas “Simulações 3 e 4”.

Nas demais simulações descritas a seguir, foi retirada a conexão do condutor neutro da rede ao aterramento da estação. Foi adotada essa metodologia para enfatizar nas simulações os efeitos dos outros elementos do sistema.

Foram realizados estudos de uma configuração mais simplificada do sistema, para que assim seja avaliada a influência de cada um dos parâmetros mais relevantes na sobretensão. Repetiram-se, então, as “Simulações 3” retirando as cargas da rede ao aterramento da estação. Essas simulações foram denominadas como “**Simulações 5**”.

Variou-se, ainda, a distância entre a torre de telecomunicações (ponto no qual ocorre a incidência da descarga atmosférica) e a rede de distribuição (elemento de interesse nos estudos). As distâncias escolhidas para se caracterizar a influência desse parâmetro foram de 20 m, valor padrão utilizado em grande parte das simulações, e de 50 m. Para se efetuar as devidas comparações entre as duas distâncias, injetaram-se ondas de descarga de 1  $\mu$ s de tempo de frente e 50  $\mu$ s de tempo de meia-onda na torre e variou-se a resistividade do solo em 100 e 1000  $\Omega$ .m. Essas simulações foram designadas como “**Simulações 6**”.

Simulou-se, também, o efeito da variação da altura do ponto de *attachment*. Para tal, foram utilizadas as alturas de 150 m, padrão nas outras simulações, e de 300 m. Com esses valores, analisou-se a influência deste parâmetro na tensão induzida e na elevação de potencial devida ao fluxo de corrente pelo solo. Essas simulações foram aqui chamadas de “**Simulações 7**”.

Para ponderar o efeito da variação do tamanho do vão da rede de distribuição, foram alterados os comprimentos de seus condutores, para o comprimento de 340 m. Essas simulações são designadas nesse e nos demais capítulos como “**Simulações 8**”.

Como último estudo, para se obter separadamente os efeitos provenientes da tensão causada pela corrente conduzida no solo e da induzida, simularam-se casos com a estrutura de aterramento típica e com o aterramento substituído por uma resistência concentrada ligada a um terra virtual (ponto de potencial zero). Nessa condição deixa de ocorrer a elevação de potencial no solo, uma vez que não há corrente injetada pelo

---

aterramento elétrico da estação fluindo no solo. Os valores utilizados para as resistências concentradas foram escolhidos a partir das simulações realizadas no item 5.3.1 desse trabalho, no qual foi injetada uma onda de corrente diretamente na estrutura do aterramento. Analisaram-se as formas de ondas de tensão no tempo e na frequência, e foram determinados, por aproximação, os valores ideais de resistência de aterramento a serem utilizados nas simulações. Para a resistividade de solo de 100, 1000 e 2500  $\Omega.m$  foram escolhidas, respectivamente, as resistências de 5, 30 e 80  $\Omega$ . Essas últimas simulações foram nomeadas como “**Simulações 9**”.

A partir dessa modelagem e das variações dos parâmetros da rede e da descarga, foram obtidas as simulações presentes no item 5.3, que são designadas por “Simulações 3” às “Simulações 9”, como evidenciado na tabela I desse capítulo. A tabela também contempla um resumo das “Simulações 1” e “Simulações 2” apresentadas nos itens 5.2.1 e 5.2.2.

Tabela I – Resumo das simulações presentes no item 5.3.

<p><b>Simulações 1</b> – Ondas de corrente injetadas diretamente na estrutura de aterramento típica de torres de telecomunicações. Foram utilizadas nas simulações valores de resistividade do solo de 100, 250, 500, 1000, 2500 e 5000 <math>\Omega.m</math> e permissividade relativa de 10 e 100. A onda de corrente injetada é uma onda tipo triangular de 1/50 <math>\mu s</math>. O ponto de injeção da corrente foi na base da torre, a qual possui 7 m de comprimento abaixo do nível do solo. Os valores de tensões apresentados a partir dessas simulações foram obtidos no mesmo ponto de injeção da corrente.</p>
<p><b>Simulações 2</b> – Simulação da tensão induzida proveniente de um pulso de corrente se propagando por um condutor retilíneo vertical, partindo do solo e atingindo uma altitude de 1800 m. Os pontos nos quais se apresentaram valores de tensão foram no centro e nas extremidades de um condutor horizontal posicionado a 10 m de altura em relação ao solo. Utilizaram-se os comprimentos do condutor horizontal de 300 m e de 600 m e as distâncias do centro desses ao condutor vertical de 50 e de 100 m. Os condutores receberam casamentos de impedância em suas extremidades. Injetaram-se ondas de corrente elétrica de 1/50 <math>\mu s</math> e 4/80 <math>\mu s</math>. Os valores de tensões apresentados a partir dessas simulações correspondem ao centro e às extremidades do condutor horizontal.</p>
<p><b>Simulações 3</b> – Simulação da onda de tensão resultante no centro de uma rede de distribuição de dois condutores, proveniente de uma descarga atmosférica incidindo no topo de uma torre de telecomunicações de 50 m de altura. A descarga é composta por um canal vertical que se inicia no topo da torre e se propaga em linha reta até 1050 m de altura. A rede de distribuição, a torre, o aterramento da torre e a modelagem do canal de descarga estão descritos no capítulo 4 dessa dissertação. A distância da torre de telecomunicações ao condutor da rede, o comprimento do condutor e a altura do ponto de <i>attachment</i> são, respectivamente, 20 m, 170 m e 150 m. As ondas de corrente injetadas foram de 1/50 <math>\mu s</math> e 4/80 <math>\mu s</math>. Os condutores da rede foram casados em suas extremidades. A rede de distribuição possui três cargas de 30 <math>\Omega</math> entre o condutor fase e o neutro. Foi considerada a condição com e sem a conexão do neutro da rede ao aterramento da estação. Uma carga é colocada no centro da rede de distribuição e as outras duas a 10 m de distância de cada extremidade, pontos em que há descidas com aterramentos, como pode ser observado na Figura 5.5.</p>
<p>- Para as simulações de 3 a 9, utilizaram-se em todos os casos as resistividades do solo de 100 e 1000</p>

<p><math>\Omega.m</math> e os valores de permissividade relativa do mesmo foram de 10 e de 100. Em algumas condições foram utilizados também outros valores de resistividade.</p>
<p><b>Simulações 4</b> – Refizeram-se as “simulações 3” mantendo a conexão do centro do condutor neutro no aterramento da torre de telecomunicações, essa conexão foi realizada por um condutor aéreo de 9 m. Nessa simulação não foram utilizadas cargas na rede.</p>
<p><b>Simulações 5</b> – Foi simulada novamente a condição descrita como “Simulação 3”, retirando as cargas da rede de distribuição. Foram utilizadas, para tal, as resistividades do solo de 100, 250, 500, 1000, 2500 e 5000 <math>\Omega.m</math>.</p>
<p><b>Simulações 6</b> – Repetiram-se as “simulações 5” aumentando a distância do poste ao centro do condutor da rede de distribuição, que anteriormente era de 20 m, para 50 m.</p>
<p><b>Simulações 7</b> – Foram refeitas as “simulações 5” alterando o ponto de <i>attachment</i>, que anteriormente era de 150 m de altura em relação ao solo para 300 m.</p>
<p><b>Simulações 8</b> – Repetiram-se as “simulações 5” substituindo os condutores da rede de distribuição que eram de 170 m por condutores de 340 m.</p>
<p><b>Simulações 9</b> – Simularam-se novamente os casos já citados nas “simulações de 3 a 8” apenas para a resistividade de 1000 <math>\Omega.m</math>, separando os efeitos gerados na rede pela tensão induzida e pela tensão devida ao fluxo de corrente elétrica conduzida no solo.</p>

No item a seguir, apresentam-se os resultados obtidos durante esse trabalho, que se encontram em tabelas e em gráficos representativos sobre o efeito da descarga atmosférica incidindo em estações rádio-base próximas de redes de distribuição.

### 5.3 – Resultados

Para realizar a análise das sobretensões em estudo, inicialmente foi simulado o comportamento apenas do aterramento elétrico da estação frente à injeção de uma onda de corrente de descarga (item 5.3.1). Com isso, obteve-se a elevação de potencial no solo causada por esta corrente. Posteriormente avaliou-se o efeito apenas da tensão induzida em um condutor horizontal devido a uma corrente de descarga, condição simplificada de uma rede de distribuição (item 5.3.2). Visando uma análise mais complexa, foi utilizado o modelo de rede de distribuição apresentado no item 5.2, nas condições com e sem cargas entre os condutores fase e neutro (respectivamente os itens 5.3.3 e 5.3.5). O item 5.3.4 apresenta a simulação comumente presente de alimentação das estações rádio-base na qual há uma interligação entre o condutor neutro da rede e o aterramento da torre. Os demais itens desse capítulo, 5.3.6 a 5.3.9, contêm as simulações julgadas como imprescindíveis para uma análise de sensibilidade

conclusiva, variando entre os itens os parâmetros mais relevantes no efeito das sobretensões na rede de distribuição. Nessas últimas simulações não se conectou o condutor neutro da rede ao aterramento da torre. Essa condição se fez necessária para uma melhor visualização da influência da variação dos citados parâmetros.

### 5.3.1 – Comportamento do aterramento da estação

Os resultados referentes às sobretensões correspondente às “**Simulações 1**”, descritas no tópico 5.2, são apresentados separadamente nas Figuras 5.7 e 5.8 para facilitar a visualização, sendo que se separaram as resistividades do solo em 100, 250 e 500  $\Omega.m$ , e em 1000, 2500 e 5000  $\Omega.m$  respectivamente. Foram utilizadas as permissividades relativas do solo de 10 e de 100. No entanto, para os valores de resistividades de 250  $\Omega.m$  e de 2500  $\Omega.m$ , as curvas de permissividade relativa de 10 não foram indicadas nessas figuras, por manterem o mesmo padrão de progressão das demais resistividades. Para facilitar a análise dos atrasos e distorções das ondas de sobretensão, foi inserida nas figuras a curva de corrente injetada.

A partir das curvas de tensão foram obtidos os valores aproximados das impedâncias ( $Z_p$ ) representativas da estrutura de aterramento da torre para as diferentes condições simuladas. Esses valores foram utilizados no item 5.3.9.

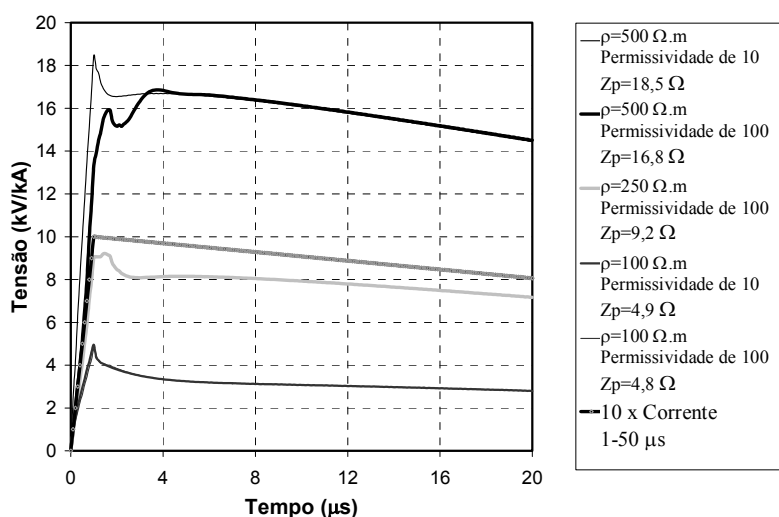


Figura 5.7: Tensão resultante no aterramento para a injeção de corrente de descarga diretamente na estrutura de aterramento ( $\rho=100$  e  $500 \Omega.m$  para um  $\epsilon_r=10$  e  $100$  e  $\rho=250 \Omega.m$  para um  $\epsilon_r=100$ ). As curvas de resistividade de  $100 \Omega.m$  praticamente se sobrepuseram.

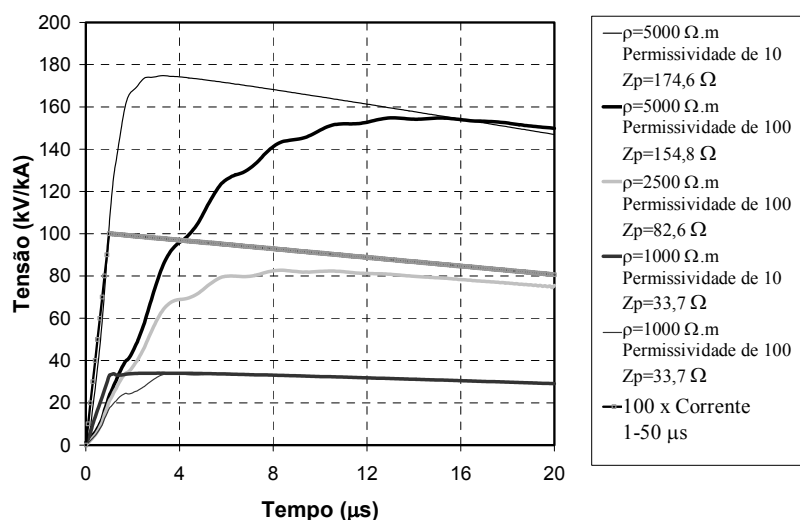


Figura 5.8: Tensão resultante no aterramento para a injeção de corrente de descarga diretamente na estrutura de aterramento ( $\rho=1000$  e  $5000 \Omega.m$  para um  $\epsilon_r=10$  e  $100$  e  $\rho=2500 \Omega.m$  para um  $\epsilon_r=100$ ).

As curvas que possuem permissividade relativa do solo de 10 e de 100 se mostram muito semelhantes para baixos valores de resistividade do solo ( $100 \Omega.m$ ). Entretanto, com o valor de resistividade do solo mais elevado, as curvas tornam-se discrepantes nos primeiros microssegundos. As formas de onda de tensão obtidas para a permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) de 100 possuem um atraso para atingir o valor de pico, se comparadas às ondas de  $\epsilon_r=10$ . Isto se explica pelo aumento do efeito capacitivo em relação ao efeito resistivo e indutivo, causado pela elevação da  $\epsilon_r$  solo. O resultado se expressa pelo adiantamento da onda de corrente em relação à onda de tensão e pela redução do valor de pico de tensão, com conseqüente diminuição da impedância impulsiva do aterramento. Surgem, assim, discrepâncias nas formas de onda da tensão nos primeiros microssegundos para as mesmas resistividades do solo, diferenciando-se em tempo e amplitude de pico.

### 5.3.2 – Avaliação preliminar da tensão induzida num condutor horizontal único, por uma corrente fluindo por um canal vertical, injetada a partir de sua base

A Figura 5.9 apresenta os resultados referentes às “**Simulações 2**”, que correspondem à tensão induzida em um condutor retilíneo e horizontal de 300 m de comprimento e 10 m de altura. Esses valores foram escolhidos como exemplo de possível topologia de um condutor de rede de distribuição.

A tensão induzida no condutor da rede foi medida em três pontos: no centro e nas extremidades (nomeadas como *a* e *b*) do condutor. Foram separadas as contribuições relativas ao campo conservativo (tensão nodal - VN) e ao campo não-conservativo (NC), como indicado na Figura 5.9.

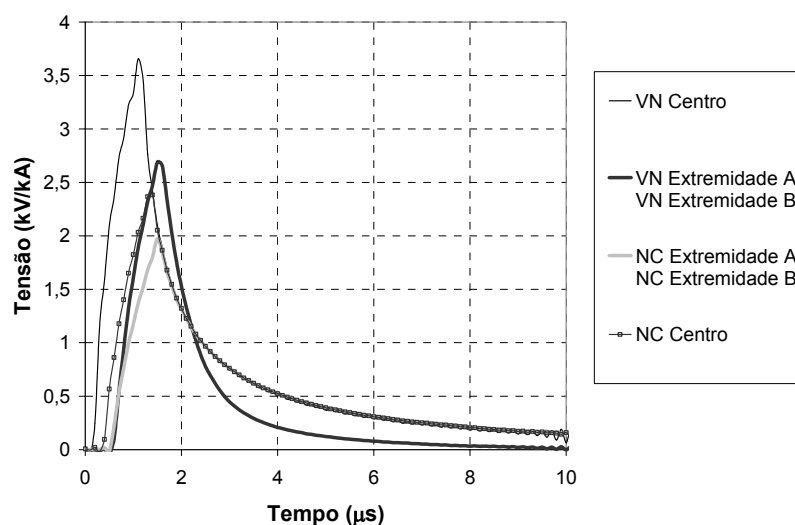


Figura 5.9: Forma de onda de tensão nodal (VN) e tensão devida ao campo não-conservativo (NC) no centro e nas extremidades de um condutor horizontal de 300 m de comprimento.

Os valores de “VN” e de “NC” são idênticos nas duas extremidades devido à simetria do sistema. O valor da sobretensão em um ponto da rede de distribuição, tal como apresentado no capítulo 4, é o somatório do valor das duas contribuições de tensões, “VN” e “NC”. Na Figura 5.10 é apresentado o valor da sobretensão efetiva no condutor, “VN”+“NC”.

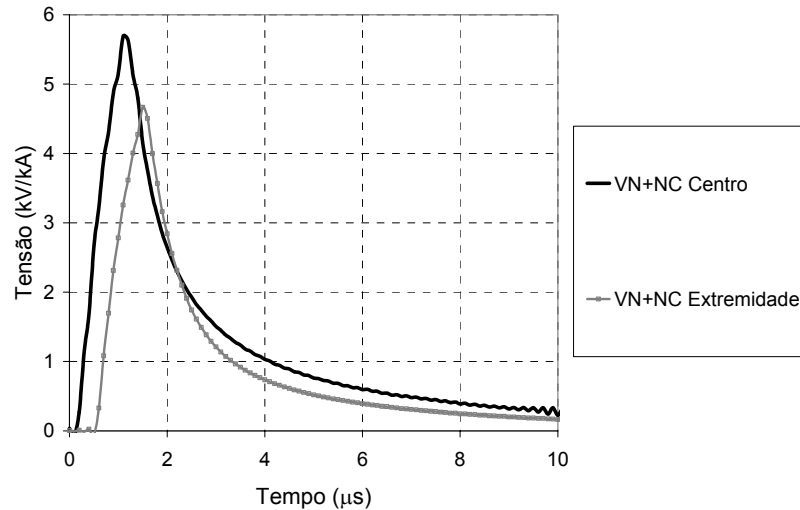


Figura 5.10: Sobretensão total no centro e na extremidade do condutor horizontal de 300 m, Tensão nodal (VN) + Tensão devido ao campo não-conservativo (NC).

Os valores de tensão causados pelos campos conservativo (potencial nodal) e não-conservativo apresentam valores mais elevados no ponto central do condutor. Isso se deve a uma maior proximidade do centro do condutor em relação à descarga atmosférica. Como as extremidades estão mais distantes da descarga atmosférica do que o centro, os seus valores de pico de onda de tensão ocorrem com um atraso em relação aos tempos de pico da tensão no centro, como pode ser observado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Amplitudes e tempos de pico da tensão nodal (VN) e da tensão devida ao campo não-conservativo (NC) no centro e nas extremidades de um condutor horizontal.

Ondas de Tensão	Valor de Tensão de Pico (kV/kA)	Valor estimado para uma corrente de 30 kA <sup>1</sup> (kV)	Tempo de Frente (μs)
Tensão nodal centro	3,65	110	1,1
Tensão nodal extremidades A / B	2,7	81	1,5
Tensão não-conservativa centro	2,4	72	1,4
Tensão não-conservativa extremidades A / B	2	60	1,5

<sup>1</sup> Valor mediano para a corrente da primeira descarga atmosférica, medido por Berger (Berger, 1975).

A Figura 5.11 apresenta a simulação das sobretensões causadas por descargas retilíneas próximas de um condutor horizontal de 300 m e de 600 m, com 10 m de altura e uma distância de 50 m de seu ponto central à descarga, “Simulações 2” do item 5.2. Essas curvas permitem avaliar o efeito do comprimento da rede de distribuição na amplitude da tensão induzida. Nesta simulação, foram utilizadas ondas de corrente tomando como base os parâmetros de descarga presentes no capítulo 3, ondas de 1  $\mu$ s de tempo de frente por 50  $\mu$ s de tempo de meia onda e 4  $\mu$ s de tempo de frente por 80  $\mu$ s de tempo de meia onda.

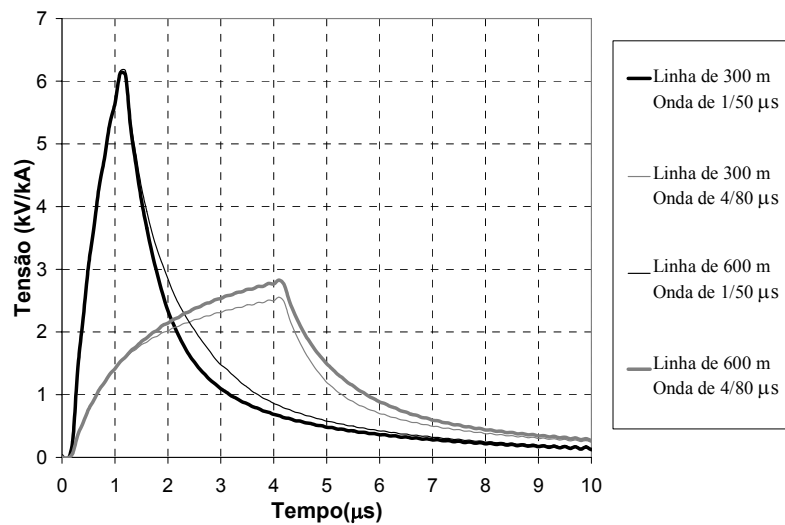


Figura 5.11: Tensão induzida no centro de um condutor horizontal de uma rede de 300 m e de 600 m com ondas de corrente de descarga de 1/50  $\mu$ s e de 4/80  $\mu$ s.

Observa-se, pela análise da Figura 5.11, que, para ondas de 1/50  $\mu$ s, ocorre uma maior sobretensão se comparada com as ondas de 4/80  $\mu$ s. Isso se deve ao aumento da amplitude das componentes de frequência mais elevadas da descarga, o que contribui de forma representativa para o aumento da tensão induzida. Esse aumento é devido, principalmente, à parcela de irradiação da tensão induzida, que é diretamente proporcional à derivada da onda de corrente.

Para as ondas rápidas, há pouca diferença entre a tensão induzida nos condutores de 300 m e de 600 m, e essa se mostra relevante apenas a partir de 2  $\mu$ s. O acréscimo no condutor de 300 m para 600 m está mais distante do canal de descarga (distância entre 158 m e 304 m do canal) em relação ao trecho inicial de 300 m (distância entre 50 m e 158 m do canal). Com isso há um retardo na contribuição do trecho acrescido no

condutor para a sobretensão no centro do mesmo, como mostra a Figura 5.12. Como a sobretensão devida ao acréscimo no condutor da rede ocorre após o pico da onda, essa contribuição mostra-se pouco relevante em danos gerados no sistema.

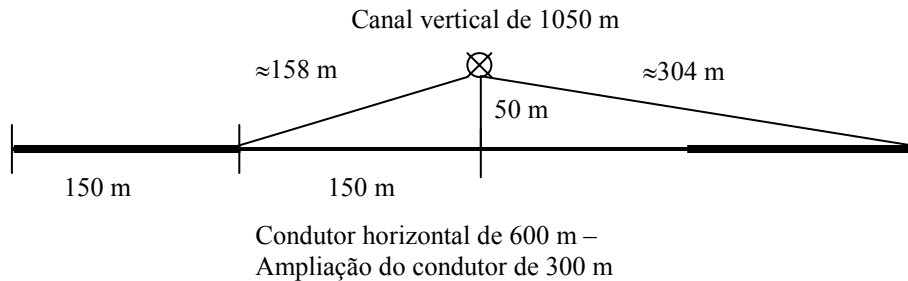


Figura 5.12: Comparação da ampliação do condutor horizontal de 300 m para 600 m, destacando a distância desse à torre de telecomunicações.

Para as ondas lentas ( $4/80 \mu\text{s}$ ), uma diferença significativa foi observada nos picos das ondas para os dois comprimentos de condutor. Como os picos das sobretensões ocorrem após  $2 \mu\text{s}$ , o efeito causado pelo aumento do comprimento do condutor é percebido durante a elevação da sobretensão.

### 5.3.3 – Sobretensão em uma rede de distribuição de dois condutores com carga

A Figura 5.13 e 5.14 apresentam os valores de sobretensão nos condutores da rede, resultados obtidos nas “**Simulações 3**”. O comprimento dos condutores, o ponto de *attachment* e a distância do centro do condutor à torre são, respectivamente, de 170 m, 150 m e 20 m. O canal de descarga foi simulado como um percurso vertical de 1050 m de altura, que se inicia no alto de uma torre de 50 m. A onda de corrente injetada é uma função triangular de  $1/50 \mu\text{s}$ . Entre o condutor fase e o neutro da rede foram inseridas três cargas de  $30 \Omega$ . Uma carga foi posicionada na região central junto ao aterramento e as demais a 10 m de cada extremidade. Os resultados obtidos se referem a solos com resistividade de 100 e de  $1000 \Omega\cdot\text{m}$ . A Figura 5.13 possui a estrutura mais completa simulada, contendo a conexão entre o condutor neutro e o aterramento da estação.

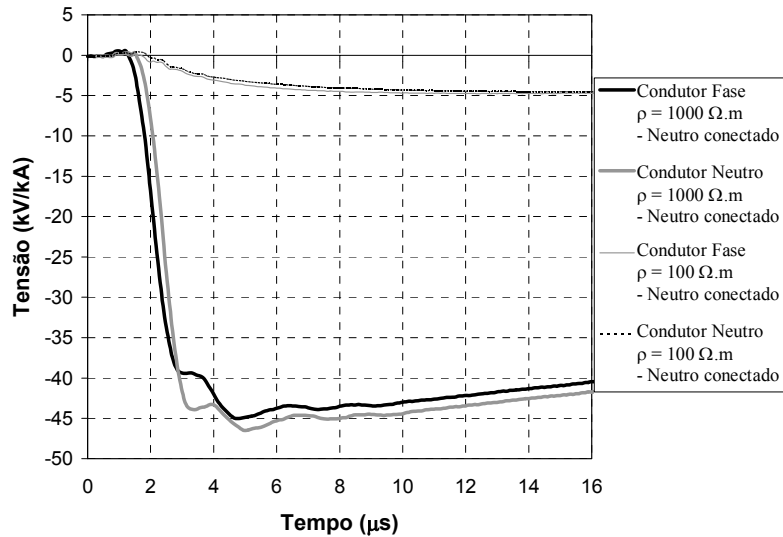


Figura 5.13: Sobretensão no condutor fase e no neutro da rede de distribuição com cargas, com a conexão entre o neutro e o aterramento da estação, decorrentes de uma descarga atmosférica próxima ( $\rho = 100$  e  $1000 \Omega.m$  -  $\epsilon_r = 100$ ).

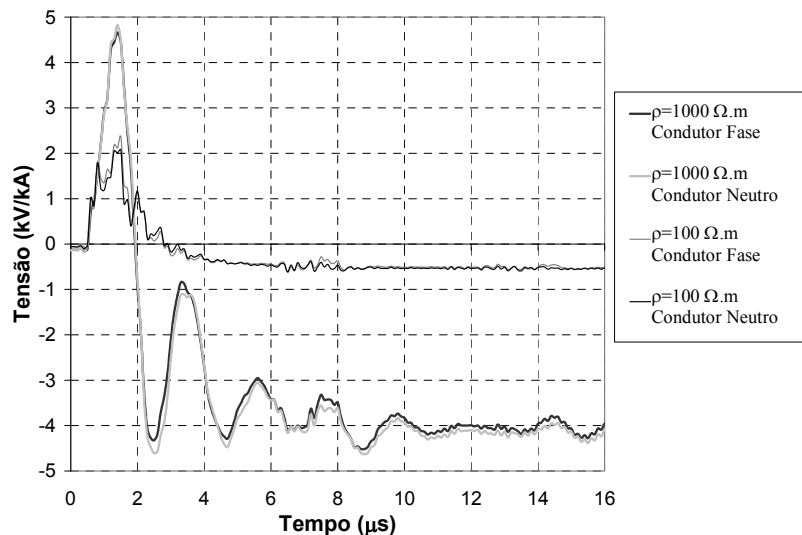


Figura 5.14: Sobretensão no condutor fase e no neutro da rede de distribuição com cargas, sem a conexão ao aterramento, decorrentes de uma descarga atmosférica próxima ( $\rho = 100$  e  $1000 \Omega.m$  -  $\epsilon_r = 100$ ).

Na Figura 5.13 observa-se a amplitude da sobretensão no condutor fase e no neutro, atingindo um valor de pico superior a 45 kV por 1 kA de corrente de descarga ( $\rho = 1000 \Omega.m$ ). As curvas de mesma resistividade possuem formatos semelhantes, assim como valores de pico de tensão. Para o solo de  $\rho = 100 \Omega.m$ , houve uma redução da sobretensão aproximadamente proporcional a da resistividade, tendo um valor

próximo de 5 kV/kA (aproximadamente 10 vezes inferior à condição de  $\rho = 1000 \Omega.m$ ). Isso demonstra a dependência da elevação de potencial da rede com a resistividade do solo. Para realizar a análise das contribuições na sobretensão devidas a cada elemento do sistema composto pela torre de telecomunicações e a rede de distribuição, foram simuladas estruturas mais simples que serão apresentadas a seguir.

Para analisar os resultados desta simulação, julgou-se relevante compará-los com os da “Simulação 5”<sup>2</sup> (condição de ausência de carga na rede). Com a inserção das três cargas de  $30 \Omega$  distribuídas na rede, observa-se uma aproximação dos valores de sobretensões no neutro e na fase em relação aos valores das “Simulações 5”, Figura 5.15 e Tabela 5.2. Os valores das tensões fase-neutro se reduzem devido à circulação de corrente entre os condutores fase e neutro, o que tende a aproximar os valores de tensão.

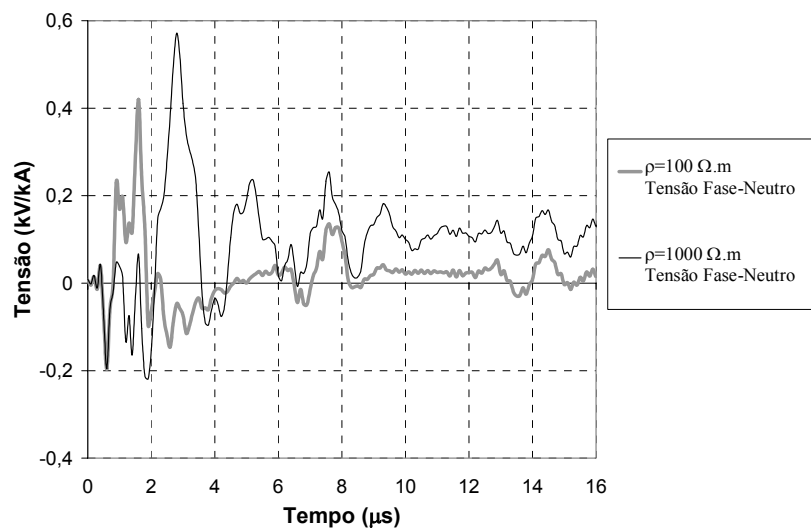


Figura 5.15: Sobretensão fase-neutro da rede de distribuição com carga, decorrente de uma descarga atmosférica próxima ( $\rho = 100$  e  $1000 \Omega.m$ . -  $\epsilon r = 100$ ).

A Figura 5.16 apresenta uma comparação entre a tensão no condutor fase e no condutor neutro com a resistividade de solo de  $1000 \Omega.m$  para uma rede de distribuição com e sem carga (simulações 3 e 5).

<sup>2</sup> Os resultados completos das “Simulação 5” são apresentados no item 5.3.5.

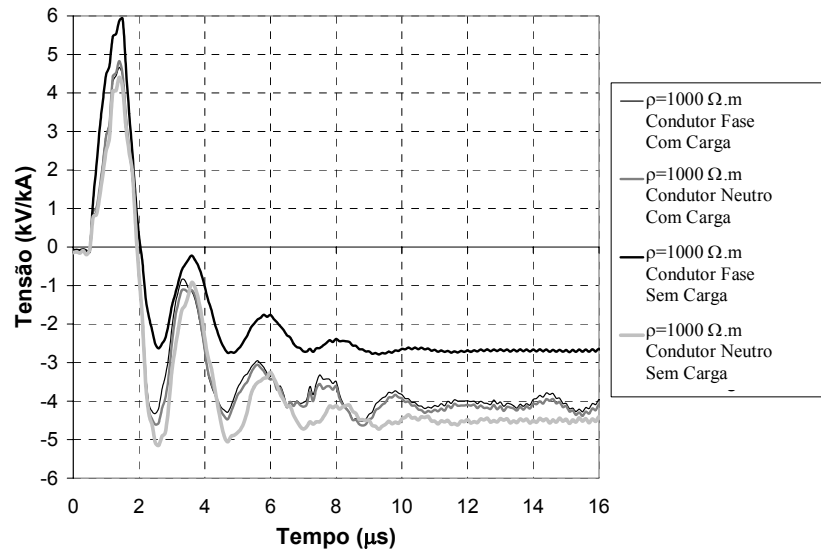


Figura 5.16: Comparação entre a sobretensão na rede sem carga e com carga entre os condutores ( $\rho = 1000 \Omega.m$ ).

A Tabela 5.2 apresenta a análise realizada a partir das Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, ressaltando a redução da tensão fase-neutro para a condição com carga na rede.

Tabela 5.2: Comparação da tensão fase-neutro para uma rede de distribuição com e sem carga.

Presença de carga na rede de distribuição	Resistividade do solo ( $\Omega.m$ )	Tensão de pico fase-neutro (KV/kA)	Tensão aproximada após 10 $\mu s$ (kV/kA)
Com carga	100	0,42	0,03
Com carga	1000	0,57	0,12
Sem carga	100	2,98	0,2
Sem carga	1000	1,97	1,8

Com a inserção das cargas na rede, as ondas de sobretensão nos condutores fase e neutro tendem a se igualar em um valor superior à onda de sobretensão no condutor neutro na condição de ausência de carga (“Simulações 5”) e inferior à onda de sobretensão na fase nessa mesma condição. Por exemplo, inserindo as três cargas de  $30 \Omega$ , o valor de pico da onda de tensão no condutor fase com uma resistividade do solo de  $1000 \Omega.m$  se reduz de  $6 \text{ kV/kA}$  para  $4,7 \text{ kV/kA}$ , e a tensão no condutor neutro, para as mesmas condições, se eleva de  $4,4 \text{ kV/kA}$  para  $4,8 \text{ kV/kA}$ . Esse efeito promove a redução do valor da tensão fase-neutro na condição com carga.

### 5.3.4 – Sobretensão em uma rede de distribuição sem carga com dois condutores, e o neutro conectado ao aterramento da torre

Foram repetidas as simulações e condições estabelecidas no item 5.3.3, entretanto, inseriu-se no sistema uma conexão entre o condutor neutro da rede de distribuição e o aterramento da torre de telecomunicações. Essa condição é comumente observada na alimentação das estações, e foram nomeadas nesse capítulo como “**Simulações 4**”. A conexão da rede à estação ocorre de forma aérea, partindo do centro do condutor neutro a 7,2 m de altura, deslocando-se 9 m em linha reta em direção à torre e, posteriormente, desce verticalmente 7,7 m até atingir o eletrodo de aterramento da estação. Nessa simulação não há carga na rede.

A Figura 5.17 refere-se às condições supramencionadas para um solo de resistividade de 1000  $\Omega$ .m e permissividade relativa de 10. No gráfico presente na Figura 5.17, foram inseridas as curva da sobretensão no condutor neutro e no fase com e sem a conexão entre o neutro e o aterramento da torre.

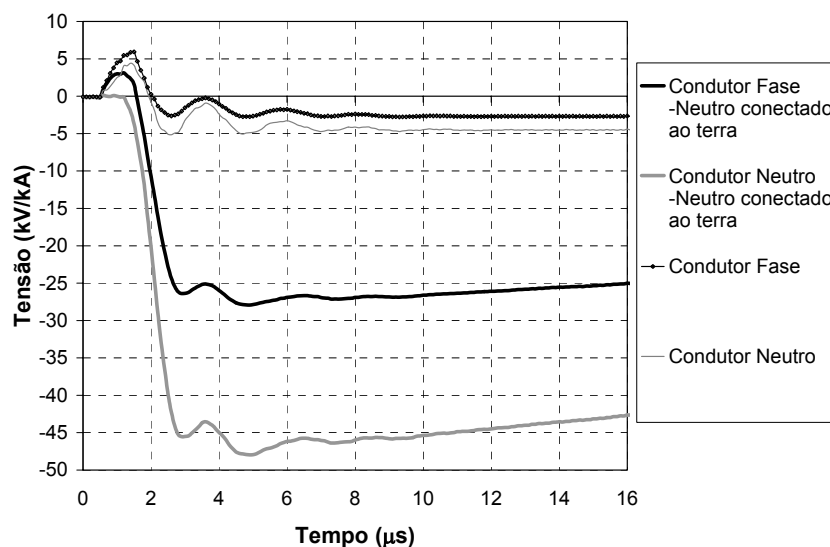


Figura 5.17: Sobretensões nos condutores neutro e fase da rede de distribuição sem carga em decorrência de uma descarga atmosférica próxima, com e sem a conexão do neutro ao aterramento da torre ( $\rho = 1000 \Omega$ .m).

Houve uma redução do pico positivo das ondas de sobretensão na condição com o neutro da rede conectado, principalmente a onda de tensão do condutor neutro. Isso se deve a uma redução da impedância de aterramento do condutor neutro, uma vez que esse está conectado aos eletrodos de aterramento da estação. Entretanto, essa conexão ampliou os efeitos da elevação de potencial causada pelo fluxo de corrente pelo solo. Com isso, as sobretensões nos condutores fase e neutro foram de, respectivamente, 28 e 48 kV/kA, observando um aumento de 8 vezes para a tensão no condutor fase e de 8,3 vezes para o neutro. Comparando as curvas de sobretensão na condição do condutor neutro conectado ao aterramento sem carga (Figura 5.17) com as com carga (Figura 5.13), observa-se diferenciação acentuada nas curvas de sobretensão no condutor fase. Isso se deve à corrente que flui pela carga entre os condutores neutro e o fase.

A Figura 5.18 refere-se às mesmas condições da Figura 5.17, entretanto a resistividade do solo foi reduzida para 100  $\Omega$ .m.

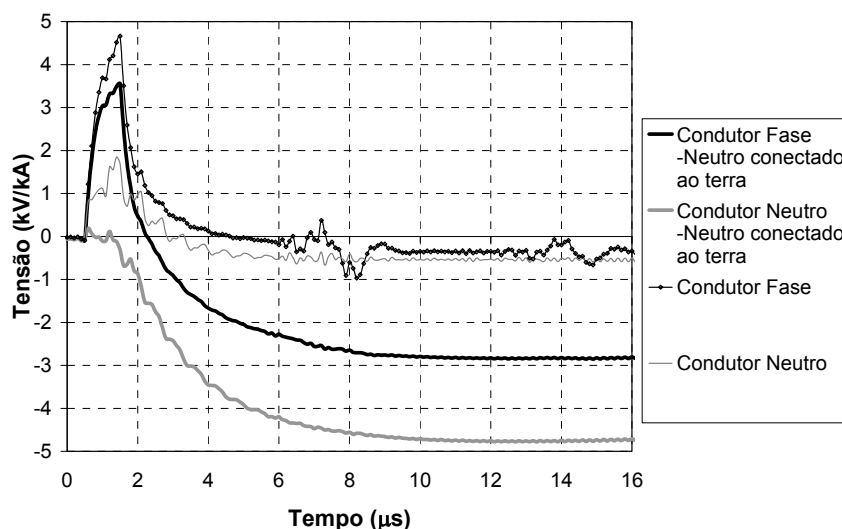


Figura 5.18: Sobretensões nos condutores neutro e no fase da rede de distribuição sem carga devida a uma descarga atmosférica próxima, com e sem a conexão do neutro ao aterramento da torre ( $\rho = 100 \Omega$ .m).

Os efeitos observados para a resistividade do solo de 1000  $\Omega$ .m estão presentes no solo de 100  $\Omega$ .m. O valor do pico negativo para o condutor fase e neutro foram de, respectivamente, 2,84 e 4,78 kV/kA, para a condição do condutor neutro conectado ao aterramento da estação. Comparando com os valores de sobretensão para um solo de

1000  $\Omega$ .m, que foram de 28 e 48 kV/kA, constata-se uma variação aproximadamente proporcional à elevação da resistividade do solo, que foi de 10 vezes.

Aproximadamente em 6  $\mu$ s e em 13  $\mu$ s, ocorrem oscilações na sobretensão presente no condutor fase, na condição sem a conexão do condutor neutro ao aterramento. Essas oscilações também são observadas em outras simulações e se devem às reflexões de onda nas descidas dos aterramentos da rede de distribuição.

### 5.3.5 – Sobretensão em uma rede de distribuição sem carga com dois condutores

A Figura 5.19 refere-se às “**Simulações 5**” descritas no item 5.2, apresentando as ondas de tensão no condutor fase de uma rede de distribuição de dois condutores para  $\rho_{\text{solo}} = 100, 500$  e  $1000 \Omega$ .m,  $\epsilon_{r_{\text{solo}}} = 100$ . Os valores da distância entre a torre e a rede de distribuição, do comprimento dos condutores e da altura do ponto de *attachment* são os mesmos utilizados nas simulações apresentadas no item 5.3.3. Considera-se que não há carga na rede. Os dados de tensão foram obtidos no centro do vão do condutor fase.

Nessas simulações o condutor neutro da rede não foi conectado ao aterramento da estação de telecomunicações.

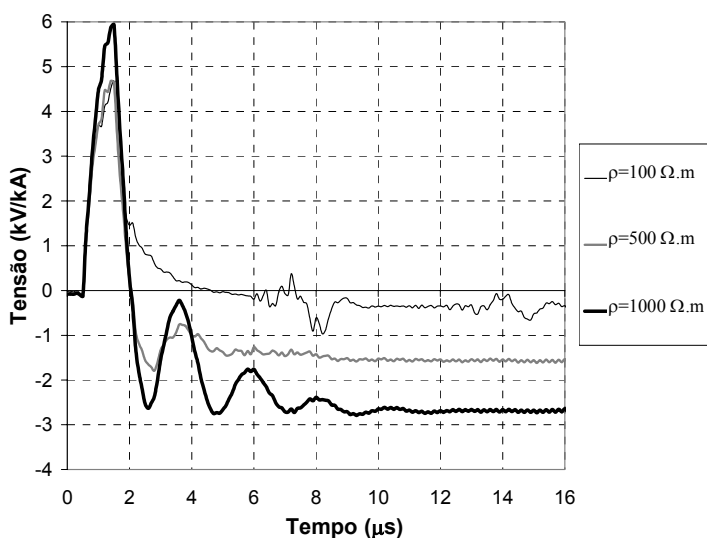


Figura 5.19: Sobretensão no condutor fase da rede de distribuição sem carga causada por uma descarga atmosférica próxima ( $\rho_{\text{solo}} = 100, 500$  e  $1000 \Omega$ .m e  $\epsilon_r=100$ ).

A Figura 5.20 apresenta as curvas obtidas a partir dos mesmos parâmetros das simulações demonstradas na Figura 5.19. No entanto, apresentam-se os resultados de tensão obtidos no centro do vão do condutor neutro.

Observa-se, no início das curvas da Figura 5.20, um atraso na resposta da tensão no condutor, em relação à corrente de descarga, de aproximadamente  $0,4 \mu\text{s}$ . Esse atraso se deve ao tempo de propagação da onda eletromagnética no ar. Nos primeiros microssegundos da onda de sobretensão no condutor, os efeitos relativos à tensão induzida mostram-se mais relevantes. Pouco depois, o efeito da corrente conduzida no solo se manifesta com polaridade oposta ao efeito da tensão induzida. Esse retardo em relação à tensão induzida é causado pela menor velocidade de propagação da onda eletromagnética no solo. A partir daí, este efeito mostra-se mais relevante e as sobretensões no neutro se tornam, em módulo, maiores que as tensões de fase. Este comportamento é atribuído a uma maior contribuição na elevação de potencial no condutor neutro causada pela circulação de corrente elétrica propagada pelo solo. No item 5.3.9 é explicada a contribuição na sobretensão devida à tensão induzida e à tensão causada pela elevação de potencial no solo.

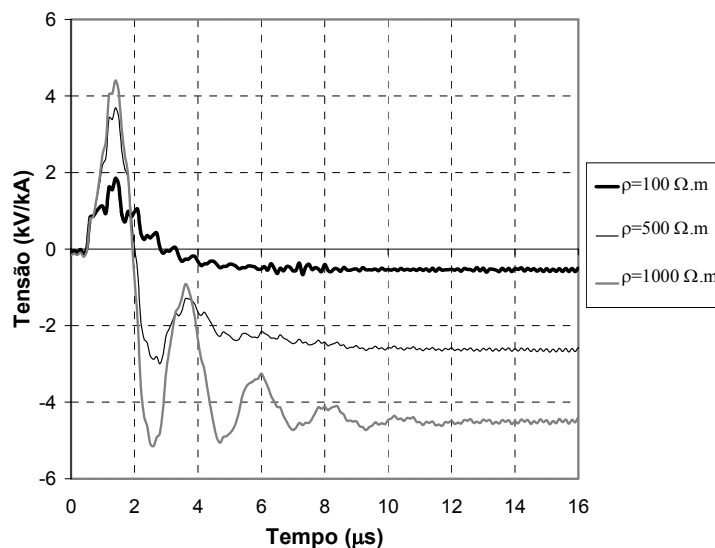


Figura 5.20: Sobretensão no condutor neutro da rede de distribuição sem carga causada por uma descarga atmosférica próxima ( $\rho_{\text{solo}} = 100, 500$  e  $1000 \Omega.m$  e  $\epsilon_r = 100$ ).

A elevação de potencial torna-se ainda mais relevante na sobretensão com o aumento da resistividade do solo.

A Figura 5.21 apresenta os resultados obtidos da sobretensões nos condutores fase e neutro para as resistividades do solo de 2500  $\Omega.m$  e 5000  $\Omega.m$ .

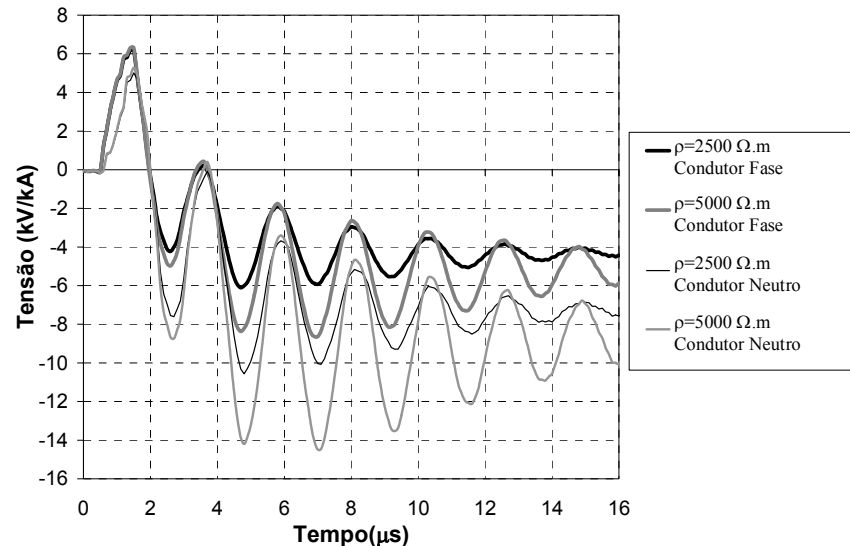


Figura 5.21: Sobretensões nos condutores fase e neutro da rede de distribuição sem carga, causada por uma descarga atmosférica próxima ( $\rho = 2500$  e  $5000 \Omega.m$  -  $\epsilon r = 100$ ).

O comportamento observado no gráfico para  $\rho_{\text{solo}} = 100, 500$  e  $1000 \Omega.m$  se mantém para as resistividades mais elevadas,  $\rho_{\text{solo}} = 2500$  e  $5000 \Omega.m$ . No entanto, para valores mais elevados de resistividade do solo, as respostas apresentadas pelas simulações mostram-se muito oscilatórias, indicando reflexões de ondas nos aterramentos.

Na Figura 5.21 ocorrem oscilações na sobretensão com um período de aproximadamente  $2,2 \mu s$ . Essas oscilações ocorrem para elevadas resistividades do solo e se devem às reflexões de onda nas descidas dos aterramentos da rede de distribuição.

A Figura 5.22 apresenta os valores de tensões fase-neutro, ressaltando-se que não há carga entre os condutores. Os valores de resistividades do solo são de 100, 500 e 1000  $\Omega.m$ .

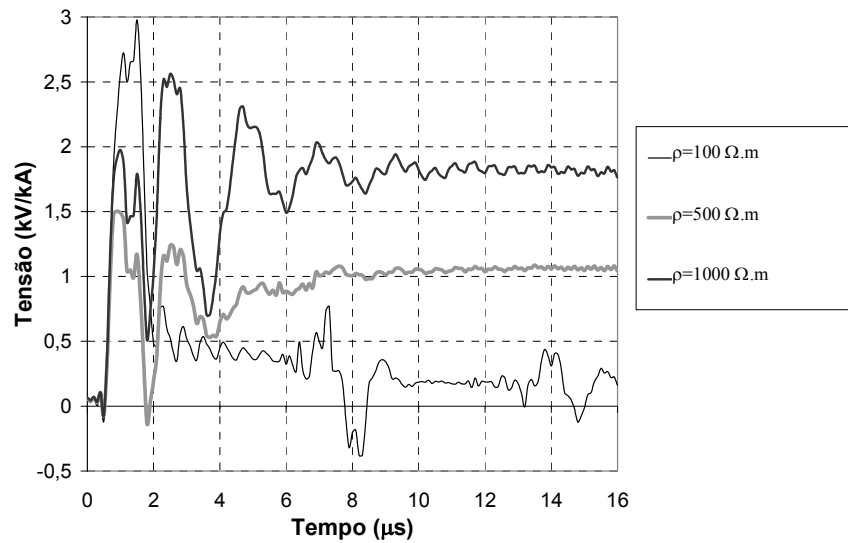


Figura 5.22: Sobretensões fase-neutro da rede de distribuição sem carga, causada por uma descarga próxima ( $\rho = 100, 500$  e  $1000 \Omega.m$ ;  $\epsilon_r = 100$ ).

A tensão fase-neutro possui grande relevância, pois ela é que será aplicada aos elementos ligados ao sistema elétrico. Essa tensão é muito dependente do valor de resistividade do solo para instantes após  $2 \mu s$ , momento no qual a elevação de potencial causada pela corrente conduzida pelo solo influencia fortemente no valor da tensão no condutor da rede. Após esse tempo, a tensão fase-neutro tende a se estabilizar e reduzir lentamente, acompanhando a curva de injeção de corrente que possui um tempo de meia onda de  $50 \mu s$ .

Com a resistividade do solo de  $100 \Omega.m$ , é observada uma maior elevação impulsiva da sobretensão fase-neutro no pulso inicial. Isto se deve ao baixo valor das impedâncias de aterramento do cabo neutro que contribuem para a redução da tensão nesse condutor, aumentando, por consequência, a diferença de potencial entre os dois condutores.

### 5.3.6 – Sobretensão em uma rede de distribuição com dois condutores distanciados de 50 m da torre de telecomunicações

A Figura 5.23 contém o gráfico relativo à “**Simulação 6**”, na qual se alterou a distância (“ $d$ ”) entre a rede de distribuição e a torre de telecomunicações atingida pela descarga. A distância (“ $d$ ”) foi aumentada de 20 para 50 m. Os demais parâmetros utilizados nas “Simulações 6” não se alteraram, se comparados aos das “simulações 5”. O gráfico mostra as ondas de tensão do condutor fase e do neutro para as resistividades do solo de 100  $\Omega$ .m e 1000  $\Omega$ .m. A permissividade relativa do solo é de 100.

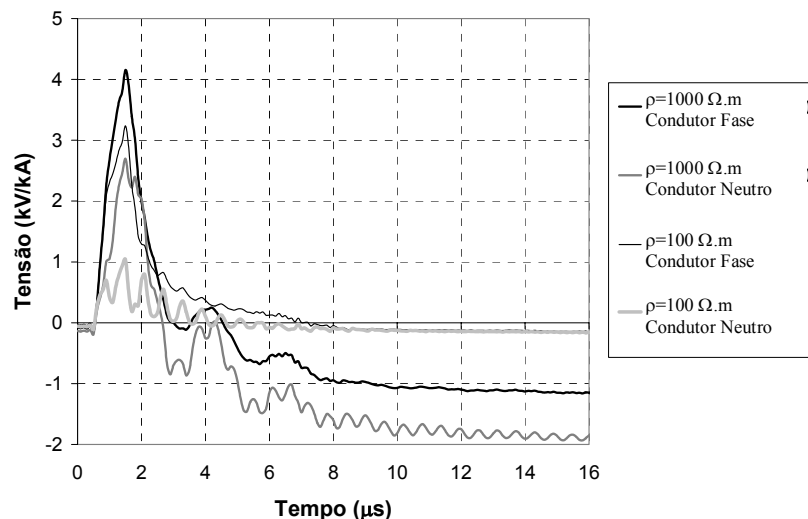


Figura 5.23: Sobretensão no centro do condutor fase e do neutro da rede de distribuição ( $\rho = 100$  e  $1000 \Omega$ .m). A distância  $d$  é de 50 m.

Nesta simulação observa-se claramente a redução do módulo da sobretensão em comparação com os valores obtidos nas “simulações 5” (item 5.3.5 – Figuras 5.17 e 5.18). Esse resultado era esperado em função do aumento da distância entre o distúrbio e sua fonte. A atenuação foi verificada tanto para a elevação de potencial do solo (efeito da tensão gerada pelo fluxo de corrente no solo), quanto para a onda eletromagnética que ilumina a rede de distribuição (efeito da tensão induzida). Com a resistividade do solo de 1000  $\Omega$ .m e a distância  $d$  de 20 m, a tensão fase-neutro teve um pico acima de 2,5 kV/kA, esse valor de pico foi reduzido a 1,5 kV/kA quando se alterou a distância  $d$  para 50 m.

A Tabela 5.3 mostra a redução percentual do valor da tensão na fase, comparando-se as “simulações 5” ( $d= 20$  m) e as “simulações 6” ( $d= 50$  m), para as resistividades de  $100 \Omega.m$  e  $1000 \Omega.m$ . Foi verificada uma redução mais significativa da sobretensão no condutor fase decorrente do aumento da distância  $d$  no valor da tensão após o tempo  $10 \mu s$  (redução média de 60%), do que no pico da onda de sobretensão.

Tabela 5.3: Tabela comparativa entre as reduções das tensões de pico e das tensões após  $10 \mu s$  para as resistividades do solo de  $100 \Omega.m$  e de  $1000 \Omega.m$  e para as distâncias entre a torre de telecomunicações e a rede de distribuição de energia de 20 m e 50 m.

<b>Condutor Fase da Rede de Distribuição</b>	<b>Tensão de pico (kV/kA)</b> (maior contribuição da tensão induzida)	<b>Tensão aproximada em <math>10 \mu s</math> (kV/kA)</b> (maior contribuição da elevação de potencial no solo)
Resistividade de $100 \Omega.m$ Distância de 20 m da torre	4,66	-0,36
Resistividade de $100 \Omega.m$ Distância de 50 m da torre	3,24 (Redução de 30%)	-0,14 (Redução de 61% )
Resistividade de $1000 \Omega.m$ Distância de 20 m da torre	5,92	-2,7
Resistividade de $1000 \Omega.m$ Distância de 50 m da torre	4,15 (Redução de 30%)	-1,15 (Redução de 58%)

### ***5.3.7 – Sobretensão em uma rede de distribuição com dois condutores com o ponto de attachment a 300 m de altura***

Nas “Simulações 7” presentes neste item, o ponto de *attachment* ( $h$ ) foi elevado de 150 m para 300 m, sendo que os resultados desta alteração na modelagem da descarga são apresentas nas curvas da Figura 5.24. Os valores de resistividade do solo utilizados são de  $100 \Omega.m$  e de  $1000 \Omega.m$ . Os demais parâmetros utilizados nas “simulações 7” foram mantidos em relação aos das “Simulações 5”, tais como a distância entre a rede de distribuição e a torre de telecomunicações (“ $d$ ”), e o comprimento do condutor (“ $L$ ”).

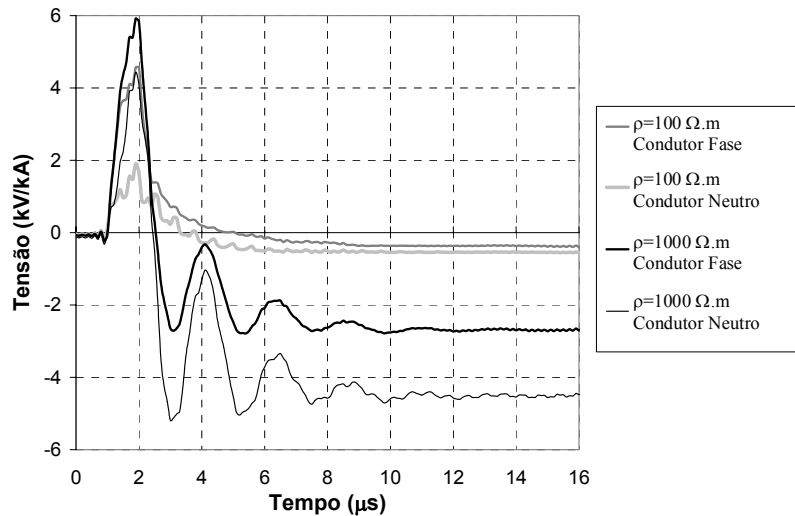


Figura 5.24: Sobretensão no centro do condutor fase e do neutro da rede de distribuição ( $h = 300$  m,  $d = 20$  m,  $L = 170$  m,  $\rho = 100$  e  $1000$   $\Omega$ .m).

Em princípio, foi observado um aumento do atraso da onda no momento inicial da curva de tensão em relação à condição de  $h = 150$  m (“Simulações 5”), decorrente da alteração da modelagem da descarga atmosférica. Como se utilizou um ponto de *attachment* mais elevado (300 m de altura), a distância percorrida pela onda de corrente até atingir a torre aumentou, assim como seu tempo de propagação. Como a corrente elétrica no canal foi modelada se propagando com velocidade próxima à da luz (300 m/ $\mu$ s) e a distância de propagação do ponto de *attachment* ao solo foi de 300 m, o tempo esperado de atraso é de 1  $\mu$ s, como pode ser também observado na Figura 5.25. Tal figura apresenta uma comparação entre as ondas de tensão na rede de distribuição para as “Simulações 5” ( $h = 150$  m) e para as “Simulações 7” ( $h = 300$  m).

As ondas de sobretensão apresentadas na Figura 5.25 são bastante semelhantes. Observa-se uma diferença em relação ao atraso na frente de onda devido à modelagem da descarga com  $h = 300$  m. Para fins de análise e comparação, as ondas com  $h = 150$  m foram deslocadas na escala de tempo de um intervalo igual a este atraso, como apresentado na Figura 5.26. Verifica-se que as ondas praticamente se sobrepõem.

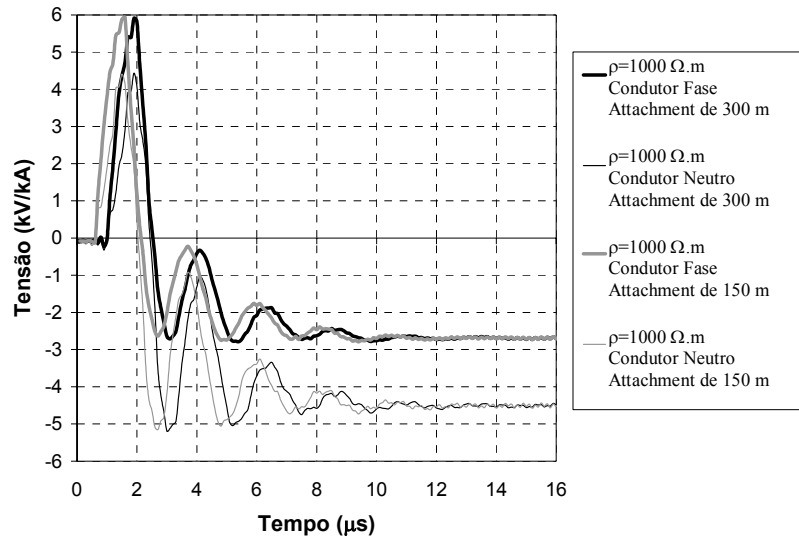


Figura 5.25: Sobretensão no centro do condutor fase e do neutro da rede de distribuição ( $\rho = 1000 \Omega.m$ ), para  $h = 150$  e  $300$  m.

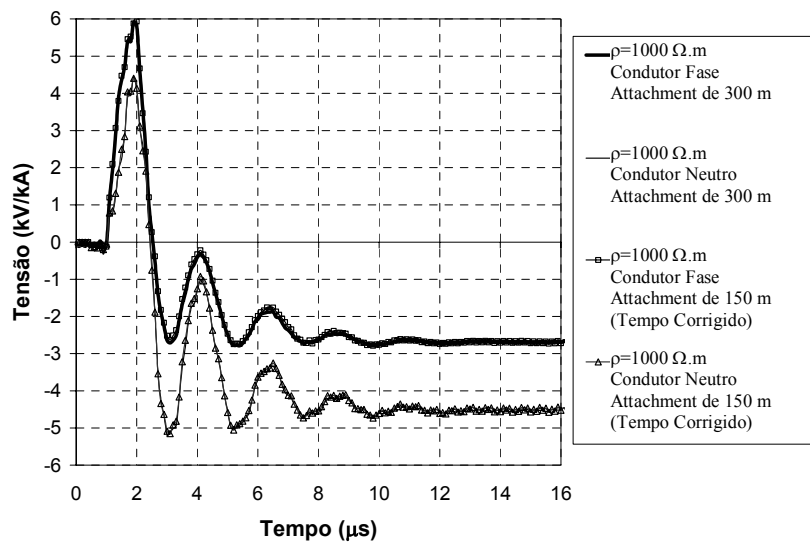


Figura 5.26: Sobretensão no centro do condutor fase e do neutro da rede de distribuição ( $\rho = 1000 \Omega.m$ ). Os pontos de *attachment* da descarga atmosférica foram modelados em 150 m e em 300 m de altura, sendo que a onda referente ao ponto de *attachment* de 150 m foi atrasada em  $0,5 \mu s$ .

Esta comparação permite afirmar que, para  $\rho_{solo} = 100$  e  $1000 \Omega.m$ , as variações do ponto de *attachment* entre os valores de 150 m e 300 m não possuem influência significativa nos valores das tensões induzidas e das tensões causadas pelo fluxo de corrente elétrica pelo solo.

### 5.3.8 – Sobretensão em uma rede de distribuição de 340 m com dois condutores

Neste item são apresentados os resultados referentes às “**Simulações 8**”, que se diferenciam pelo aumento do comprimento dos condutores da rede de distribuição ( $L$ ) de 170 m para 340 m, como mostra a Figura 5.28. O valor da distância entre a torre de telecomunicações e a rede de distribuição é de 20 m e a altura do ponto de *attachment* é de 150 m, valores utilizados, também, nas simulações apresentadas no item 5.3.5. Admite-se que não haja cargas na rede de distribuição.

As sobretensões calculadas para as condições citadas estão apresentadas na Figura 5.27

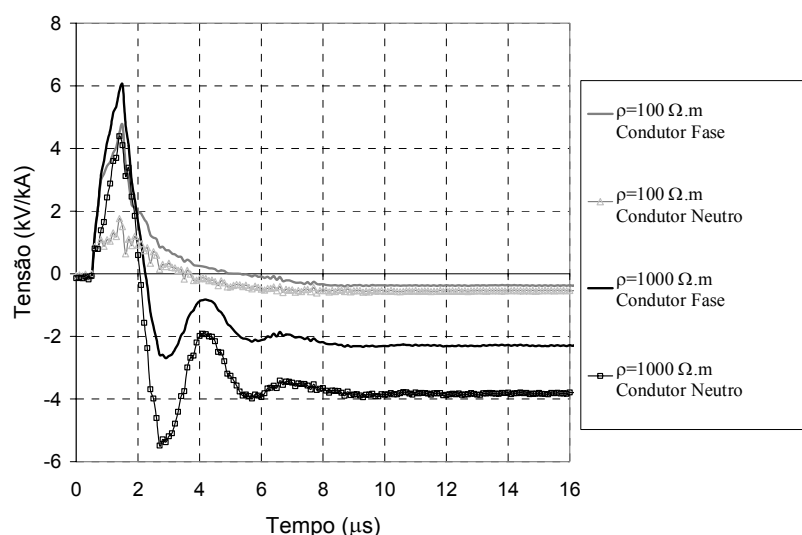


Figura 5.27: Sobretensão no centro do condutor fase e do neutro da rede de distribuição ( $\rho = 100$  e  $1000 \Omega.m$ ), para  $L = 340$  m.

Com o aumento do vão da rede, eleva-se a tensão induzida pela descarga atmosférica. Nessa simulação, a corrente de descarga é injetada em um ponto central em relação à rede de distribuição, e o aumento de seu condutor (de 170 m para 340 m) ocorre há uma grande distância da descarga (aproximadamente 87 m no início do segmento do condutor adicionado), como pode ser observado na Figura 5.28. Com isso, a onda eletromagnética é atenuada até atingir essa parte adicional do condutor,

tornando, assim, diminuta sua contribuição para a primeira parte da onda de sobretensão (tempo inferior a  $2 \mu\text{s}$ ).

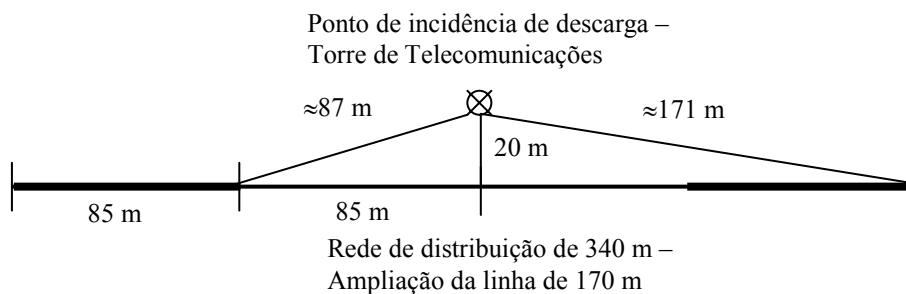


Figura 5.28: Figura representativa da rede de distribuição de 340 m, enfatizando o trecho que se adicionou em relação ao condutor de 170 m e as distâncias do ponto de incidência da descarga atmosférica aos condutores.

No entanto, após o tempo de  $2 \mu\text{s}$ , ocorre uma discrepância entre a tensão no condutor de 340 m e no de 170 m, como pode ser observada na Figura 5.29. O módulo da sobretensão na rede de 340 m é menor em relação ao da rede de 170 m para tempos superiores a  $2 \mu\text{s}$ . Isso se deve a um maior distanciamento dos aterramentos do condutor neutro em relação à torre de telecomunicações, reduzindo o efeito da circulação na rede de corrente conduzida pelo solo, causada pela elevação de potencial.

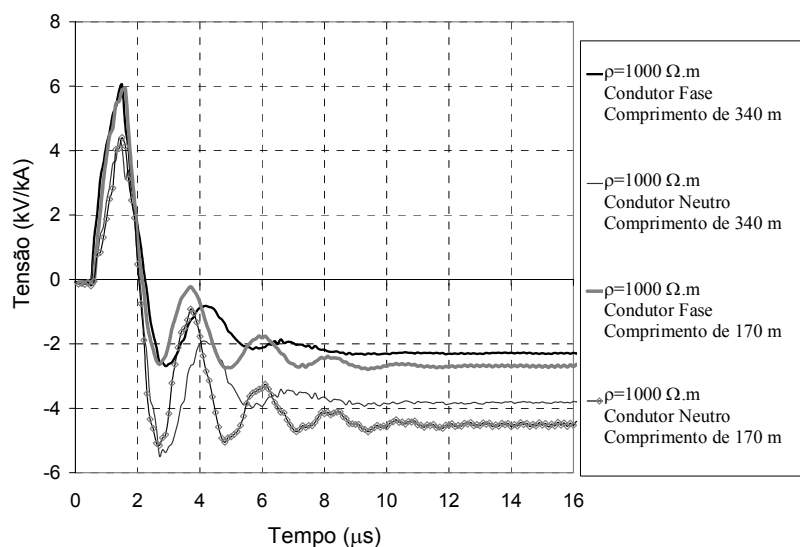


Figura 5.29: Sobretensão no centro do condutor fase e do neutro da rede de distribuição ( $\rho = 1000 \Omega.m$ ). Os comprimentos dos condutores da rede foram de 170 m e 340 m.

### ***5.3.9 – Sobretensão em uma rede de distribuição separando o efeito da tensão causada pela corrente conduzida no solo da tensão induzida***

Para as simulações presentes nesse item, utilizou-se o método explicitado no Capítulo 4 dessa dissertação, que separa os efeitos presentes nas ondas de sobretensão causadas pela tensão induzida das tensões geradas pelo fluxo de corrente conduzida no solo. Essas simulações foram nomeadas no item 5.2 como “**Simulações 9**”. Nos itens 5.3.9.1 a 5.3.9.5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nessas simulações.

#### ***5.3.9.1 – Sobretensões na fase de uma rede de distribuição com dois condutores, sem carga entre eles***

A Figura 5.30 apresenta os resultados obtidos por meio das “**Simulações 9**”, sendo que se utiliza nesse item os dados de uma rede sem carga, com distância entre a rede de distribuição e a torre de telecomunicações de 20 m, o comprimento dos condutores de 170 m e a altura do ponto de *attachment* de 150 m. Essa figura apresenta a onda de sobretensão na rede e a sua decomposição nas parcelas relativas à tensão induzida e ao efeito da tensão conduzida pelo solo. Nesta simulação foi utilizada a resistividade do solo de 100 e 1000  $\Omega$ .m.

Analisando-se as curvas da Figura 5.30, pode-se observar claramente que existe um tempo de 0,6  $\mu$ s de atraso na sobretensão. Do instante 0,6  $\mu$ s até 1,3  $\mu$ s só há a presença significativa da tensão induzida. A partir desse momento, a contribuição para a sobretensão oriunda da onda eletromagnética propagada pelo ar tende a se minimizar, e a parcela relativa à tensão devida ao fluxo de corrente conduzida pelo solo se destaca até ser plenamente responsável pela tensão no condutor fase da rede. Esse atraso na contribuição da elevação de potencial devida à tensão conduzida pelo solo se deve principalmente a dois motivos. O primeiro é relativo à velocidade de deslocamento da onda de corrente elétrica pelo solo que é, aproximadamente, 3 vezes inferior ao deslocamento da onda eletromagnética pelo ar. O segundo se deve à forma em que os

---

dois efeitos se relacionam com a corrente de descargas. Enquanto a tensão induzida é condicionada basicamente pela derivada da corrente ( $di/dt$ ), a elevação de potencial no solo é quase proporcional à corrente. Assim, a tensão induzida se inicia com um valor elevado (frente de onda) e tende a decrescer após a corrente alcançar seu pico. Já a tensão conduzida parte de um valor próximo de zero e se eleva no decorrer do tempo até atingir o valor de pico, tendendo a decrescer lentamente a partir de então, tal qual a onda de corrente.

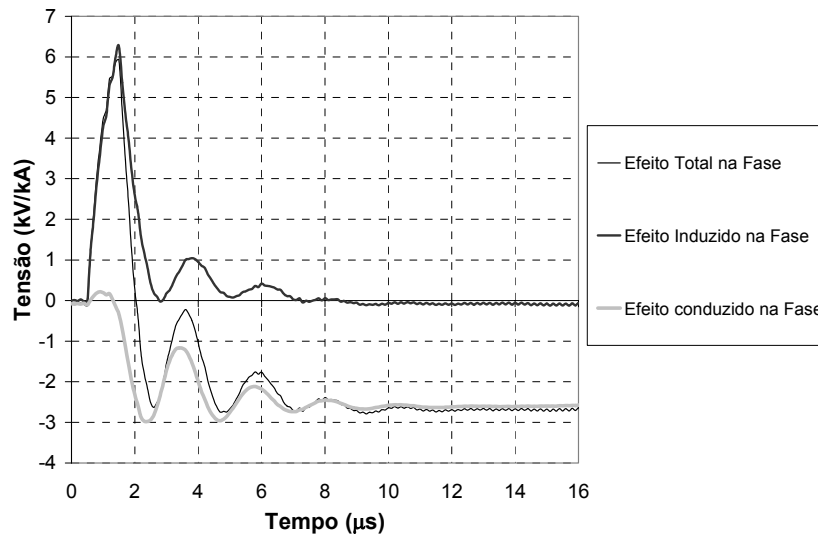


Figura 5.30: Sobretensão no centro do condutor fase da rede de distribuição causada pelos efeitos da elevação de potencial gerada pelo fluxo de corrente pelo solo e da tensão induzida ( $\rho = 1000 \Omega.m$ ).

### 5.3.9.2 – Sobretensão na fase de uma rede de distribuição com dois condutores, com carga entre eles

A Figura 5.31 apresenta a resposta no tempo da onda de tensão obtida no centro de um condutor fase da rede de distribuição. A rede possui três cargas de  $30 \Omega$ , como explicitado no item 5.2 no tópico das “Simulações 3”. As distâncias entre a rede de distribuição e a torre de telecomunicações, o comprimento do condutor e a altura do ponto de *attachment* foram de, respectivamente, 20 m, 170 m e 150 m. Essa figura apresenta três ondas relativas, respectivamente, ao efeito de: apenas tensão induzida, apenas tensão devida à corrente conduzida pelo solo e do somatório dos dois efeitos

(onda extraída do item 5.3.5). A resistividade do solo utilizada para se obterem os resultados apresentados nessa figura foi de  $1000 \Omega \cdot m$ .

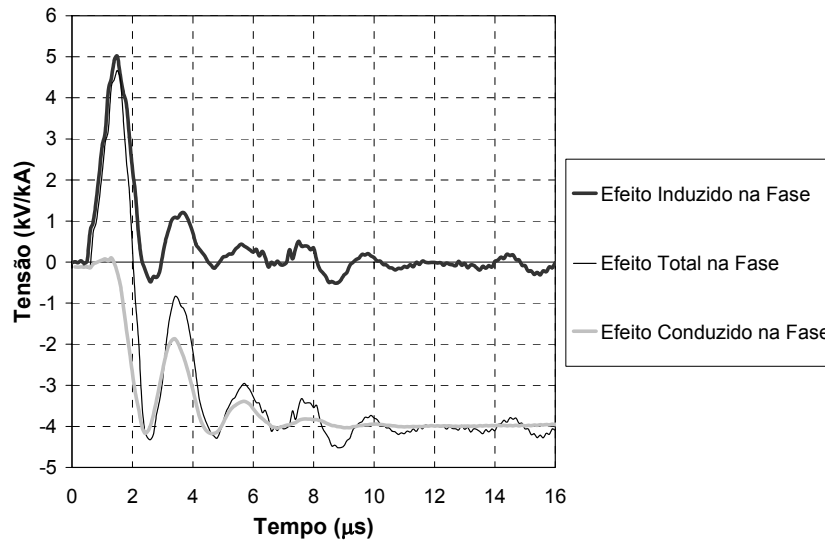


Figura 5.31: Sobretensão presente no centro do condutor fase da rede de distribuição com carga causada pelos efeitos da tensão gerada pela corrente conduzida pelo solo e induzida ( $\rho=1000 \Omega \cdot m$ ).

Quando se comparam as curvas das Figuras 5.30 e 5.31, nota-se que, com a inserção da carga na rede, há redução na sobretensão do condutor fase, tanto na tensão induzida quanto na elevação de potencial devida à corrente conduzida no solo. Isso se deve ao fluxo de corrente através da carga entre os dois condutores da rede, o que tende a equalizar o potencial nos dois condutores. Por conseqüência, embora não seja mostrado na figura, observa-se uma elevação do potencial do neutro.

### 5.3.9.3 – Sobretensão em uma rede de distribuição com dois condutores distanciada de 50 m de uma torre de telecomunicações

A Figura 5.32 apresenta a elevação de potencial no centro do condutor fase da rede de distribuição, na inexistência de carga entre os condutores. As distâncias entre a rede de distribuição e a torre de telecomunicações, o comprimento do condutor e a altura do ponto de *attachment* são, respectivamente, de 50 m, 170 m e 150 m. Essa figura apresenta as ondas relativas ao efeito apenas da tensão induzida, ao efeito apenas

da tensão conduzida pelo solo e o somatório dos dois efeitos. A resistividade do solo utilizada para se obterem tais resultados foi de  $1000 \Omega.m$ .

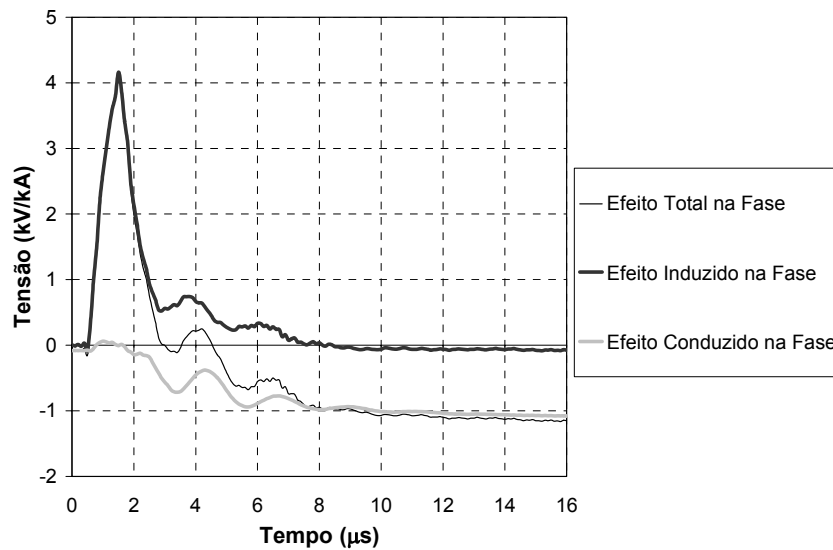


Figura 5.32: Sobretensão no centro do condutor fase da rede devida aos efeitos da tensão induzida e da corrente conduzida pelo solo. O centro da rede está distanciado de 50 m de uma torre de telecomunicações ( $\rho = 1000 \Omega.m$ ).

Comparando-se o efeito da tensão causada pela corrente conduzida pelo solo para uma distância de 50 m da torre à rede de distribuição com as “Simulações 5” (distância de 20 m da torre à rede), percebe-se um aumento no tempo de resposta à corrente de descarga (momento no qual essa iniciou sua influência na tensão da fase). Esta foi de  $1,7 \mu s$  na primeira situação e  $1,3 \mu s$  para as mesmas condições nas “Simulações 5”. Já para a tensão induzida não foi perceptível a variação em relação ao tempo de ocorrência. Isso se deve à diferença de velocidade de propagação dos campos eletromagnéticos no solo e no ar.

#### ***5.3.9.4 – Sobretensão na fase de uma rede de distribuição com dois condutores com o ponto de attachment a 300 m de altura***

A Figura 5.33 apresenta a sobretensão no centro do condutor fase da rede de distribuição. As distâncias entre a rede e a torre de telecomunicações (**d**), o comprimento do condutor (**L**) e a altura do ponto de *attachment* (**h**) são de, respectivamente, 20 m, 170 m e 300 m. Essa figura apresenta a onda relativa ao efeito

apenas da tensão induzida, ao efeito apenas da tensão conduzida pelo solo e o somatório dos dois efeitos. A resistividade do solo utilizada para se obterem tais resultados foi de  $1000 \Omega.m$ .

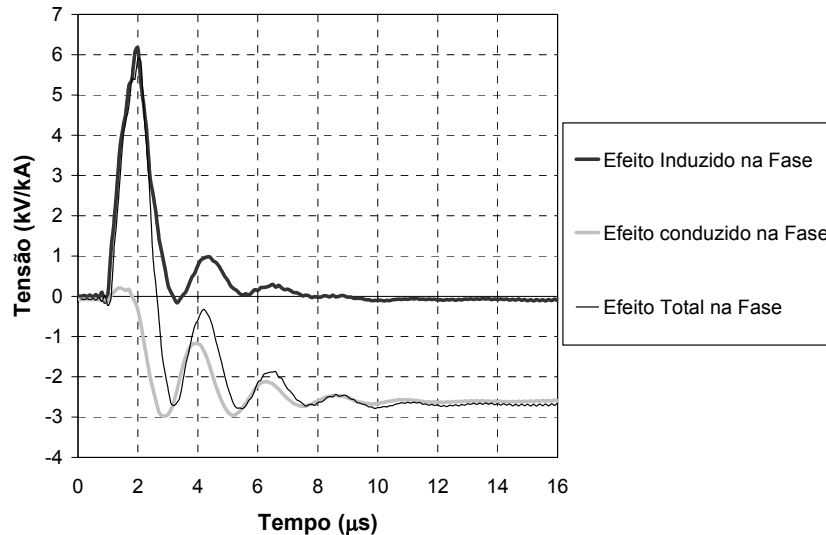


Figura 5.33: Sobretensão na parte central do vão do condutor fase causadas pelos efeitos da tensão induzida e da elevação de potencial gerada pela corrente conduzida no solo ( $h = 300 \text{ m}$ ,  $L = 170 \text{ m}$ ,  $d = 20 \text{ m}$  e  $\rho = 1000 \Omega.m$ ).

Observa-se que as ondas presentes na Figura 5.33 ( $h = 300 \text{ m}$ ) são muito semelhantes às da Figura 5.30 ( $h = 150 \text{ m}$ ), a única diferença significativa é quanto ao atraso na sobretensão, sendo que na condição de  $h = 300 \text{ m}$  esse é de aproximadamente  $1 \mu\text{s}$  e na condição de  $h = 150 \text{ m}$  é de  $0,5 \mu\text{s}$ .

### 5.3.9.5 – Sobretensão no condutor fase de uma rede de distribuição de 340 m com dois condutores

A Figura 5.34 apresenta a sobretensão no centro do condutor fase da rede de distribuição. As distâncias entre a rede e a torre de telecomunicações, o comprimento do condutor e a altura do ponto de *attachment* são de, respectivamente, 20 m, 340 m e 150 m. Essa figura apresenta a onda relativa ao efeito apenas da tensão induzida, ao efeito apenas da tensão conduzida pelo solo e o somatório dos dois efeitos. A resistividade do solo utilizada para se obterem tais resultados foi de  $1000 \Omega.m$ .

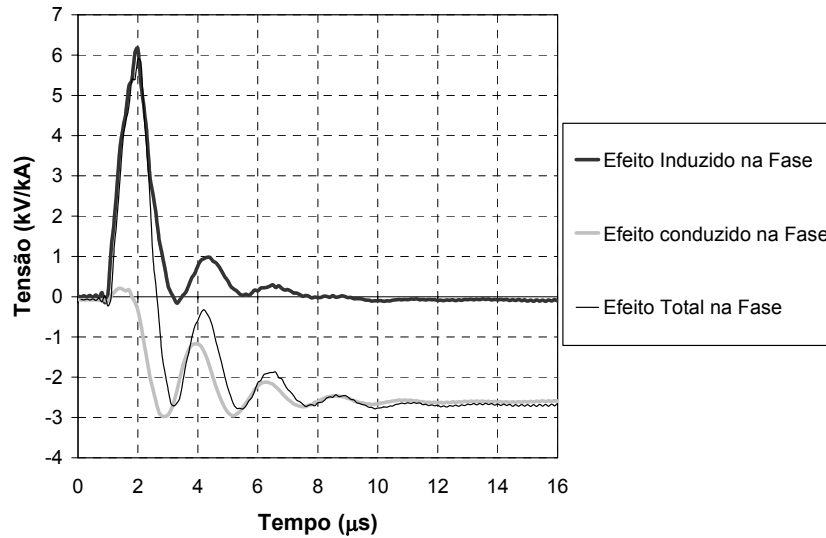


Figura 5.34: Sobretensão na parte central do vão do condutor fase causadas pelos efeitos da tensão induzida e da elevação de potencial gerada pela corrente conduzida no solo ( $h = 150$  m,  $L = 340$  m,  $d = 20$  m e  $\rho = 1000$   $\Omega$ .m).

Observa-se que os efeitos da tensão conduzida e da tensão induzida passam a ter polaridade contrária a partir de aproximadamente  $1,3$   $\mu$ s. A partir daí, até aproximadamente  $3,3$   $\mu$ s o efeito resulta na redução da amplitude da sobretensão na fase. Entretanto, o valor de pico da sobretensão fica definido pela tensão induzida, já que esta alcança seu valor máximo antes que a parcela da sobretensão relativa ao efeito da corrente conduzida pelo solo atinja um valor de polaridade negativa relevante.

## 5.4 Comentários finais

Após apresentar as diversas simulações e avaliar a contribuição relativa a cada elemento do sistema na sobretensão na rede de distribuição, é possível concluir quanto à severidade do fenômeno envolvido.

Na estrutura completa, “Simulações 3”, foi obtida uma sobretensão muito elevada. Por exemplo, para uma corrente de  $30$  kA (mediana da corrente de descarga proposta por Berguer) foi encontrado um valor de  $1350$  kV, amplitude muito superior à tensão nominal de uma rede de distribuição. Ainda para essas simulações, foi possível concluir que os valores de sobretensão são muito semelhantes no condutor fase e neutro.

Isso se deve à presença da carga na rede, o que permite uma circulação de corrente entre esses condutores.

Foi observada a grande influência no valor da sobretensão na rede causada pela conexão do condutor neutro ao aterramento da estação, principalmente na parcela devida à elevação de potencial do solo causada pelo fluxo de corrente.

A sobretensão presente na rede de distribuição é muito influenciada pela distância entre essa e a torre, o que sugere a necessidade de uma distância mínima aceitável para a instalação da estação rádio-base. Essa distância depende do comprimento do vão da rede e do nível de sobretensão considerado aceitável.

A Tabela 5.4 apresenta um resumo das principais conclusões obtidas no item 5.3.

Tabela 5.4: Resumo das principais conclusões do item 5.3.

A sobretensão na rede, para as estruturas simuladas, é fortemente dependente da resistividade do solo.
A conexão entre o condutor neutro da rede e o aterramento da estação amplia os efeitos da elevação de potencial causada pelo fluxo de corrente pelo solo (elevação de 10 vezes, para a condição de $\rho = 100 \Omega.m$ ).
A inserção das cargas na rede de distribuição implica em uma aproximação dos valores de sobretensões no condutor neutro e no fase, isso se deve ao fluxo da corrente pela carga. Esse efeito é benéfico, pois reduz a tensão fase-neutro.
O aumento da distância entre a torre de telecomunicações e a rede reduz a sobretensão nos condutores dessa, sendo que essa atenuação é mais significativa para a parcela relativa à elevação de potencial do solo.
As variações da altura do ponto de <i>attachment</i> ( $h$ ) não possuem influência significativa nos valores das tensões induzidas e das tensões causadas pelo fluxo de corrente elétrica pelo solo (para resistividades de 100 e 1000 $\Omega.m$ e $h = 150$ e 300 m).
O aumento do vão da rede eleva a tensão induzida pela descarga atmosférica. Entretanto, o efeito da elevação de potencial na rede causada pela corrente conduzida pelo solo é reduzida, isso se deve a um maior distanciamento dos aterramentos do condutor neutro em relação à torre de telecomunicações.
A sobretensão na rede é inicialmente (primeiros microssegundos) composta basicamente pela parcela relativa à tensão induzida. Posteriormente, o efeito predominante é o da elevação de potencial causada pelo fluxo de corrente pelo solo. Essas duas componentes da sobretensão possuem sinais opostos.

# 6

## Conclusão e Propostas de Continuidade

### *6.1 – Introdução*

O presente trabalho objetivou o estudo das sobretensões geradas na rede de distribuição causadas por descargas incidentes em torres de telecomunicações próximas. Após a obtenção dos resultados das simulações dos “casos” propostos que compreendem o sistema da estação rádio-base e da rede, foram sintetizados nesse capítulo as conclusões gerais desta dissertação de mestrado.

Foram investigadas as solicitações eletromagnéticas resultantes nos sistemas de distribuição localizados nas proximidades de uma estação de rádio-base em decorrência da incidência de descargas na sua torre, e os resultados mais importantes foram

destacados no item 6.2 desta dissertação.

## ***6.2 – Resultados Alcançados***

Diversos casos foram analisados, avaliando-se as variações das características do sistema composto pela estação rádio-base e a rede de distribuição.

Por meio de um modelo eletrogeométrico, foi analisado o efeito da presença de uma torre de telecomunicações no perfil das descargas atmosféricas em uma região, análise essa que contempla a probabilidade de incidência de descargas na torre e o grau de proteção contra descargas atmosféricas diretas na região circunvizinha. Esse grau de proteção depende da altura da torre e da amplitude da corrente de descarga, tendo, como efeito benéfico, uma maior proteção para descargas de maior amplitude.

Foi avaliada a influência da presença de uma torre de telecomunicações de 50 m de altura na distribuição da amplitude de corrente de descarga. Os resultados dessa influência foram o deslocamento da mediana da curva de amplitude de incidência de descargas para um valor 38% superior e o efeito da concentração de descargas de uma região em um local específico (na torre). Essa concentração, como foi anteriormente demonstrado, implica em problemas na qualidade da energia dos consumidores próximos à torre, que recebem o efeito da tensão induzida e da elevação de potencial causada pelo fluxo de corrente de descarga no solo.

Os resultados obtidos para a sobretensão nos condutores da rede, ao se simular a estrutura mais aproximada da condição real, foram muito superiores à tensão nominal do sistema de distribuição de energia. Esses valores são suficientes para causar danos a rede e a cargas consumidoras ligadas a essa.

A partir das simulações efetuadas, foi possível realizar uma análise de sensibilidade conclusiva quanto aos parâmetros de maior influência no perfil da tensão induzida e na elevação de potencial causada pela corrente de descarga que flui pelo solo.

---

Foi constatada uma redução significativa da tensão fase-neutro gerada por uma descarga próxima a uma determinada rede de distribuição ao se inserir uma carga resistiva entre os condutores.

Avaliou-se o efeito da conexão do condutor neutro da rede no aterramento da estação rádio-base, e foi possível concluir que ocorre um fluxo elevado de corrente proveniente da descarga atmosférica incidente na torre para o neutro, o que eleva sobremaneira o potencial nos condutores. Nessa condição ocorreu a maior elevação de potencial e de tensão fase-neutro. Para uma torre distanciada de 20 m de uma determinada rede de distribuição, o valor da sobretensão nos condutores causada pelo fluxo de corrente de descarga no solo se elevou de 7 a 10 vezes em relação à condição sem a conexão.

Foi quantificada a influência do aumento da distância entre a torre de telecomunicações e a rede de distribuição na sobretensão causada por descargas. Nas condições simuladas (distâncias de 20 e 50 m), ocorreu um decréscimo de 30% do valor de pico da sobretensão causada por descargas próximas, para as resistividades do solo de interesse.

Variou-se a altura do ponto de *attachment* de uma descarga atmosférica para avaliar a sua influência na sobretensão em uma rede de distribuição. Entretanto, para a faixa de valores simulados, não se observaram alterações significativas da forma e amplitude da onda gerada.

Foram analisadas as sobretensões causadas por descargas atmosféricas próximas da rede de distribuição em função do aumento do vão desta. Constatou-se uma variação pouco acentuada entre os picos das sobretensões para uma rede com condutores de 170 m e de 340 m.

Apresentou-se a separação dos efeitos da tensão induzida e da elevação de potencial causada pela corrente conduzida pelo solo em uma rede de distribuição próxima a uma torre atingida por descarga atmosférica. Concluiu-se que a onda de tensão induzida é responsável pelas componentes de alta frequência presentes na frente de onda da sobretensão nos condutores. Já as componentes de baixa frequência (cauda

---

da onda) se devem principalmente à elevação de potencial causada pela corrente conduzida pelo solo. Concluiu-se, também, que as contribuições devidas aos dois efeitos possuem sinais inversos para as condições simuladas, o que contribui para a redução do valor de tensão de surto na rede.

### ***6.3 – Propostas de continuidade***

O trabalho desenvolvido e apresentado nesta dissertação de mestrado se insere num contexto de pesquisas mais amplas e aprofundadas acerca da proteção de sistemas contra descargas atmosféricas.

O que se buscou aqui foi conhecer os efeitos da tensão induzida e da elevação de potencial causada pelo fluxo de corrente de descarga no solo. De posse desses efeitos, surge como uma proposta de continuidade do trabalho, a necessidade de se alcançar melhorias que visem atenuar as sobretensões na rede de distribuição, principalmente, nas condições em que o condutor neutro da rede está conectado ao aterramento da estação de telecomunicações. Para tal, é necessário um estudo dos níveis de sobretensões impulsivas considerados aceitáveis para os diversos tipos de consumidores de energia.

Nesta dissertação não se esgotaram as possíveis variações do sistema estudado. Assim, propõe-se a realização de simulações ainda mais abrangentes que os casos já realizados, a partir da metodologia definida nesta dissertação, aplicando-se outros parâmetros de forma de onda da descarga atmosférica. Nesta linha de raciocínio, a variação da estrutura de eletrodos de aterramento da torre (visando à redução da impedância de aterramento), bem como a alteração da estrutura desta e da rede, inserindo modelos mais próximos de uma rede de distribuição real, são focos interessantes a serem investigados em um trabalho futuro. Outra análise relevante é a inserção de supressores de surto junto às cargas consumidoras, avaliando sua influência na sobretensão.

---

# 7

## Referências Bibliográficas

ABNT NBR 5419, “**Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas**”, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

ALMEIDA, F.S., “**Proteção de Redes de Distribuição de Média Tensão Contra Descargas Atmosféricas: Análise das Solicitações para Surtos Gerados em Pontos Distantes**”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Orientador: Silvério Visacro Filho, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2005.

ANDERSON, R.B, ERIKSSON, A.J., “**Lightning Parameters for Engineering Application**”, *Electra*, nº 69, p. 65 - 101, março, 1980.

BERGER, K., ANDERSON, R.B., KRÖNINGER, H., “**Parameters of Lightning Flashes**”, *Electra*, nº41, p. 23-37, julho, 1975.

DE CONTI, A., VISACRO, S., “**Evaluation of Lightning Surges Transferred from Medium Voltage to Low Voltage Distribution Lines**”, *IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 152, n.3, p. 351-356, maio, 2005.

DE CONTI, A., “**Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas**”, Tese de Doutorado, Orientador: Silvério Visacro Filho; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, julho, 2006.

DIAS, R.N., VISACRO, S., MESQUITA, C.R., “**Analysis of Soil Relief Influence on Lightning Incidence and Current Amplitude in Minas Gerais State, Brazil**”,

---

*International Conference on Lightning Protection (ICLP'2004)*, Avignon, França, novembro, 2004.

DIAS, R.N, MESQUITA, C.R, VISACRO, S., “**Influências de Elevações do Relevo na Incidência e Intensidade da Corrente de Descargas Atmosféricas**”, XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Paraná, outubro, 2005.

DIAS, R.N., “**Nova Metodologia para Identificação de Pontos Críticos de Desempenho em Linhas de Transmissão Baseada na Aplicação de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas**”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Orientador: Silvério Visacro Filho, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, dezembro, 2006.

ERIKSSON, A. J., “**An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis**” – *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, Nº 3, p. 871-886, julho, 1987.

GOMEZ, A. N., VISACRO, S., SILVINO, J. L., “**A Contribution to the Direct Measurement of Lightning Currents by Means of Resistive Transducers**”, *Journal of Lightning Research*, v.3, p. 1 - 6, 2007.

MESQUITA, C.R., “**Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas**”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Orientador: Silvério Visacro Filho, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2001.

PETTERSSON, P., “**A Unified Probabilistic Theory of the Incidence of Direct and Indirect Lightning Strikes**”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No 3, julho, 1991.

RAKOV, V.A., UMAN, M.A., “**Lightning Physics and Effects**”, *Cambridge University Press*, 2003.

SILVEIRA, F.H., “**Aplicação de um Novo Modelo para Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica**”, Dissertação de Mestrado - Orientador: Silvério Visacro

---

---

Filho; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, julho, 2001.

SILVEIRA, F.H., DE CONTI, A., VISACRO, S., DUARTE, J.V.P., **“Qualidade de Energia em Unidades Consumidoras: Análise da Influência das Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas”**, Anais do XVII SNPTEE, Uberaba, 2003.

SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., **“Electromagnetic Interferences on Electrical Systems Due to Lightning Incidence on Nearby Telecommunication Elevated Structures”**, *VIII International Symposium on Lightning Protection*, novembro, 2005.

SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., SOARES J., A., **“The Influence of Attachment Point on Lightning Induced Voltage”**, *Proceedings of 28th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Kanazawa, Japão, setembro, 2006a.

SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., **“Lightning Effects in the Vicinity of Elevated Structures”**, *Journal of Electrostatics*, outubro, 2006b.

SILVEIRA, F. H., **“Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas”**, Tese de Doutorado, Orientador: Silvério Visacro; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, dezembro, 2006c

SCHROEDER, M.A.O., **“Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de descarga Atmosférica”**, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Orientador: Silvério Visacro Filho, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2001.

SOARES J., A.; VISACRO, S.; **“Modelos de Torres de Transmissão para Cálculo de Desempenho de Linhas Frente a Descargas Atmosféricas”**, *Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (XI ERIAC)*, Hernandarias, Paraguai, maio, 2005.

VISACRO, S., **“Modelagem de Aterramentos Elétricos”**, Tese de Doutorado, Orientador: Portela, C., COPPE/UFRJ, 1992.

VISACRO, S, PORTELA, C.M., **“Modelagem de Aterramentos Elétricos para Fenômenos Rápidos”**, *Eletroevolução*, p. 47 – 54, junho, 1995.

---

---

VISACRO, S, SARAIVA, A.C., SOARES J., A., **“Análise do Comportamento de Configurações Típicas do Aterramento de Torres de Telecomunicações na Incidência de Descargas Atmosféricas – Aspectos de Aplicação”**, Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 1997.

VISACRO, S., FELIPE, M.A., OLIVEIRA, R.Z., **“Non Conventional Methodology to Improve TL Lightning Performance of Transmission Lines”**, anais do Ground’2002 & 3rd WAE, Rio de Janeiro, Brasil, novembro, 2002.

VISACRO, S., CONTI, A., PEREIRA, F.H., DUARTE, J.V.P., **“Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão Contra Descargas Atmosféricas”**, Anais do II CITENEL, 2003a.

VISACRO, S., SILVEIRA, F. H., SCHROEDER, M. A., SOARES J., A., **“Avaliação da Importância Relativa de Tensão Induzida em Linhas de Alta Tensão”**, Eletroevolução, p. 55 - 60, 2003b.

VISACRO, S., SOARES J., A., SCHROEDER, M.A.O., CHERCHIGLIA, L.C.L, DE SOUZA, V.J., **“Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station”**, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, D01105, 2004a.

VISACRO S., **“A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke”**, *Geophysical Research Letters*, vol.31, LXXXXX, doi:10.1029/2004. GL019642, abril, 2004b.

VISACRO S., SILVEIRA F.H., **“Evaluation of the Current Distribution Along the Lightning Discharge Channel by a Hybrid Electromagnetic Model”**, *Journal of Electrostatics*, Elsevier, 60, p. 111-120, 2004c.

VISACRO, S., FELIPE, M.A., OLIVEIRA, R.Z., SILVEIRA, F.H., SILVA, A.P., VALE, M.H.M., **“The influence of sensor position on contamination of lightning current waves for measurements taken at short towers”**, *Proceedings of ICLP - International Conference on Lightning Protection*, França, setembro, 2004d.

VISACRO, S., FELIPE, M.A., OLIVEIRA, R.Z., SILVA, A.P., VALE, M.H.M, SOARES J., A., **“Non-conventional measures for improvement of lightning**

---

---

**performance of transmission lines**”, *Proceedings of ICLP - International Conference on Lightning Protection*, França, setembro, 2004e.

VISACRO, S., “**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia**”, livro, p. 1-272, Artliber Editora Ltda, São Paulo, Brasil, 2005a.

VISACRO, S., SOARES J., A., “**HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems**”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, n.2, p.1206-1208, abril, 2005b.

VISACRO, S., “**Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento**”, livro, p. 1-159, Editora ArtLiber, São Paulo, 2002, nova edição, 2005c.

VISACRO, S., SILVEIRA, F. H., “**Lightning Current Waves Measured at Short Instrumented Towers: the Influence of Sensor Position**”, *Geophysical Research Letters*, v.32, p. 1 - 5, 2005d.

VISACRO, S., “**A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents**”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.22, p. 381 - 386, 2007a.

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

---