

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1228

**CONTRIBUIÇÃO RELATIVA À INFLUÊNCIA DO EFEITO CORONA
NO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

SANY ALVES DE MACEDO

DATA DA DEFESA: 23/03/2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

**CONTRIBUIÇÃO RELATIVA À INFLUÊNCIA DO EFEITO CORONA
NO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

SANY ALVES DE MACEDO

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

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

Orientador: Prof. Fernando Henrique Silveira
Coorientador: Prof. Silvério Visacro Filho

BELO HORIZONTE

MARÇO – 2021

M141c	<p>Macedo, Sany Alves. Contribuição relativa à influência do efeito corona no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas [recurso eletrônico] / Sany Alves Macedo. – 2021. 1 recurso online (101 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Fernando Henrique Silveira. Coorientador: Silvério Visacro.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 96-101. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Raio - Teses. 3. Linha de transmissão - Teses. I. Silveira, Fernando Henrique. II. Visacro Filho, Silvério. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	---

"Contribuição Relativa À Influência do Efeito Corona No Desempenho de Linhas de Transmissão Frente A Descargas Atmosféricas"

Sany Alves de Macedo

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 23 de março de 2021.

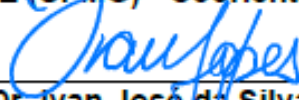
Por:



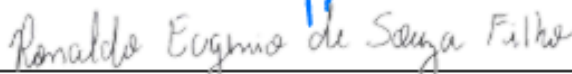
Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Silvério Visacro Filho
DEE (UFMG) - Coorientador



Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Ronaldo Eugenio De Souza Filho
Instituto de Ciências Tecnológicas (ICT) (Universidade Federal de Itajubá)

*Dedico este trabalho aos meus pais, Márcio
e Rosália e ao meu esposo, Carlos Henrique*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, pela vida e por todas as coisas.

Agradeço aos meus pais, Márcio e Rosália, por sempre me apoiarem e pelo incentivo em todas as etapas de minha vida.

Agradeço ao meu esposo, Carlos Henrique, companheiro de vida e de estudos desde os bons tempos de graduação, pelo apoio, carinho, paciência e compreensão ao longo dessa jornada.

Agradeço ao meu irmão André, pela amizade e apoio e ao meu sobrinho Calebe, pelos momentos de alegria e descontração.

Ao Professor Fernando Henrique Silveira, gostaria de manifestar a minha profunda admiração e agradecer pelos ensinamentos, dedicação, disponibilidade e paciência ao longo da orientação deste trabalho.

Ao Professor Silvério Visacro, coorientador, agradeço pelos ensinamentos, pelo apoio e pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho no LRC.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial a Laís, Reginaldo, André e Tiago, pelo suporte e compreensão.

Aos amigos do LRC, pelo conhecimento compartilhado e pela boa convivência. Em especial a Allan, Augusto, Fábio, Frederico, Rafael, Jaime e Júlio.

Um agradecimento especial à Professora Marília Bergamo e à querida amiga Elza, pelo apoio e compreensão nos momentos de revezamento entre a Escola de Belas Artes e a Escola de Engenharia.

Resumo

A incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão é responsável por grande parte dos desligamentos não programados dos sistemas elétricos. O cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas é de extrema relevância para a engenharia de proteção e projeto ao dar elementos para que intervenções sejam feitas na linha.

A ocorrência de correntes de descargas de elevada amplitude leva a um aumento do campo elétrico nas proximidades do condutor levando à ionização do ar ao redor do mesmo, sendo esse fenômeno não-linear denominado efeito corona. Neste trabalho é investigado este efeito em linhas de transmissão submetidas a uma elevada corrente de descarga e analisado como tal efeito influencia a sobretensão na cadeia de isoladores e consequentemente, o desempenho da linha frente ao fenômeno de *backflashover*.

Nesta dissertação de mestrado, o efeito corona é modelado através da expansão radial do raio do cabo para-raios. Foram realizadas simulações utilizando um modelo computacional com abordagem eletromagnética no domínio da frequência, HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*), para o cálculo das sobretensões na linha de transmissão e o método DE (*Disruptive Effect Method*) para avaliação da ocorrência de ruptura de isolamento da cadeia de isoladores da linha.

Os resultados obtidos indicaram que o efeito corona é responsável pela diminuição das sobretensões ao longo do cabo para-raios, além do aumento das sobretensões no condutor fase. Além disso, é observada uma diminuição da sobretensão na cadeia de isoladores e a consequente melhoria de desempenho da linha. No entanto, esse efeito se mostrou menos importante do que o comumente apresentado na literatura, sendo o efeito do aterramento elétrico da torre o agente de maior relevância no estabelecimento da corrente que flui pela torre e determina a sobretensão na cadeia de isoladores.

Palavras-chave: Efeito corona, *backflashover*, desempenho de linhas de transmissão, descargas atmosféricas.

Abstract

Direct lightning strikes in transmission lines are responsible for major part of transmission lines outages in electric systems. The assessment of lightning performance of transmission lines is extremely important for providing means to perform the necessary interventions on the analyzed line.

The incidence of high amplitude discharge currents on the shield wire leads to an increase in the electric field surrounding the conductor, leading to an air ionization around it, this nonlinear phenomenon being called corona effect. In this work, this effect is investigated in transmission lines submitted to high amplitude discharge currents and is analyzed how it influences in the insulator overvoltage and, consequently, in the lightning performance of the line considering the *backflashover* phenomenon.

In this work, corona effect is modeled considering a radial expansion of the radius conductor. Simulations were carried out using a computational electromagnetic model in frequency domain, HEM (Hybrid Electromagnetic Model), for overvoltage calculations in the transmission line and the DE method (Disruptive Effect Method) for evaluation of *flashover* occurrence at transmission line insulator.

The obtained results showed that corona effect representation led to a decrease of the overvoltage along the shield wire and an increase of overvoltage at phase conductor. Besides that, it was observed a decrease of the overvoltage developed across the insulator string, leading to the improvement of the lightning performance of the line. However, that improvement was less important than commonly presented in the literature, showing that the effect promoted by tower-footing grounding is the most relevant factor in the establishment of the current that flows through the tower, defining the insulator overvoltage.

Keywords: Corona effect, backflashover, lightning performance of transmission lines, lightning.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Representação de ruptura de isolamento por <i>flashover</i>	6
Figura 2.2 - Representação da ruptura de isolamento por <i>backflashover</i>	7
Figura 2.3 - Representação da ruptura a meio de vão	9
Figura 3.1 - O processo de avalanche de elétrons. Adaptado de EPRI (EPRI, 1982)....	12
Figura 3.2 - Linhas de transmissão 1 e 2 utilizadas nos experimentos de Wagner et al (1954). Adaptado de Wagner et al (1954)	14
Figura 3.3 - (a) Configuração utilizada, (b) Forma de onda da tensão no condutor em que foi aplicado o surto, (c) forma de onda de tensão no condutor adjacente em que surge uma tensão induzida. Adaptado de Wagner et al (1954).....	16
Figura 3.4 - Curva $q-v$ e capacitâncias. Adaptado de Hileman (1999).....	17
Figura 3.5 - (a) Curva $q-v$ para diferentes níveis de tensão, (b) Curva de tensão e curva de carga no tempo para o maior valor de tensão apresentado na letra (a). Adaptado de Wagner et al (1955).....	18
Figura 3.6 - Condutor e sua imagem sob o efeito corona. Adaptado de EPRI (EPRI, 1982)	21
Figura 3.7 - Curva $q-v$ e sua linearização no trabalho de Santiago et al (1987).....	23
Figura 3.8 - Decomposição da onda em parcelas. Adaptado de Santiago et al (1987) ..	24
Figura 3.9 - Linearização aproximada das curvas $q-v$ para a aplicação do modelo. Adaptado de Santiago et al (1987).....	25
Figura 3.10 - Representação da simulação do aumento da condutividade da área ao redor do cabo (a) Início do corona no condutor, (b) Expansão radial mudando a condutividade das células ao redor do cabo dentro de r_c . Adaptado de Thang et al (2011).....	30
Figura 3.11 - Simulação FDTD (para $\sigma = 100 \mu\text{S/m}$ nas células). Tensões medidas em 0 m, 660 m e 2,2 km da Linha 1 (cabo horizontal localizado a aproximadamente 15 m do solo. Coluna da esquerda: tensão aplicada negativa, $E_0 = 22 \text{ kV/cm}$ e $E_c = 15 \text{ kV/cm}$. Coluna da direita: Tensão aplicada positiva, $E_0 = 21 \text{ kV/cm}$ e $E_c = 5 \text{ kV/cm}$. (a) Tensão aplicada de 1700 kV para polaridade negativa e 1600 kV para a polaridade positiva (b) Tensão aplicada de 1300 kV para	

ambas as polaridades e (c) Tensão aplicada de 800 kV para ambas as polaridades. Adaptado de Thang et al (2012).....	32
Figura 4.1 – Fluxograma indicativo das etapas de cálculo do raio de corona.....	37
Figura 4.2 - Raios de corona para diferentes valores de campo elétrico crítico para configuração sem torres	39
Figura 4.3 - Torre de 138 kV utilizada nas simulações	40
Figura 4.4 – Representação da configuração da linha com uma torre.....	41
Figura 4.5 - Raios de corona para simulação com apenas uma torre. (a) Injeção no topo da torre (b) Injeção a 200 m do topo da torre	42
Figura 4.6 - Representação da configuração da linha com 3 torres.....	43
Figura 4.7 - Raios de corona para simulação com torres adjacentes. (a) Injeção no topo da torre (b) Injeção no meio do vão.....	44
Figura 4.8 - 1ª linha: Tensões relacionadas à divisão em parcelas. (a) Corrente da parcela 1 (b) Corrente da parcela 2 (c) Corrente da parcela 3, (d) Parcelas 1,2 e 3 (e) Resultado da soma das parcelas – onda de 1,8 kA - 3,8/75 μ s.....	47
Figura 5.1 - Torre de 138 kV utilizada nas simulações	49
Figura 5.2 - Configuração utilizada para simulações somente com o cabo para-raios ..	50
Figura 5.3 - Tensões ao longo do cabo para-raios para injeção de corrente em 0 m. (a) Tensão no ponto de incidência, (b) Tensão a 100 m do ponto de incidência, (c) Tensão a 200 m do ponto de incidência. Curva em preto: sem corona; curva em azul: corona relativo a um raio de 40 cm.....	50
Figura 5.4 - Configuração da linha sem torres adjacentes – Incidência de descarga no topo da torre ou no meio do vão	52
Figura 5.5 - Tensões ao longo do cabo para-raios para configuração sem torres adjacentes. Injeção no topo da torre. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$, (c) $Z_p= 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão no ponto de incidência; coluna central: tensão a 100 m do ponto de incidência; coluna da direita: tensão a 200 m do ponto de incidência. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100$ kA	53
Figura 5.6 - Tensões na estrutura, fase e cadeia superior para configuração sem torres adjacentes. Injeção no topo da torre. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$, (c) $Z_p= 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão na estrutura superior; coluna central: tensão	

na fase superior; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior.
 Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100$ kA 55

Figura 5.7 - Corrente na torre para injeção no topo da torre na configuração sem torres adjacentes. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$ e (c) $Z_p= 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100$ kA 56

Figura 5.8 - Tensões ao longo do cabo para-raios para configuração sem torres adjacentes. Injeção no meio do vão. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$, (c) $Z_p= 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão no ponto de incidência; coluna central: tensão a 100m do ponto de incidência; coluna da direita: tensão no topo da torre. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100$ kA 57

Figura 5.9 - Tensões na estrutura, fase e cadeia de isoladores superior para configuração sem torres adjacentes. Injeção no meio do vão. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$, (c) $Z_p= 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão na estrutura superior; coluna central: tensão na fase superior; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100$ kA 59

Figura 5.10 - Corrente na torre para injeção no meio do vão na configuração sem torres adjacentes. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$ e (c) $Z_p= 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100$ kA 60

Figura 5.11 - Configuração da linha com torres adjacentes – Incidência no topo da torre ou no meio do vão..... 62

Figura 5.12 - Tensões ao longo do cabo para-raios para configuração com torres adjacentes. Injeção no topo da torre. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$, (c) $Z_p= 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão no ponto de incidência; coluna central: tensão a 100m do ponto de incidência; coluna da direita: tensão a 200m do ponto de incidência. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100$ kA 62

-
- Figura 5.13 - Tensões na estrutura, fase e cadeia de isoladores superior para configuração com torres adjacentes. Injeção no topo da torre. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão na estrutura superior; coluna central: tensão na fase superior; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$ 63
- Figura 5.14 - Corrente na torre para injeção no topo da torre na configuração com torres adjacentes. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$ e (c) $Z_p = 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$ 65
- Figura 5.15 - Tensões ao longo do cabo para-raios para configuração com torres adjacentes. Injeção no meio do vão. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão no ponto de incidência; coluna central: tensão a 100m do ponto de incidência; coluna da direita: tensão no topo da torre. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$ 68
- Figura 5.16 - Tensões na estrutura, fase e cadeia de isoladores superior para configuração com torres adjacentes. Injeção no meio do vão. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão na estrutura superior; coluna central: tensão na fase superior; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$ 69
- Figura 5.17 - Corrente na torre para injeção no meio do vão na configuração com torres adjacentes. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$ e (c) $Z_p = 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$ 71
- Figura 5.18 - Tensões na fase e cadeia de isoladores inferior e superior para Z_p igual a 20Ω . Injeção no meio do vão. (a) Tensões na fase, (b) Tensões na cadeia de isoladores. Coluna da esquerda: casos sem corona; coluna central: casos com corona referente a 31 kA ; coluna da direita: casos com corona referente a 100 kA 74
-

-
- Figura 5.19 - Tensões na fase e cadeia de isoladores inferior e superior para Z_p igual a 40 Ω . Injeção no meio do vão. (a) Tensões na fase, (b) Tensões na cadeia de isoladores. Coluna da esquerda: casos sem corona; coluna central: casos com corona referente a 31 kA; coluna da direita: casos com corona referente a 100 kA 74
- Figura 5.20 - Tensões na fase e cadeia de isoladores inferior e superior para Z_p igual a 80 Ω . Injeção no meio do vão. (a) Tensões na fase, (b) Tensões na cadeia de isoladores. Coluna da esquerda: casos sem corona; coluna central: casos com corona referente a 31 kA; coluna da direita: casos com corona referente a 100 kA 75
- Figura 5.21 - Tensões na cadeia de isoladores superior para injeção de corrente no meio do vão. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$; coluna da direita: casos com corona referente a 100 kA. Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo à corrente crítica 78
- Figura 5.22 - Tensões ao longo do cabo para-raios para $Z_p = 20 \Omega$. Injeção no meio do vão. (a) Tensão no ponto de incidência (200 m), (b) Tensão a 100m do ponto de incidência, (c) tensão no topo da torre, (d) zoom da tensão em (b) e (e) zoom da tensão em (c). Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I=100$ kA; curva em azul: soma das parcelas de correntes resultante em corona referente a 100 kA 80
- Figura 5.23 - Tensões ao longo do cabo para-raios para $Z_p = 40 \Omega$. Injeção no meio do vão. (a) Tensão no ponto de incidência (200 m), (b) Tensão a 100m do ponto de incidência, (c) tensão no topo da torre, (d) zoom da tensão em (b) e (e) zoom da tensão em (c). Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I=100$ kA; curva em azul: soma das parcelas de correntes resultante em corona referente a 100 kA 81
- Figura 5.24 - Tensões ao longo do cabo para-raios para $Z_p = 80 \Omega$. Injeção no meio do vão. (a) Tensão no ponto de incidência (200 m), (b) Tensão a 100m do ponto de incidência, (c) tensão no topo da torre, (d) zoom da tensão em (b) e (e) zoom da tensão em (c). Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I=100$ kA; curva em azul: soma das parcelas de correntes resultante em corona referente a 100 kA 81
-

-
- Figura 5.25 - Injeção no meio do vão - $Z_p = 20 \Omega$. 1ª linha: Tensões relacionadas à divisão da corrente em parcelas: (a) Tensão na estrutura (b) tensão na fase (c) tensão na cadeia de isoladores. 2ª linha: comparação da divisão em parcelas em relação aos casos sem corona e com corona relativo à $I = 100 \text{ kA}$ (injeção de corrente única) - (d) Tensão na estrutura (e) tensão na fase (f) tensão na cadeia de isoladores superior 82
- Figura 5.26 - Injeção no meio do vão - $Z_p = 40 \Omega$. 1ª linha: Tensões relacionadas à divisão da corrente em parcelas: (a) Tensão na estrutura (b) tensão na fase (c) tensão na cadeia de isoladores. 2ª linha: comparação da divisão em parcelas em relação aos casos sem corona e com corona relativo à $I = 100 \text{ kA}$ (injeção de corrente única) (d) Tensão na estrutura (e) tensão na fase (f) tensão na cadeia de isoladores superior 83
- Figura 5.27 - Injeção no meio do vão - $Z_p = 80 \Omega$. 1ª linha: Tensões relacionadas à divisão da corrente em parcelas: (a) Tensão na estrutura (b) tensão na fase (c) tensão na cadeia de isoladores. 2ª linha: comparação da divisão em parcelas em relação aos casos sem corona e com corona relativo à $I = 100 \text{ kA}$ (injeção de corrente única) (d) Tensão na estrutura (e) tensão na fase (f) tensão na cadeia de isoladores superior 83
- Figura 5.28 - Comparação das correntes na torre para injeção no meio do vão. (a) $Z_p = 20 \Omega$ (b) $Z_p = 40 \Omega$ e (c) $Z_p = 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$; curva em azul: soma das parcelas de correntes resultante em corona referente a 100 kA 84
- Figura 5.29 - Tensões para simulações com perdas sem variação dos parâmetros com a frequência – $Z_p = 20 \Omega$. (a) Tensão na fase (b) Tensão na cadeia de isoladores superior 86
- Figura 5.30 - Tensões para simulações com perdas com e sem variação dos parâmetros com a frequência – $Z_p = 20 \Omega$. (a) e (c) Tensão na fase (b) e (d) Tensão na cadeia de isoladores. Primeira linha: $1000 \Omega \cdot \text{m}$ e segunda linha $4000 \Omega \cdot \text{m}$ 87
- Figura 5.31 - Tensões para simulações com perdas e com perdas e corona – $Z_p = 20 \Omega$. (a) $1000 \Omega \cdot \text{m}$ (b) $4000 \Omega \cdot \text{m}$. Coluna da esquerda: tensão na estrutura; coluna central: tensão na fase; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: resultados sem o efeito corona, curva em azul: resultados com o raio de corona referente à corrente crítica 89
-

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Número máximo de desligamentos da linha definido pelo ONS (Adaptado de (ONS, 2020)).....	1
Tabela 3.1 - Características das linhas de 500 kV utilizadas nos testes	15
Tabela 4.1 - Valores de campo elétrico crítico e tensão de início de corona para diferentes referências considerando a injeção de uma corrente de 1 kA.....	38
Tabela 4.2 - Raios de corona para configuração sem torres calculados para diferentes valores de campo elétrico crítico de acordo com a corrente.....	39
Tabela 4.3 - Valores máximos de tensão no ponto de injeção de corrente para configuração com uma torre	41
Tabela 4.4 - Raios de corona calculados para configuração sem torres adjacentes de acordo com a corrente injetada	42
Tabela 4.5 - Valores máximo de tensão no ponto de injeção de corrente para configuração com torres adjacentes.....	43
Tabela 4.6 - Valores máximo de tensão no ponto de injeção de corrente para os casos com torres adjacentes e sem torres adjacentes.....	44
Tabela 4.7 - Raios de corona calculados para configuração com torres adjacentes de acordo com a corrente injetada	45
Tabela 4.8 - Valores de raio de corona e de corrente referentes às parcelas da divisão para injeção de corrente no meio do vão	46
Tabela 5.1 - Valores de raios de corona para configuração sem torres adjacentes	52
Tabela 5.2 - Valores máximos de tensão na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior para configuração sem torres adjacentes – injeção de corrente no topo da torre.....	55
Tabela 5.3 - Valores máximos de corrente na torre para configuração sem torres adjacentes – injeção de corrente no topo da torre.....	56
Tabela 5.4 - Valores máximos de tensão na estrutura, na fase e na cadeia superior para configuração sem torres adjacentes – injeção de corrente no meio do vão .	59

Tabela 5.5 - Valores máximos de corrente na torre para configuração sem torres adjacentes – injeção de corrente no meio do vão	60
Tabela 5.6 - Valores de raios de corona para configuração com torres adjacentes.....	61
Tabela 5.7 - Valores máximos de tensão na estrutura, na fase e na cadeia superior – injeção de corrente no topo da torre	64
Tabela 5.8 - Valores máximos de corrente na torre para configuração com torres adjacentes – injeção de corrente no topo da torre.....	65
Tabela 5.9 - Valores de corrente crítica e de percentual de <i>backflashover</i> para configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no topo da torre	66
Tabela 5.10 - Valores máximos de tensão na estrutura, na fase e na cadeia superior para configuração com torres adjacentes – injeção de corrente no meio de vão.	70
Tabela 5.11 - Valores máximos de corrente na torre para configuração com torres adjacentes – injeção de corrente no meio do vão	71
Tabela 5.12 - Valores de corrente crítica e de percentual de <i>backflashover</i> para configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão.	72
Tabela 5.13 - Valores máximos de tensão na fase e na cadeia inferior e superior – injeção de corrente no meio de vão	76
Tabela 5.14 – Valores de corrente crítica e de percentual de <i>backflashover</i> para a cadeia de isoladores inferior - configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão	77
Tabela 5.15 - Valores de corrente crítica para simulação sem corona e os raios de corona correspondentes para configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão	77
Tabela 5.16 - Tensões máximas na cadeia de isoladores superior - Injeção de corrente no meio do vão.....	78
Tabela 5.17 - Valores de corrente crítica e de percentual de <i>backflashover</i> para configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão – casos com o raio de corona referente às correntes críticas	79
Tabela 5.18 - Comparação de correntes críticas e percentual de <i>backflashover</i> (injeção no meio do vão) - Casos com torres adjacentes.....	84
Tabela 5.19 - Valores de corrente crítica e de percentual de <i>backflashover</i> para casos com perdas sem corona – injeção de corrente no meio do vão e $Z_p = 20 \Omega$	88

Tabela 5.20 - Valores de raio de corona calculados de acordo com a corrente crítica considerando perdas na propagação - $Z_p = 20 \Omega$	89
Tabela 5.21 - Valores de corrente crítica e de percentual de <i>backflashover</i> para casos sem perdas sem corona, com perdas sem corona e com perdas com corona – injeção de corrente no meio do vão - $Z_p = 20 \Omega$ – Variação percentual em relação ao caso sem corona e sem perdas	90
Tabela 5.22 - Valores de corrente crítica e de percentual de <i>backflashover</i> para casos com perdas sem corona e com perdas com corona – injeção de corrente no meio do vão - $Z_p = 20 \Omega$ – Variação percentual em relação ao caso sem corona e com perdas	91

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Relevância e Motivação.....	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Metodologia	3
1.4	Organização do texto	4
2	Efeitos de descargas diretas em linhas de transmissão	5
2.1	Fenômeno.....	5
2.2	Flashover.....	5
2.3	Backflashover	7
2.4	Ruptura a meio de vão	9
2.5	Comentários finais	10
3	Efeito corona em linhas de transmissão	11
3.1	Introdução	11
3.2	O processo de estabelecimento do efeito corona	11
3.3	O Efeito Corona em Linhas de Transmissão	13
3.3.1	Tensão de início de corona	19
3.3.2	Cálculo do Raio Crítico e do Raio Efetivo	20
3.4	Modelagens tradicionais do efeito corona em linhas de transmissão ...	23
3.4.1	Linearização da curva q-v.....	23
3.4.2	Representação do aumento do raio do condutor.....	26
3.4.3	Modelagem utilizando FDTD – Finite-Difference Time-Domain ..	29
3.5	Comentários Finais	33
4	Metodologia para representação do efeito corona no modelo HEM.....	34

4.1	Introdução	34
4.2	O modelo HEM.....	34
4.3	Representação do raio de corona do condutor	35
4.4	Cálculo dos raios de corona	38
4.4.1	Caso 1: Ausência de torres	38
4.4.2	Caso 2: Presença de uma torre.....	40
4.4.3	Caso 3: Presença de 3 torres	42
4.5	Metodologia para representação da dinâmica do efeito corona em linhas.....	46
5	Resultados e Análises.....	48
5.1	Introdução	48
5.2	Simulações somente com cabo para-raios	50
5.3	Configuração: Linha com apenas uma torre (ausência de torres adjacentes).....	51
5.3.1	Injeção de corrente no topo da torre	52
5.3.2	Injeção de corrente no meio do vão.....	57
5.4	Configuração: Linha com torres adjacentes.....	61
5.4.1	Injeção de corrente no topo da torre	62
5.4.2	Injeção de corrente no meio do vão.....	67
5.4.3	Resultados para a fase e cadeia de isoladores inferior - Injeção de corrente no meio do vão	73
5.4.4	Representação do efeito corona associado às correntes críticas.....	77
5.4.5	Resultados referentes à representação da dinâmica do efeito corona: divisão da onda de corrente injetada em parcelas	80
5.5	Efeitos Conjugados: Corona e Perdas na propagação em decorrência da resistividade elétrica do solo.....	85
5.5.1	Efeito das perdas na propagação	86

5.5.2	Efeito corona considerando as perdas na propagação	88
6	Considerações finais e propostas de continuidade	92
6.1	Considerações finais	92
6.1.1	Injeção de corrente no topo da torre	92
6.1.2	Injeção de corrente no meio do vão.....	93
6.1.3	Propostas de continuidade	95
	Referências Bibliográficas.....	96

1 Introdução

1.1 Relevância e Motivação

A incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão é responsável por grande parte dos desligamentos não programados dos sistemas elétricos. Esses desligamentos promovem a interrupção no fornecimento de energia, resultando em prejuízos para as companhias de energia elétrica e seus consumidores. O cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas é de extrema relevância para a engenharia de proteção e projeto ao dar elementos para que intervenções sejam feitas na linha, buscando a adequação de sua taxa de desligamentos a índices de desempenho estipulados pelas agências reguladoras. Geralmente esses índices são mensurados através do número total de desligamentos por 100 km da linha de transmissão por ano (desligamentos/100 km/ano). O ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) define nos Procedimentos de Rede: Submódulo 2.7 – Requisitos mínimos para linhas de transmissão (ONS, 2020), o número máximo de desligamentos da linha causados por descargas atmosféricas para linhas de transmissão que integram a Rede Básica (linhas de transmissão, barramentos, transformadores e equipamentos de subestação de tensão igual a superior a 230 kV). A Tabela 1.1 indica as taxas de desligamentos consideradas aceitáveis pelo ONS.

Tabela 1.1 - Número máximo de desligamentos da linha definido pelo ONS (Adaptado de (ONS, 2020))

Classe de tensão	Número máximo de desligamentos por 100 km por ano
≥ 345 kV	1
230 kV	2

Os procedimentos para cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas são complexos e envolvem a modelagem de diversos fatores capazes de afetar o resultado final. Dentre as abordagens para cálculo das sobretensões

que tem influência direta no desempenho, destacam-se as abordagens analíticas (CIGRE, 1991), (IEEE Std. 1243, 1997), por parâmetros de circuitos distribuídos (Martinez, et al., 2005), (Almeida, 2020) e eletromagnéticas, (Visacro, et al., 2005), (Thang, et al., 2011), (CIGRE, 2019). Além disso, as abordagens de cálculo podem ser classificadas quanto à forma de representação dos parâmetros do sistema e o cálculo das sobretensões associadas, no domínio do tempo ou da frequência. Neste contexto, a análise de desempenho de linhas frente a descargas é tema complexo e requer contínuo desenvolvimento para evolução do conhecimento no tema, principalmente no que se refere aos procedimentos para representação dos parâmetros e cálculo desse desempenho alinhado às condições típicas do ambiente no qual as linhas estão instaladas.

Esta dissertação de mestrado aborda a influência da representação do efeito corona nas sobretensões resultantes em linhas de transmissão e, conseqüentemente, no seu desempenho frente ao fenômeno de *backflashover*. Tal fenômeno não-linear associado à ocorrência de corrente de descarga de elevada amplitude surge após o campo elétrico nas proximidades do condutor exceder ao valor crítico associado à rigidez dielétrica do ar, levando à sua ionização. Este efeito resulta na injeção de cargas no entorno do condutor, contribuindo para atenuar as sobretensões associadas às correntes das descargas. Sendo assim, existe a expectativa de que sua ocorrência esteja associada à redução da probabilidade de desligamentos da linha, principalmente no caso de incidência da descarga no meio do vão, quando há a propagação do surto ao longo dos condutores da linha.

A modelagem do efeito corona constitui tema complexo, sendo objeto de diversas publicações da literatura [(Santiago, 1987), (Al Tai, 1989), (Gary, 1989), (Carneiro, 1991), (Barros, et al., 1994), (Thang, et al., 2011), (Pereira, et al., 2020) etc] e sua inclusão segundo abordagem eletromagnética avançada tem potencial para contribuir para a evolução científica do tema análise de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é investigar o efeito corona em linhas de transmissão quando submetidas a uma corrente de descarga atmosférica através da aplicação de modelagem eletromagnética avançada no domínio da frequência (Visacro, et al., 2005) e

avaliar como tal efeito afeta a sobretensão resultante na cadeia de isoladores e consequentemente, o desempenho da linha em termos de *backflashover*.

Os desenvolvimentos do trabalho consideraram o cálculo de sobretensões nos isoladores das linhas assumindo o efeito corona no entorno dos cabos da linha, os complexos acoplamentos eletromagnéticos entre os elementos do sistema, incluindo as perdas elétricas no processo de propagação dos surtos.

Neste trabalho, o efeito corona foi representado como uma extensão radial do raio do cabo para-raios de acordo com fórmulas propostas em EPRI (EPRI, 1982) e CIGRE (CIGRE, 1991). Essa extensão do raio foi realizada no modelo HEM através da modificação dos elementos próprios de uma matriz que representa o efeito transversal em cada segmento do sistema analisado. Pretende-se contribuir para a modelagem do efeito corona em linhas e apresentar elementos referentes aos efeitos causados pelo fenômeno para o desempenho da linha em termos de *backflashover*. Alguns resultados deste trabalho de dissertação foram discutidos no artigo Macedo et al (2021).

1.3 Metodologia

A metodologia empregada nesta dissertação de mestrado consistiu na realização de simulações computacionais sistemáticas utilizando modelagem computacional avançada com abordagem eletromagnética, Hybrid Electromagnetic Model – HEM (Visacro, et al., 2005), para o desenvolvimento de análises de sensibilidade referentes às sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores de linhas de transmissão pela incidência direta de descargas nos cabos de blindagem das linhas. A determinação da ocorrência de ruptura do isolamento das linhas foi realizada com base no Método DE (*Disruptive Effect Method*) (Hileman, 1999). Tais simulações contemplam a representação do efeito corona, além da representação das perdas ao longo dos condutores da linha durante a propagação do surto de tensão. Desenvolve-se também uma metodologia para representação do efeito corona no modelo HEM de modo a representar a variação do efeito ao longo do tempo. Além disso, a representação eletromagnética apurada dos componentes da linha mais importantes para determinação das sobretensões nas cadeias de isoladores, sobretudo o sistema de aterramento da torre, foi considerada.

1.4 Organização do texto

O texto desta dissertação encontra-se organizado em 6 capítulos, incluindo a presente *Introdução*.

No *Capítulo 2* são apresentados os efeitos de descargas diretas em linhas de transmissão, evidenciando os mecanismos de ruptura de isolamento na cadeia de isoladores que levam ao desligamento da linha.

No *Capítulo 3* são apresentados aspectos importantes referentes ao efeito corona em linhas de transmissão, como a descrição do fenômeno, a apresentação das equações necessárias para realizar a modelagem do mesmo e também a apresentação de modelos adotados na literatura.

O *Capítulo 4* contempla a descrição da modelagem de expansão radial utilizada para as simulações do efeito corona no modelo HEM, o cálculo dos parâmetros necessários e as configurações utilizadas para a simulação do fenômeno.

O *Capítulo 5* contempla os resultados da aplicação da modelagem de expansão radial do raio do cabo para-raios para representação do efeito corona, as análises dos resultados e as comparações de desempenho das simulações sem e com a consideração do efeito corona.

As principais conclusões deste trabalho são apresentadas no *Capítulo 6* juntamente com as propostas de continuidade de estudos sobre o tema. Posteriormente, são apresentadas as *Referências Bibliográficas* citadas ao longo do texto e que foram utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

2 Efeitos de descargas diretas em linhas de transmissão

2.1 Fenômeno

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão é responsável pela maioria dos desligamentos de linhas. A ruptura do isolamento devido à incidência da descarga em uma linha depende de características como a tensão de operação, a suportabilidade da cadeia de isoladores e o valor da impedância de aterramento das torres. Em linhas de alta tensão existem três fenômenos principais que ocasionam esses desligamentos: *flashover*, *backflashover* e *ruptura a meio de vão*. Tais fenômenos serão discutidos a seguir.

2.2 Flashover

O *flashover* é o mecanismo de falha de isolamento relacionado a uma descarga que atinge diretamente o cabo fase da linha de transmissão. A incidência de uma descarga diretamente no cabo fase pode ocorrer devido a uma falha de blindagem ou em linhas em que o cabo de blindagem não está presente.

Quando uma descarga direta atinge o cabo fase da linha de transmissão, tensões elevadas podem ser estabelecidas no cabo fase em relação ao potencial do solo. Se a incidência da descarga ocorrer no meio do vão, a corrente se divide em duas parcelas de amplitudes semelhantes e cada parcela se propaga para um lado da linha. Associada a cada onda de corrente que se propaga existe uma onda de tensão e, o valor máximo desta onda de tensão pode ser aproximado pela multiplicação do valor de pico da onda de corrente pela impedância de surto da linha (Visacro, 2007).

Quando as ondas de tensão e corrente alcançam a primeira estrutura aterrada, a cadeia de isoladores que separa a fase da estrutura é submetida a um alto valor de tensão. Esse valor pode ser maior que a suportabilidade do isolador e, caso seja, ocorre uma falha de isolamento e um arco elétrico é estabelecido através do ar entre a fase e a estrutura aterrada. Este fenômeno é caracterizado como *flashover* e está representado na Figura 2.1. A corrente de descarga flui através do arco para a estrutura e da estrutura para o solo. Após um curto intervalo de tempo, essa corrente se extingue devido à sua natureza de curta duração. Porém, é possível que o arco entre a estrutura e o isolador não seja extinto, pois a tensão operacional da linha pode ser capaz de sustentá-lo e, desta forma, a corrente de operação da linha continua fluindo pelo arco, configurando um curto-circuito. Após um certo período de tempo, os relés do sistema de proteção são sensibilizados pela corrente de curto-circuito e atuam desligando a linha (Visacro, 2005).

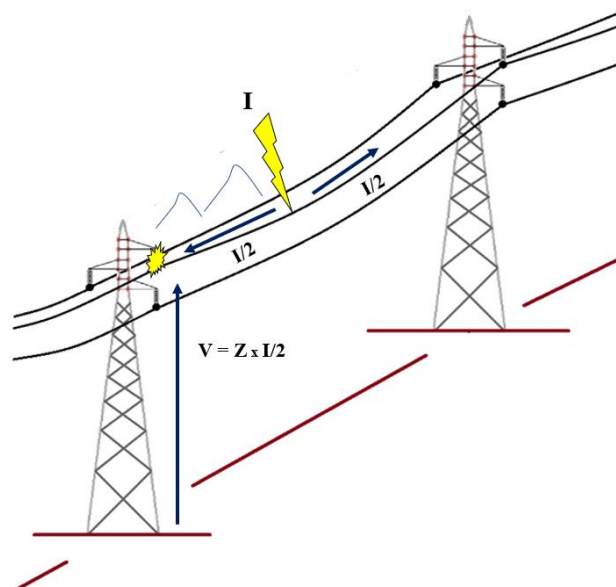


Figura 2.1 - Representação de ruptura de isolamento por *flashover*

Para evitar a ocorrência de *flashover* na linha de transmissão, a principal prática é a instalação de cabos de blindagem (também chamados de cabos guarda ou cabos para-raios) acima dos condutores fase. Esses cabos são conectados às torres metálicas aterradas ou, em caso de estruturas de madeira, são conectados ao solo através de condutores verticais conectados aos eletrodos de aterramento (Visacro, 2007).

A instalação dos cabos para-raios ajuda a diminuir a ocorrência do fenômeno de *flashover*, porém, não inibe a ocorrência de falha de blindagem e consequente ruptura de

isolamento. Neste novo cenário ocorre um outro tipo de fenômeno que pode levar à ruptura do isolamento e consequentemente ao desligamento da linha. Os detalhes deste fenômeno são descritos no próximo tópico.

2.3 Backflashover

Em uma linha de transmissão, a instalação do cabo para-raios tem como objetivo interceptar descargas atmosféricas que, no caso da ausência destes, incidiriam sobre os condutores fase da linha. Esses cabos são posicionados de acordo com a configuração da linha (podem ser utilizados um ou dois cabos para-raios), de forma que, na ocorrência de uma descarga atmosférica, dentro de determinada faixa de amplitudes da corrente de descarga, os cabos fases estarão blindados pela presença do cabo para-raios. Eles são conectados ao solo em cada estrutura através da própria estrutura metálica, que é aterrada ou, caso a estrutura não seja metálica, através de cabos de descida conectados no aterramento da linha. Consequentemente, as correntes de descarga que incidirem no cabo para-raios serão direcionadas para o solo (Visacro, 2005). Porém, apesar dessas medidas, é possível ocorrer falha do isolamento da linha por um fenômeno conhecido como *backflashover*. O *backflashover* é o mecanismo de falha de isolamento relacionado a uma descarga que atinge diretamente a torre ou o cabo para-raios da linha de transmissão. A Figura 2.2 ilustra a ocorrência de *backflashover* em uma linha.

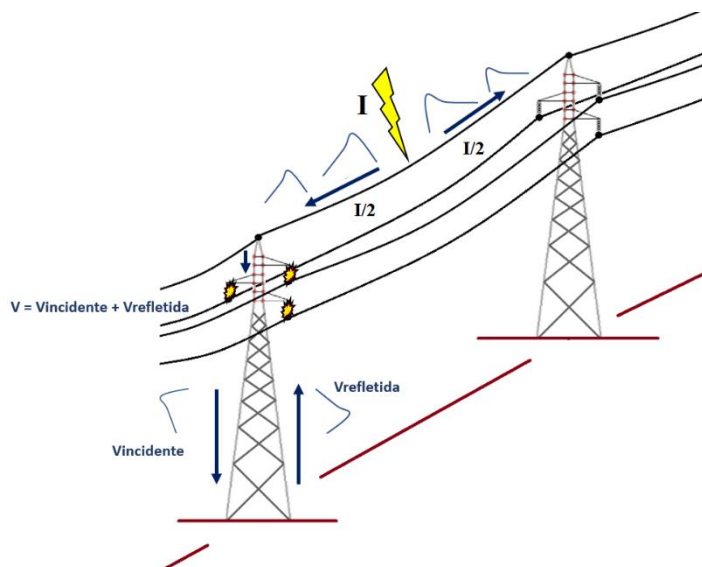


Figura 2.2 - Representação da ruptura de isolamento por *backflashover*

O processo inicial ocorre de forma semelhante ao descrito no item anterior: a descarga atmosférica atinge o cabo para-raios e a onda de corrente desta descarga se

divide em duas parcelas de amplitudes semelhantes. Cada parcela se propaga para um lado da linha e, associada a cada onda de corrente existe uma onda de tensão cujo valor máximo pode ser aproximado pela multiplicação do valor de pico da onda de corrente pela impedância de surto da linha. As ondas se propagam até alcançar a torre mais próxima e, neste ponto, a corrente se divide novamente: uma parcela é refletida devido à descontinuidade da impedância de surto da torre (Z_T) com a impedância de surto da linha (Z_S), outra parcela continua se propagando pelo cabo e a maior parte desce pela torre em direção ao solo. Essa última, ao alcançar o solo, é submetida a uma reflexão devido a descontinuidade da impedância de surto da torre (Z_T) com a impedância de aterramento (Z_A). Essa reflexão pode ser calculada a partir do coeficiente de reflexão dado por Γ . As equações utilizadas para o cálculo do coeficiente de reflexão e da tensão refletida são apresentadas a seguir:

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_T}{Z_A + Z_T} \quad (2.1)$$

$$V_R = \Gamma \cdot V_I \quad (2.2)$$

Sendo Γ o coeficiente de reflexão, Z_A a impedância de aterramento, Z_T a impedância da torre, V_R a tensão refletida e V_I a tensão incidente no aterramento.

A partir da análise da equação 2.1, observa-se que o valor do coeficiente de reflexão pode variar de -1 a 1. Caso a impedância de aterramento tenha valor muito menor do que o valor da impedância da torre, o coeficiente de reflexão será negativo, com um valor mais próximo a -1. Esta é a situação ideal, pois ao somar a onda incidente com a onda refletida no topo da torre (considerando o tempo de trânsito da onda refletida), haverá uma diminuição da sobretensão no topo da torre. A sobretensão na cadeia de isoladores é calculada pela diferença entre a tensão na torre no ponto em que é instalada a cadeia de isoladores, que é muito semelhante à tensão no topo da torre, e a tensão na fase. Se a sobretensão neste ponto da torre for muito alta, ela pode exceder a suportabilidade do isolamento, causando uma ruptura do isolamento da estrutura para a fase (Visacro, 2005). Esse fenômeno é denominado *backflashover*.

O processo foi descrito para uma descarga que atingiu o cabo para-raios, porém o *backflashover* também pode ocorrer se a descarga atmosférica atingir o topo da torre. A

diferença é que não haverá o tempo de deslocamento que existe quando, ao atingir o cabo para-raios, a onda de corrente se propaga até alcançar a torre. Este fenômeno é muito comum nas linhas de transmissão e os estudos desenvolvidos neste trabalho consideram a sua ocorrência.

2.4 Ruptura a meio de vão

Em casos de linhas de transmissão que possuem vãos muito extensos, ao ocorrer uma descarga no meio do vão, a sobretensão atingida pode ser tão alta que a rigidez dielétrica do ar é rompida e ocorre um arco elétrico entre o cabo para-raios atingido pela descarga e o cabo fase mais próximo. Esse fenômeno é conhecido como ruptura a meio de vão. A Figura 2.3 ilustra a ocorrência do fenômeno.

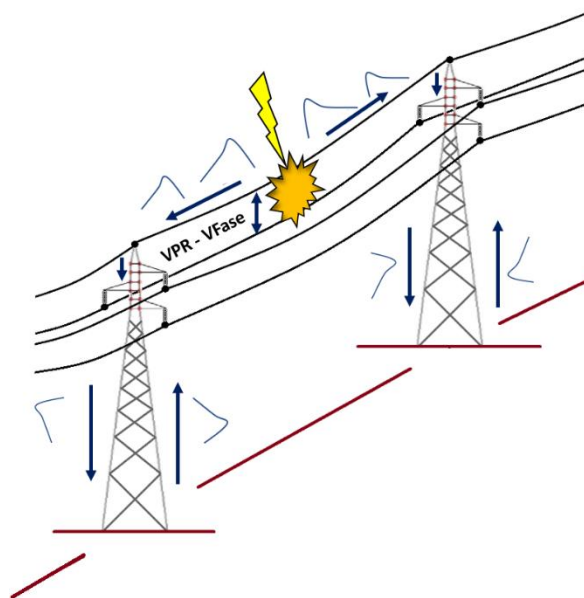


Figura 2.3 - Representação da ruptura a meio de vão

Da mesma forma que no fenômeno de *backflashover*, a descarga atmosférica atinge o cabo para-raios e a onda de corrente desta descarga se divide em duas parcelas de amplitudes semelhantes. As ondas se propagam até alcançar a torre mais próxima e a parcela que desce pela torre até o aterramento sofre reflexão e esta onda refletida retorna para o ponto de incidência. Porém, como o vão é muito extenso, o tempo de trânsito para que a onda se propague até o aterramento da torre, sofra reflexão e retorne para o ponto de incidência, é longo. Desta forma, a onda incidente chega ao seu valor máximo antes da onda refletida retornar e a sobretensão resultante pode atingir valores muito elevados. Sendo assim, a onda incidente prevalece e a soma com a onda refletida não faz mais

diferença para a redução do valor máximo de tensão. Apesar da sobretensão ser muito alta, a ruptura só vai ocorrer se o campo elétrico médio entre a fase e o cabo para-raios for suficientemente alto. Em Udo (1965) é sugerido um valor de campo elétrico médio crítico de aproximadamente 623 kV/m para descargas de polaridade negativa.

2.5 Comentários finais

Esta dissertação investiga o comportamento da sobretensão na cadeia de isoladores quando uma descarga atinge o cabo para-raios considerando o fenômeno de corona neste cabo.

Quando uma descarga de corrente elevada incide no cabo para-raios ocorre o fenômeno de corona que afeta a propagação das ondas no cabo, podendo influenciar a sobretensão resultante na cadeia de isoladores e, conseqüentemente, a probabilidade de ocorrência de *backflashover*. Tem-se uma expectativa de que esse efeito corona promova uma redução da sobretensão na cadeia de isoladores (Thang, et al., 2013), e conseqüentemente uma melhoria de desempenho da linha. Desta forma, o próximo capítulo apresenta os aspectos básicos do efeito corona em linhas de transmissão e algumas de modelagens que podem ser utilizadas para simulação deste fenômeno neste contexto.

3 Efeito corona em linhas de transmissão

3.1 Introdução

O efeito corona é um fenômeno de comportamento não-linear que ocorre quando o campo elétrico próximo a um condutor excede um determinado valor de campo elétrico crítico, provocando a ionização da região ao redor do mesmo (EPRI, 1982). O campo elétrico em torno do condutor pode aumentar devido à elevação de tensão no próprio condutor ou devido à elevação do campo elétrico no ambiente em que ele está imerso. Como resultado desse aumento de campo elétrico, há uma elevação da tensão no condutor e, a partir de uma tensão específica denominada tensão de início de corona ou tensão crítica, *streamers* podem ser formados em seu entorno. Este aumento da ionização do ar pode ser modelado através de um aumento do raio do condutor (McCann, 1943) e conseqüentemente, de um aumento da capacitância transversal desta linha (Santiago, 1987).

3.2 O processo de estabelecimento do efeito corona

O efeito corona é um fenômeno que se desenvolve de forma radial a partir da superfície do condutor, que ioniza o ar ao redor deste a partir de determinado valor de campo elétrico. Este campo elétrico é conhecido como campo elétrico crítico e seu valor, segundo Peek (1911), depende de fatores como pressão, umidade do ar e características do próprio condutor. Peek (1915) apresenta de forma pioneira uma equação para o cálculo do valor deste campo elétrico crítico E_c ,

$$E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}}\right) \text{ kV/cm} \quad (3.1)$$

Onde m é a rugosidade da superfície, δ é a umidade relativa do ar e r é o raio do condutor.

Descargas elétricas geralmente são causadas por um campo elétrico que acelera os elétrons livres em um meio gasoso. Quando tais elétrons ganham energia suficiente, eles colidem com átomos neutros e produzem íons positivos. Os elétrons se multiplicam até que a produção de novos elétrons chega a tal ponto em que a descarga se autossustenta. Os elétrons que iniciam o processo de ionização são geralmente gerados por fotoionização: um fóton, de alguma fonte distante, transmite energia suficiente para um átomo, de modo que o átomo se rompe em um elétron e um íon positivamente carregado (EPRI, 1982). Na Figura 3.1 observa-se um desenho esquemático que visa exemplificar o processo de avalanche de elétrons.

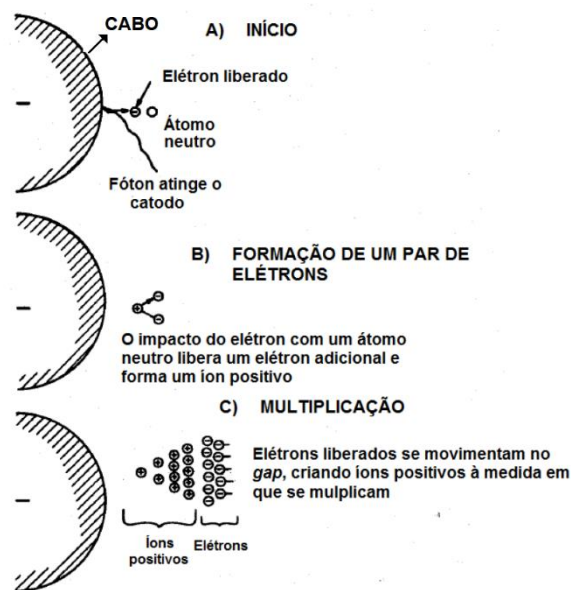


Figura 3.1 - O processo de avalanche de elétrons. Adaptado de EPRI (EPRI, 1982)

Durante a aceleração no campo elétrico, o elétron colide com as moléculas de nitrogênio, oxigênio e outros gases presentes no meio. A maioria dessas colisões são colisões elásticas, onde o elétron perde apenas uma pequena parte de sua energia cinética em cada colisão. Ocasionalmente, um elétron atinge um átomo e este átomo muda para um estado de energia mais alto. O estado orbital de um ou mais elétrons muda e o elétron de impacto perde parte de sua energia cinética. Para voltar ao seu estado normal, o átomo cede energia em forma de calor, luz (corona visível) e ondas eletromagnéticas de frequência mais baixa (rádio interferência). Um elétron também pode colidir (recombinar) com um íon positivo, convertendo o íon em um átomo neutro (EPRI, 1982).

O processo básico de ionização do meio é descrito como:



Onde:

A = átomo

A^+ = íon positivo

e = elétron

Depois que um elétron colide com um átomo, outro elétron é liberado. Cada um desses elétrons é capaz de liberar outro elétron. A reação em cadeia causa um aumento muito rápido na quantidade de elétrons, provocando uma avalanche de elétrons, que hoje é conhecido como o processo de avalanche de Townsend (EPRI, 1982).

Uma vez que o processo se torna autossustentável pelo efeito de produção de novos elétrons no gás a partir do condutor, está estabelecido o efeito conhecido como Efeito Corona (EPRI, 1982).

3.3 O Efeito Corona em Linhas de Transmissão

O efeito corona em linhas de transmissão é um tema estudado desde o início do século passado, tendo sido publicados diversos trabalhos de caráter experimental que buscaram a caracterização e compreensão dos aspectos básicos envolvidos neste fenômeno. Um dos trabalhos mais antigos envolvendo o efeito corona data de 1911 (Peek, 1911), onde é apresentada uma fórmula para perdas de energia na linha devido ao efeito corona em regime permanente.

Em Skilling e Dykes (1937) são apresentados, de forma pioneira, os efeitos causados pelo corona nas ondas de tensão que se propagam nos condutores de uma linha. O trabalho experimental consistiu na utilização de um gerador de impulsos para gerar ondas de tensão com formato triangular (tempos de frente entre 0,3 e 1,63 μ s) em uma linha terminada por um resistor de valor igual ao da impedância de surto da linha de modo a promover o casamento de impedâncias. As ondas de tensão no ponto de injeção e a uma distância de aproximadamente 250 m do ponto de injeção foram registradas em um

osciloscópio. Foi observada a deformação da frente da onda e a diminuição do seu valor de pico. A cauda da onda também apresentou modificação, tornando-se mais alongada e com um maior tempo de duração.

Em Wagner et al (1954), são apresentados resultados de um extenso trabalho experimental que se tornou referência nos estudos sobre o efeito corona em linhas de transmissão.

Neste trabalho (Wagner, et al., 1954), os autores realizaram diversos testes em duas linhas de transmissão com nível de tensão de 500 kV, com aproximadamente 2,2 km de comprimento divididos em 7 vãos. Ambas as linhas possuíam um cabo para-raios localizado a uma altura de aproximadamente 8 m acima dos condutores. A Figura 3.2 apresenta as configurações e o posicionamento das linhas utilizadas nos testes.

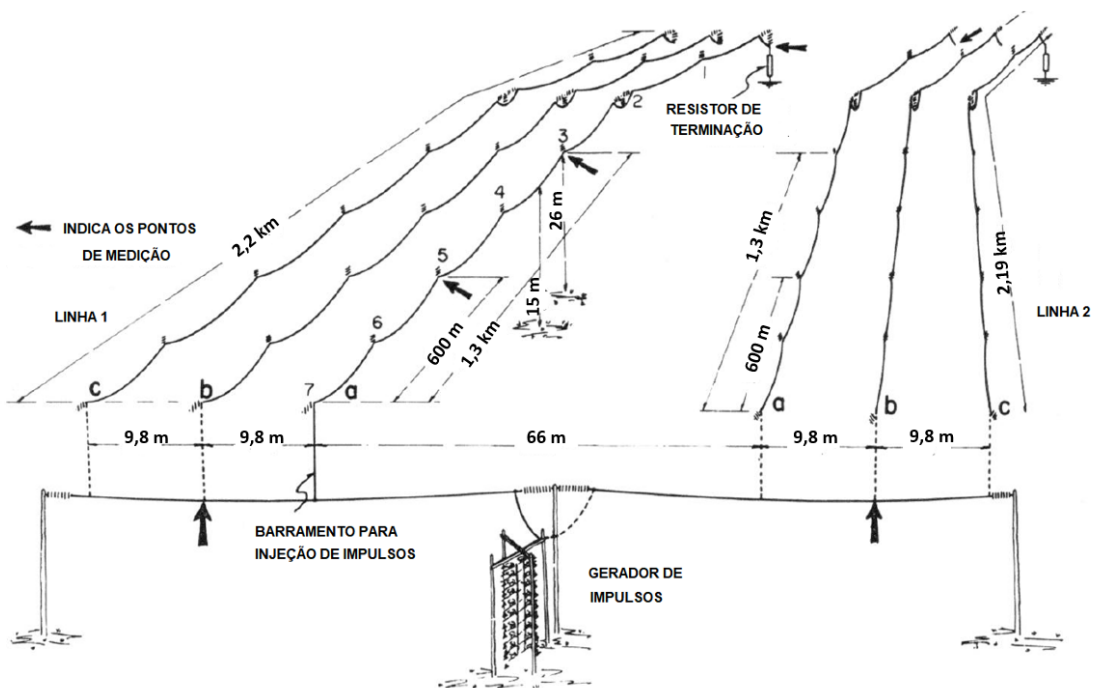


Figura 3.2 - Linhas de transmissão 1 e 2 utilizadas nos experimentos de Wagner et al (1954). Adaptado de Wagner et al (1954)

Essas linhas foram construídas para estudos de surtos de tensão positiva e negativa em linhas, em um programa cooperativo entre *Westinghouse Electric Corporation* e *American Gas and Electric Service Corporation*. A linha 1 era constituída por condutores de cobre de 4,2 cm de diâmetro, enquanto a linha 2 era constituída por condutores de alumínio reforçado com aço (ACSR) de 5,1 cm de diâmetro. Ambos os cabos para-raios

utilizados foram do tipo ACSR com 1,46 cm de diâmetro. A Tabela 3.1 apresenta as principais características das linhas de 500 kV testadas.

Tabela 3.1 - Características das linhas de 500 kV utilizadas nos testes

	Linha 1	Linha 2
Comprimento da Linha	2,2 km	2,2 km
Distância entre as fases A e B e B e C	9,8 m	9,8 m
Distância entre as fases B e C	19,6 m	19,6 m
Tipo de condutor	Cobre – 4,2 cm diâmetro ACSR – 2,36 cm diâmetro*	ACSR – 5,1 cm de diâmetro
Cabo para-raios	ACSR – 1,46 cm diâmetro	ACSR – 1,46 cm diâmetro
Altura das 3 fases na torre	26,2 m	26,2 m
Altura do cabo fase com flecha	15,24 m	15,24 m
Altura do cabo para-raios (sem flecha)	34,2 m	34,2 m

*foram realizados alguns testes com este tipo de condutor

As investigações levaram a conclusões pioneiras e importantes sobre o efeito corona. Foi observado que, em tensões abaixo da tensão inicial do corona, a distorção sofrida pela onda de tensão é relativamente pequena. Em tensões maiores, ocorre distorção e atenuação de tais ondas. As investigações mostraram ainda que, à medida em que a onda se propaga, qualquer ponto da onda está atrasado em relação a onda no ponto de injeção por um tempo proporcional à distância propagada.

Comparando os surtos de tensão de polaridade positiva e negativa, foi observado que as ondas positivas apresentam maior atraso em relação às ondas negativas. Para os diferentes tipos de condutores testados, mostrou-se que, as ondas propagadas sofreram maior atraso nos condutores de menor diâmetro. Nos testes foram utilizadas formas de onda de aproximadamente $0,6 \mu\text{s}$ de tempo de frente e $6 \mu\text{s}$ de tempo de meia onda, porém, com diferentes valores máximos (1700 kV, 1300 kV, 850 kV e 375 kV).

A maioria dos testes foi feito em tempo bom, porém para fins de comparação, alguns testes foram feitos sob chuva. Os resultados obtidos sob chuva foram quase iguais aos obtidos em tempo bom, ou seja, a chuva não mostrou ser um parâmetro capaz de alterar atenuação e a distorção das ondas devido ao efeito corona (Wagner, et al., 1954).

De modo a avaliar comportamento do efeito corona ao longo da linha, o seguinte teste foi realizado: injetou-se um surto de tensão no condutor da fase *b* na linha 2 e as tensões ao longo desse condutor e do condutor *c* foram observadas. Na Figura 3.3 são

apresentadas as ondas resultantes e a Figura 3.3 (a) mostra a configuração que foi utilizada. É notável que, a medida em que as ondas se propagam na linha, tanto no condutor que recebe o surto (Figura 3.3 (b)) quanto no condutor adjacente (Figura 3.3 (c)), as ondas sofrem atenuação e distorção. No condutor adjacente, percebe-se que quanto mais afastado do ponto inicial, mais negativa se torna o início da onda.

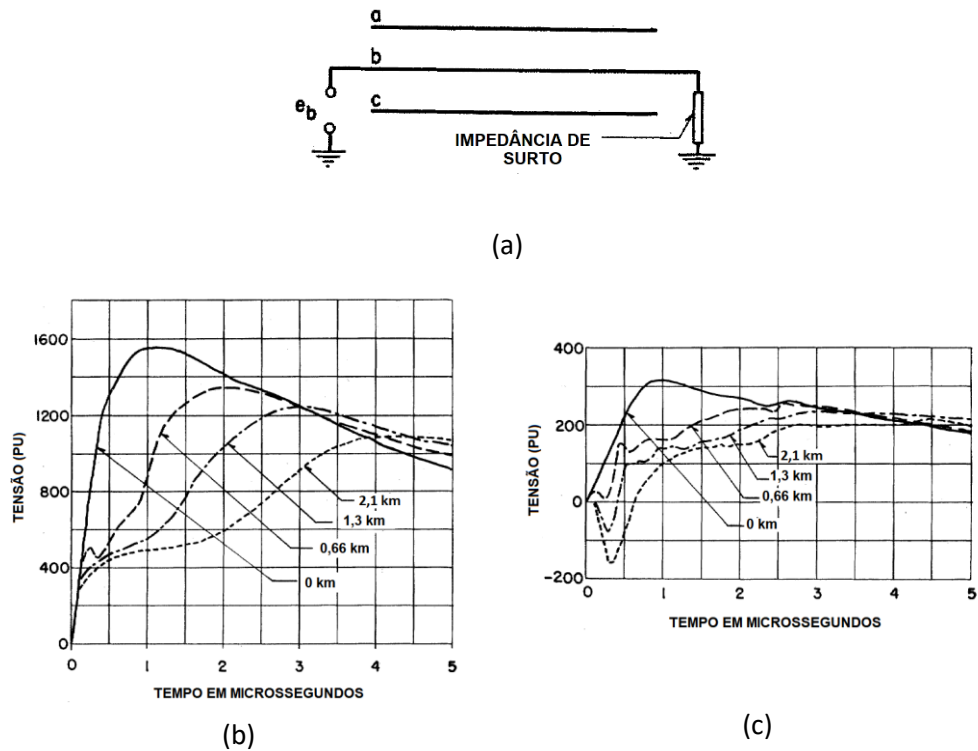


Figura 3.3 - (a) Configuração utilizada, (b) Forma de onda da tensão no condutor em que foi aplicado o surto, (c) forma de onda de tensão no condutor adjacente em que surge uma tensão induzida. Adaptado de Wagner et al (1954)

Como observado, o efeito corona causa um atraso na onda de tensão. Isso sugere que a velocidade de propagação da onda é reduzida. Sabe-se que em um circuito linear, com resistência e condutância desprezíveis, com uma capacitância (C) e uma indutância (L) por unidade de comprimento, a velocidade de propagação (v) de uma onda é dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.3)$$

Esta relação indica a possibilidade de explicar os efeitos causados pelo efeito corona através do aumento do valor da capacitância do condutor (Wagner, et al., 1955).

Quando um surto de tensão é aplicado no condutor, a tensão aumenta até o ponto em que *streamers* emanam dele. Esses *streamers* formam uma camada de ionização em torno do condutor, o que pode ser visto como um aumento do raio e conseqüentemente, um aumento da capacitância e diminuição da impedância de surto do mesmo (Hileman, 1999). A capacitância da linha é dada pela relação da carga pela tensão, dq/dv , ou seja, é possível observar a variação da capacitância através de uma curva que mostre a variação da carga e da tensão na linha. Essa curva é chamada de curva $q-v$ e pode ser observada na Figura 3.4.

No início da curva $q-v$ (Figura 3.4), a capacitância da linha é dada pelo valor da capacitância natural (ou geométrica), C_n . Com o aumento da tensão acima da tensão de início de corona, ocorre um aumento na capacitância dado por ΔC e a capacitância da linha é dada pela equação 3.4. Depois do pico da tensão de surto, a capacitância retorna para o seu valor natural, C_n .

$$\frac{dq}{dv} = C = C_n + \Delta C \quad (3.4)$$

Em Wagner et al (1955) foram realizados experimentos que visavam observar o comportamento da capacitância da linha quando esta era submetida a surtos de alta tensão. Neste trabalho foram obtidas curvas $q-v$ que serão discutidas a seguir.

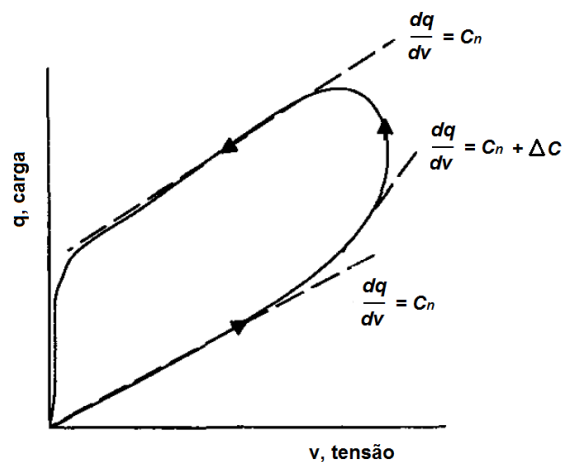


Figura 3.4 - Curva $q-v$ e capacitâncias. Adaptado de Hileman (1999)

Primeiramente, os autores realizaram testes em um laboratório de alta tensão, considerando um condutor de 0,4 cm de diâmetro colocado no interior de um cilindro de 60 cm de diâmetro, a uma altura de 1,8 m do solo. O cilindro estava aterrado através de

um capacitor. A tensão através deste capacitor é proporcional à integral da corrente, portanto, através dele era possível medir a carga na porção do cilindro entre os anéis de proteção (Wagner, et al., 1955). Foram injetadas ondas de tensão neste condutor com diferentes valores máximos (com o mesmo tempo de frente de $1,5 \mu\text{s}$). Na Figura 3.5 estão apresentados alguns dos resultados obtidos nos testes.

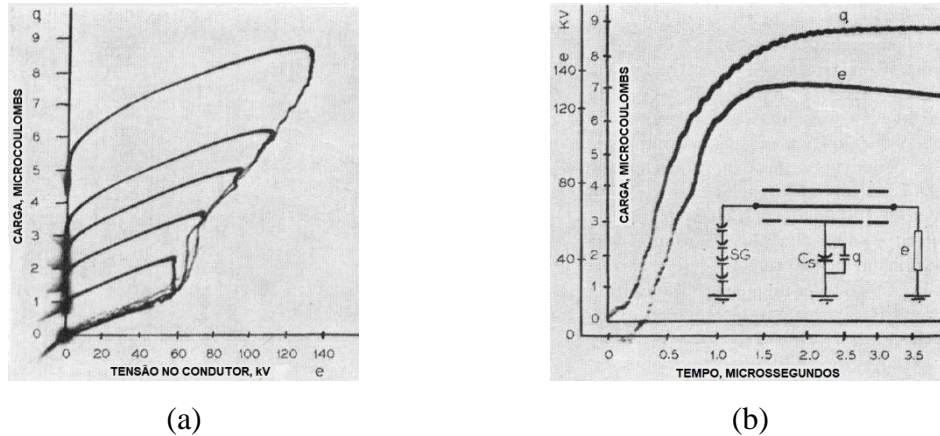


Figura 3.5 - (a) Curva $q-v$ para diferentes níveis de tensão, (b) Curva de tensão e curva de carga no tempo para o maior valor de tensão apresentado na letra (a). Adaptado de Wagner et al (1955)

A tensão no condutor (identificada na Figura 3.5 como “ e ”) foi medida com um divisor de tensão e as formas de onda foram observadas através de um osciloscópio. Nota-se, na Figura 3.5 (a), que com o aumento da tensão todas as curvas começam com uma inclinação que é igual ao valor da capacitância natural do cabo. A partir do momento em que a tensão de início de corona é alcançada, as curvas seguem praticamente o mesmo caminho até o valor máximo de tensão (que é diferente para cada curva). A partir deste ponto (em que a forma de onda da tensão aplicada está na cauda), a tensão decai e tende para zero em uma curva com inclinação próxima ao valor da capacitância natural do cabo. Um detalhe muito importante observado pelos autores na Figura 3.5 (a) é que todas as curvas $q-v$ seguem o mesmo caminho à medida em que a tensão no condutor aumenta. Isso pode significar que é possível extrair uma mesma curva $q-v$ para diferentes níveis de tensão em um condutor. Se essa curva for mantida independentemente do valor do tempo de frente da onda injetada, essa relação pode ser utilizada para predeterminar a distorção da frente de onda de uma onda de tensão se propagando em um condutor a partir do momento em que a tensão de início de corona é excedida. Nas ondas utilizadas na Figura 3.5 (a) todos os tempos de frente eram de aproximadamente $1,5 \mu\text{s}$, porém, com tensões máximas distintas. Os autores realizaram outros testes com ondas de tensão de tempo de frente de $0,5 \mu\text{s}$ e os resultados das curvas $q-v$ foram iguais aos resultados em que o tempo

de frente era de 1,5 μ s. Apesar da taxa de variação dv/dt na frente da onda ter variado bastante, o fato das curvas $q-v$ traçarem o mesmo caminho para diferentes valores de tensão indicou que a curva é dependente apenas do valor da tensão, e não de dv/dt .

O próximo passo do trabalho consistiu em testes em condutores utilizados em linhas de transmissão em escala reduzida e real. Em todos esses experimentos, confirmou-se que a carga na parte da frente de onda, em um condutor que foi submetido a uma onda impulsiva, é dependente apenas da tensão e independe da taxa de variação de tensão.

Após discussão e observação de resultados referentes aos efeitos ocasionados pelo efeito corona em linhas de transmissão, é necessário entender como calcular valores como a tensão de início de corona e o raio de corona. Tais aspectos são discutidos a seguir.

3.3.1 Tensão de início de corona

O efeito corona se inicia a partir de determinado valor de tensão. A tensão de início de corona para um condutor único pode ser estimada segundo Hileman (1999) pela seguinte equação:

$$V_i = \frac{Z_0 r E_0}{60} \text{ kV} \quad (3.5)$$

Onde E_0 é o campo elétrico crítico utilizado, geralmente em kV/cm, r é o raio do condutor em cm e Z_0 é a impedância de surto natural do cabo (sem corona). De acordo com CIGRE (CIGRE, 1991), o campo elétrico crítico é dado por:

$$E_0 = 23 \left(1 + \frac{1.22}{d^{0.37}} \right) \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \quad (3.6)$$

Onde d é igual ao diâmetro do condutor (em cm).

J. G. Anderson, no capítulo 12 de EPRI (EPRI, 1982) sugere um valor de 15 kV/cm para E_0 . Este valor se refere ao trabalho de Brown (1978) que, ao analisar os resultados de McCan (1943), referentes ao aumento do raio do condutor sob efeito corona, e de Wagner et al (1955), referentes às curvas $q-v$ obtidas em um condutor sob efeito corona, concluiu que é razoável admitir um campo de 15 kV/cm para um campo elétrico de polaridade negativa e de 10 kV/cm para um campo elétrico de polaridade positiva. Em

Al Tai et al (1989) estipula-se o valor 18 kV/cm para descargas de polaridade negativa e 5 kV/cm para descargas de polaridade positiva. Nesta dissertação é adotado o valor de 15 kV/cm para descargas de polaridade negativa.

Com base no valor da tensão de início de corona, é possível determinar o valor do raio de corona. As formulações para esse cálculo são detalhadas a seguir.

3.3.2 *Cálculo do Raio Crítico e do Raio Efetivo*

Quando um condutor está sob o efeito corona, um envelope de cargas ionizadas surge ao seu redor. Esse envelope pode ser modelado como um raio maior que o raio natural do cabo.

Este envelope de corona é cilíndrico, simétrico e presente ao redor do cabo até que o campo elétrico crítico E_0 , na superfície do condutor diminua para um valor que não sustente a permanência deste envelope (EPRI, 1982).

O envelope de corona contém uma densidade linear de carga ρ_l devido à tensão aplicada:

$$\rho_l = 2\pi r \epsilon E_r \left(\frac{C}{m} \right) \quad (3.7)$$

ρ_l = densidade linear de carga em C/m

r = distância do condutor até o ponto em que o campo E_r é calculado

E_r = campo elétrico

ϵ = permissividade elétrica do meio

Considerando o problema de forma estática e aplicando o método das imagens (Hayt Jr, et al., 2013), determina-se o campo elétrico no ponto P indicado na Figura 3.6.

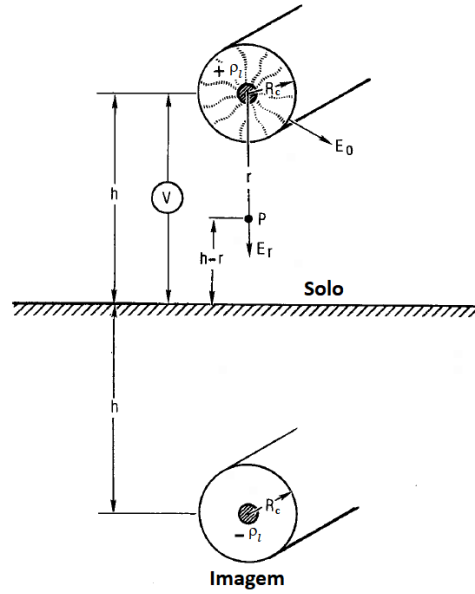


Figura 3.6 - Condutor e sua imagem sob o efeito corona. Adaptado de EPRI (EPRI, 1982)

$$E_r = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2h-r} \right) \quad (3.8)$$

$$V = - \int_{r=h}^{r=R_c} E_r dr = - \int_{r=h}^{r=R_c} \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2h-r} \right) dr \quad (3.9)$$

$$V = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{2h}{R_c} \right)$$

Substituindo ρ_l (considerando r igual a R_c):

$$R_c \ln \left(\frac{2h}{R_c} \right) = \frac{V}{E_0} \quad (3.10)$$

Onde:

R_c = Raio crítico do corona

$h = ht - (2/3) * f$, onde f e ht correspondem à flecha e altura do condutor

V = Tensão máxima aplicada ao cabo em kV

E_0 = Campo elétrico crítico de Corona (kV/m)

É importante observar que, apesar de representar o raio crítico do corona, R_c não representa o raio efetivo do condutor, que a partir desse ponto será designado raio de

corona. Para encontrar o raio de corona é necessário considerar os efeitos de acoplamento envolvidos no processo. O envelope de corona tem um efeito equivalente ao aumento do raio do condutor no que se refere aos seus parâmetros transversais, causando um aumento da capacitância associada. Contudo, as correntes que se propagam longitudinalmente ao longo dele estão confinadas em seu núcleo condutor (EPRI, 1982). Em 1950 a *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE) adotou o conceito de que o coeficiente efetivo de acoplamento de um condutor é igual à média geométrica de seus efeitos de acoplamento com e sem o envelope de corona.

$$\ln\left(\frac{2h}{R}\right) = \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) * \ln\left(\frac{2h}{Rc}\right)} \rightarrow R = 2 * h * e^{-\sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) * \ln\left(\frac{2h}{Rc}\right)}} \quad (3.11)$$

R = Raio de corona

Rc = Raio crítico do corona

r = raio do condutor sem o efeito corona

h = altura do condutor

O efeito corona, ao influenciar a capacitância do condutor, modifica, também, sua impedância de surto. Abaixo do nível de tensão de início de corona, o raio é considerado igual ao raio físico do condutor. Acima do nível de tensão de início de corona o envelope de corona promove o atraso da propagação da onda e aumenta a capacitância para a terra, o que modifica o valor da impedância de surto. Uma estimativa para o cálculo da impedância de surto para um condutor com corona é proposta em EPRI (EPRI, 1982), e é apresentada na equação 3.12.

$$Z = 60 * \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) \ln\left(\frac{2h}{Rc}\right)} \quad \Omega \quad (3.12)$$

3.4 Modelagens tradicionais do efeito corona em linhas de transmissão

3.4.1 Linearização da curva $q-v$

Em Santiago et al (1987), propõe-se a representação do efeito corona com base no comportamento de curvas $q-v$ obtidas experimentalmente. A proposta apresentada consiste em aproximar tais curvas por um conjunto de segmentos de reta. Na Figura 3.7 é apresentada a curva $q-v$ utilizada pelos autores.

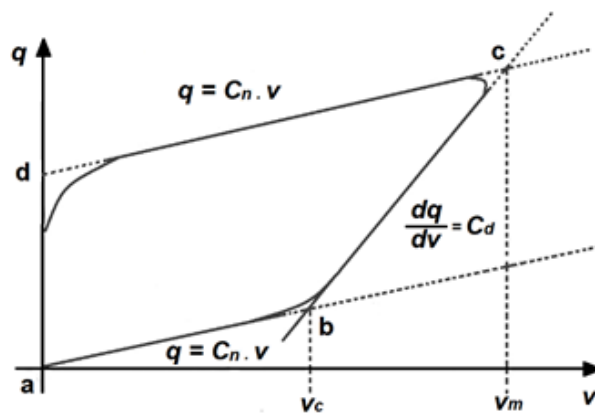


Figura 3.7 - Curva $q-v$ e sua linearização no trabalho de Santiago et al (1987)

A divisão em segmentos de reta da curva indicada na Figura 3.7 segue a seguinte aproximação: para tensões abaixo da tensão inicial do corona, v_c (segmento ab), a capacitância da linha é considerada igual à capacitância natural da linha, C_n . Para tensões acima de v_c e abaixo da tensão máxima v_m (segmento bc), a capacitância da linha é definida por uma capacitância dinâmica, C_d . Após a tensão máxima v_m , para tensões menores que v_m (segmento cd), a capacitância da linha é considerada igual à capacitância natural C_n .

A onda de tensão que se propaga no condutor é decomposta em parcelas (delimitadas pelas tensões v_c e v_m). Cada uma dessas parcelas é considerada se propagando no condutor com diferentes valores de capacitância. A decomposição da onda de tensão em parcelas é ilustrada na Figura 3.8.

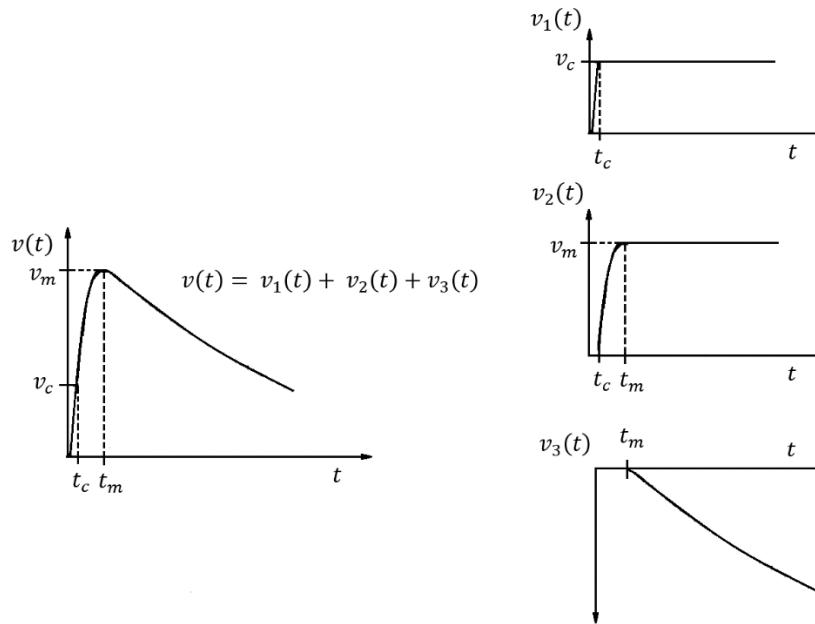


Figura 3.8 - Decomposição da onda em parcelas. Adaptado de Santiago et al (1987)

Observa-se que as parcelas $v_1(t)$ e $v_3(t)$ não são influenciadas pelo efeito corona e se propagam em um trecho da linha com capacitância C_n . Já a parcela $v_2(t)$ é influenciada pelo efeito corona e se propaga considerando a capacitância dinâmica C_d . De modo geral, as seguintes etapas são utilizadas no processamento (Santiago, 1987):

1. A curva $q-v$ do surto é aproximada em segmentos de reta e as capacitâncias correspondentes são calculadas.
2. A onda de tensão que vai se propagar é decomposta em parcelas correspondentes aos trechos linearizados da curva $q-v$.
3. Após decompor a onda de tensão em parcelas, cada parcela correspondente aos trechos linearizados (Figura 3.8) se propaga em uma pequena distância Δx ao longo da linha, partindo-se do ponto $x = x_0$. Este trecho ao longo da linha possui a capacitância correspondente à parcela da onda total que irá se propagar.
4. No ponto $x = x_0 + \Delta x$ obtém-se a resposta para cada uma dessas parcelas de onda e a onda de tensão total é recomposta.
5. Após a onda ser recomposta, os parâmetros tempo de frente, tempo de meia onda e amplitude máxima do resultado encontrado são utilizados como base para encontrar uma onda similar que tenha sido linearizada.

Essa nova curva $q-v$ é utilizada para calcular os novos valores de capacitância.

6. A onda de tensão obtida em $x = x_0 + \Delta x$ é decomposta em novas parcelas, correspondentes aos trechos linearizados da nova curva $q-v$ do passo anterior.
7. Cada uma dessas novas parcelas se propaga da mesma forma que no passo 3 para mais um comprimento de linha Δx .
8. No ponto $x = x_0 + 2\Delta x$ obtém-se a resposta de cada uma dessas novas parcelas, recompondo-se a onda. O processo se repete em intervalos de propagação Δx até se obter a resposta no ponto x_1 desejado.

A precisão dos resultados depende do valor de Δx que deve ser suficientemente pequeno para que os erros introduzidos na recomposição da onda sejam desprezíveis. Ao se recompor a forma de tensão em um ponto x , a curva $q-v$ para essa forma de onda deveria ser conhecida para que se pudesse decompor, nesse ponto, o surto em novas parcelas correspondentes a linearização dessa curva $q-v$. Porém, ao analisar curvas $q-v$ típicas os autores observaram alguns fatos que facilitam a aplicação do método de processamento. Além da possibilidade de aproximação das curvas por segmentos de reta, as inclinações desses segmentos independem da amplitude máxima da onda, desde que esta não ultrapasse o valor máximo determinado. As inclinações dos segmentos de reta correspondentes nas curvas $q-v$ obtidas de surtos em que as ondas de tensão são similares, praticamente iguais (Santiago, et al., 1987).

Sendo assim, as curvas $q-v$ linearizadas apresentam o seguinte aspecto apresentado na Figura 3.9 (desde que a amplitude da tensão não exceda determinado valor e que a forma de onda não seja muito deformada):

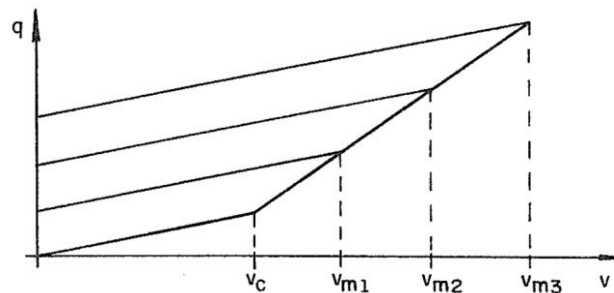


Figura 3.9 - Linearização aproximada das curvas $q-v$ para a aplicação do modelo. Adaptado de Santiago et al (1987)

Ao analisar curvas $q-v$ típicas, os autores concluíram que a linearização em três segmentos de retas é o suficiente para a obtenção de um bom resultado da representação do efeito corona em linhas.

3.4.2 *Representação do aumento do raio do condutor*

A seguir é apresentado um modelo que considera a representação do efeito corona pelo aumento do raio do condutor (representação do raio de corona).

Em Jesus e Barros (1994) é apresentado um modelo que considera uma abordagem macroscópica dos fenômenos físicos envolvidos no estabelecimento do efeito corona, sendo uma evolução do trabalho realizado em Barros e Jesus (1994).

As autoras consideram a existência de um intervalo de tempo a ser considerado a partir do instante no qual o campo elétrico crítico é atingido e o início do fenômeno corona de fato. Esse atraso de tempo estaria associado ao processo de ionização e a formação de cargas elétricas (positivas e negativas) no entorno do condutor. Tal atraso só seria considerado em análises de corona relacionadas a descargas atmosféricas. Para surtos de tensão com tempos de frente mais longos, os mecanismos responsáveis por criar as cargas elétricas podem ser considerados instantâneos. Nesses casos, a tensão na qual os fenômenos se iniciam seria igual à tensão crítica e não dependeria da taxa de variação da tensão.

O modelo admite duas etapas: uma relativa ao movimento das cargas elétricas e outra referente à geração de cargas elétricas. A geração de cargas elétricas foi considerada um processo instantâneo que ocorre assim que o campo elétrico na superfície do condutor excede um valor crítico E_{cr} especificado pelo usuário. Assume-se que o mecanismo de geração de cargas é autocontrolado e limitado pelo valor máximo de campo elétrico no condutor (E_{cr}). Na simulação, uma camada de ionização de forma cilíndrica é considerada ao redor do condutor limitando a região onde o fenômeno de ionização ocorre. A seguir, estão descritas as etapas nas quais o algoritmo foi desenvolvido.

O espaço ao redor do condutor é discretizado utilizando camadas cilíndricas coaxiais de raio r_i ($i=1, 2 \dots n$), onde r_0 é o raio do condutor. Em cada camada existem p_i partículas positivas e n_i partículas negativas. Além disso, existe uma variável

$e_i = r_i \cdot E_i$ que representa o campo elétrico E_i em cada superfície de separação de camadas. O algoritmo avança em passos de tempo e, cada passo em 2 fases:

- 1) O campo elétrico é atualizado usando o valor atual da tensão aplicada e as densidades de cargas elétricas resultantes do passo anterior (ou das condições iniciais). Se o campo elétrico na superfície do condutor exceder o campo elétrico crítico E_{cr} , a geração de cargas elétricas é ativada e o campo elétrico é restaurado para seu valor crítico.
- 2) O campo elétrico é considerado constante e a distribuição de cargas elétricas é modificada refletindo o movimento e a eventual recombinação de cargas que ocorreram naquele intervalo. Os coeficientes de mobilidade e recombinação podem ser considerados constantes físicas. O campo elétrico crítico e o raio da camada de ionização (r_s) são parâmetros da simulação que dependem do raio do condutor e das condições atmosféricas.

Esse modelo introduziu o raio da camada de ionização, que representa um aumento do raio de corona. O raio da camada de ionização como um parâmetro de simulação aparece diretamente ligado à física do processo, representando sua extensão radial. Este raio aumenta com o raio do condutor e diminui em condições de chuva. É sensível à polaridade tensão, apresentando valores maiores para polaridades positivas (Jesus, et al., 1994).

As autoras então seguem para uma evolução desse modelo computacional, que implementa a dinâmica do efeito corona, adicionando um tempo de atraso entre o instante em que a tensão crítica de início de corona é alcançada e o instante no qual o fenômeno realmente se inicia.

O tempo de atraso corresponde à soma do tempo necessário para os elétrons aparecerem (que é um tempo de atraso estatístico, t_s) e ao tempo necessário para que as cargas elétricas sejam geradas. A primeira fase consiste na geração de cargas elétricas que considera simultaneamente um crescimento na camada de ionização e um crescimento exponencial da densidade de cargas elétricas. Para a simulação da geração de cargas elétricas, foi definida uma fronteira para a camada de ionização, r_s . Para um tempo maior que o tempo de atraso, a cada passo de tempo o raio da camada de ionização é avaliado considerando o seu crescimento na velocidade dos *streamers*, v_s . O raio é

calculado através de uma função estatística que leva em consideração, a velocidade dos *streamers*, v_s , o tempo de atraso, o raio original do condutor e o raio máximo da camada de ionização, r_s .

A densidade de cargas elétricas geradas pelo fenômeno de ionização é controlada pelo campo elétrico na superfície do condutor. O valor limite para este campo elétrico é E_{cr} , porém essa limitação no campo elétrico não é alcançada instantaneamente, sendo controlada por uma constante de tempo τ . A segunda fase do algoritmo consiste no cálculo da movimentação de cargas elétricas que ocorre durante o passo de tempo (posteriormente, resultados de simulações mostraram que a movimentação de cargas elétricas não é relevante para surtos de descargas atmosféricas).

Nesta evolução do programa foram introduzidas mais 3 variáveis, o tempo de atraso estatístico, t_s , a velocidade dos *streamers*, v_s , e a constante de tempo, τ , que corresponde ao tempo de formação de cargas elétricas. Notou-se que, com o aumento da amplitude do surto de tensão, o tempo de atraso estatístico tende a diminuir e a velocidade média dos *streamers* tende a aumentar. Para condutores de maior diâmetro, o tempo de atraso estatístico é menor e a velocidade média dos *streamers* é maior. A geração de cargas elétricas apresentou um valor constante, representando, então, uma característica intrínseca ao mecanismo de geração de cargas elétricas, não sendo mais considerado uma variável de simulação.

As autoras realizaram simulações e obtiveram curvas $q-v$ ao aplicar surtos de tensão em dois tipos de condutores (as simulações foram realizadas considerando a injeção do surto de tensão em um cabo condutor) que foram comparadas com resultados experimentais. Os resultados foram muito satisfatórios e mostraram que o modelo proposto de geração dinâmica de cargas elétricas em conjunto com um aumento do raio da camada de ionização e com um aumento exponencial de densidade de cargas elétricas, limitada pelo campo elétrico crítico, é viável para a simulação do efeito corona.

Em Jesus e Barros (1995) as autoras modificaram este modelo de simulação acrescentando o campo elétrico mínimo requerido para a propagação do *streamer*, substituindo o raio da camada de ionização como um parâmetro de simulação. Os valores para o campo elétrico mínimo foram ajustados de modo que os resultados das simulações

reproduzisse as curvas $q-v$ experimentais obtidas por outros autores. Os resultados obtidos também foram satisfatórios.

3.4.3 Modelagem utilizando FDTD – Finite-Difference Time-Domain

O efeito corona também é modelado em simulações computacionais utilizando o método FDTD - *Finite-Difference Time-Domain* ou Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (Thang, et al., 2011).

No trabalho de Thang et al (2011), os autores modelam a representação do efeito corona considerando um aumento radial do raio do condutor ao longo do tempo. O aumento do raio foi representado como uma expansão da região de condução ao redor do condutor. Foram utilizados dados experimentais de curvas $q-v$ e de acoplamento entre dois cabos para comparação e validação do modelo.

Neste modelo, os *streamers* de corona foram representados como uma expansão radial de uma região condutora cilíndrica no entorno do condutor. O campo elétrico crítico, chamado de E_0 é calculado através da equação de Hartmann (Hartmann, 1984) dada por:

$$E_0 = m \cdot 2,594 \cdot 10^6 \left(1 + \frac{0,1269}{r_0^{0,4346}} \right) V/m \quad (3.13)$$

Onde m é um coeficiente que depende das condições físicas do cabo (os autores utilizaram $m=0,3$) e r_0 é o valor do raio do condutor.

O cálculo de E_0 é realizado nos pontos mais próximos do condutor, e a partir do momento em que o campo elétrico no cabo excede o valor de E_0 , assume-se que os *streamers* de corona começam a emanar do condutor. Apesar de ser necessário um valor de campo elétrico crítico no cabo, os autores também consideram um campo elétrico médio que deve existir na região para que o efeito corona se sustente. Esse campo elétrico, chamado de E_c é de 5 kV/cm para campos de polaridade positiva e de 15 kV/cm para campos de polaridade negativa. O raio de corona r_c é obtido através da equação 3.14, utilizando E_c igual a 5 kV/cm ou 15 kV/cm, dependendo da polaridade.

$$E_c = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_c} + \frac{q}{2\pi\epsilon_0 (2h - r_c)} V/m \quad (3.14)$$

A equação 3.14 é uma aproximação válida para $r_c \ll 2h$.

O processo de simulação, de forma simplificada, ocorre em etapas, ilustradas na Figura 3.10:

- 1) Se o campo elétrico E_{zb} calculado no passo de tempo n em um ponto localizado muito próximo do condutor exceder E_0 , a condutividade das 4 células ao redor do cabo aumenta de zero para 20 ou 40 $\mu\text{S/m}$. Na Figura 3.10, os valores de campo elétrico E_{xl}^n , E_{za}^n , E_{xr}^n e E_{zb}^n são praticamente iguais.
- 2) A corrente radial por unidade comprimento é calculada através da integração da densidade de corrente ao longo do cabo.
- 3) A carga total por unidade de comprimento do cabo é calculada através de uma fórmula recursiva utilizando a corrente radial calculada no passo anterior (detalhes em Thang et al (2011)).
- 4) Após o cálculo da carga, utilizando o valor correspondente de E_c , o raio de corona é calculado através da equação 3.14 e a condutividade de todas as células localizadas no limite de r_c^{n+1} nas direções x e z ao redor do cabo aumenta para 20 ou 40 $\mu\text{S/m}$ (foram feitas simulações com os dois valores). Os passos se repetem até a simulação ser finalizada.

Nota-se que, neste modelo de simulação, o aumento da condutividade da região ao redor do condutor é atualizado a cada instante de tempo, ou seja, neste caso temos um raio de corona dinâmico que tem uma distribuição não uniforme ao longo do cabo.

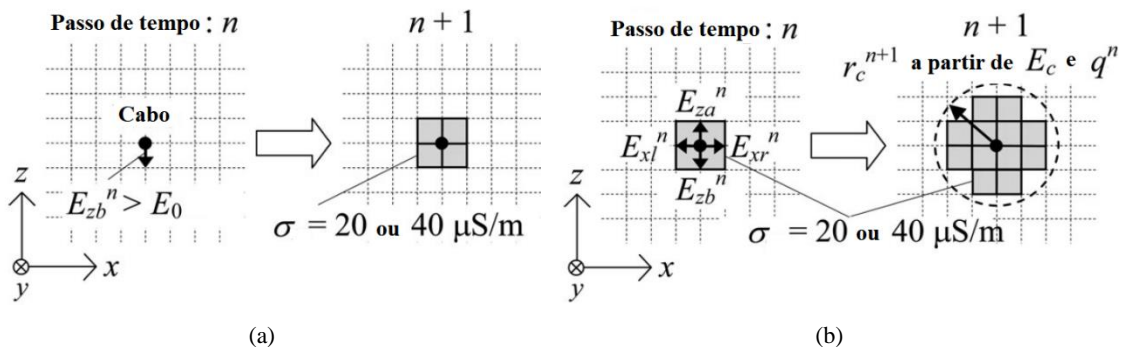


Figura 3.10 - Representação da simulação do aumento da condutividade da área ao redor do cabo (a) Início do corona no condutor, (b) Expansão radial mudando a condutividade das células ao redor do cabo dentro de r_c . Adaptado de Thang et al (2011)

As simulações apresentaram resultados muito próximos daqueles obtidos pelos estudos experimentais validando o modelo de simulação.

Utilizando esse mesmo modelo de simulação, os autores no artigo de Thang et al (2012) simularam o experimento apresentado em Wagner et al (1954) que foi discutido na seção 3.3 desta dissertação de mestrado. A linha utilizada foi a linha 1 da Tabela 3.1, com cabos de 4,2 cm de diâmetro (ou 2,1 cm de raio). A condutividade do solo foi considerada de 50 mS/m baseado nas informações do solo da região em que os experimentos de Wagner foram realizados, que variava de 10 a 90 mS/m. As formas de onda de tensão em 3 diferentes pontos da linha foram observadas. Os resultados das simulações e a comparação com os resultados de Wagner et al (1954) são apresentados na Figura 3.11.

Nota-se que os resultados simulados ficaram muito próximos dos resultados experimentais, exceto em alguns resultados em $d=2200$ m. Os mesmos efeitos de distorção da frente de onda são observados, validando o modelo proposto.

Os autores continuam os estudos do modelo em Thang et al (2013), onde são analisadas as tensões nas cadeias de isoladores de uma torre de 60 m de altura que é atingida por uma onda de corrente impulsiva. São obtidos e comparados os resultados com e sem a presença do efeito corona.

Os resultados obtidos nas simulações mostraram uma redução no valor da tensão máxima na cadeia de isoladores ao considerar o efeito corona, aparentemente, devido ao aumento do acoplamento entre os cabos fase e o cabo para-raios e através da diminuição da impedância de surto do cabo para-raios. Porém, a redução na cadeia de isoladores não foi tão significativa: para uma corrente injetada (polaridade positiva) de 50 kA e 3 μ s de tempo de frente, diminuição do valor de pico nas cadeias de isoladores foi de 15%, 14% e 13% para as cadeias superior, média e inferior, respectivamente, e de 10%, 9% e 8% para a mesma onda de corrente de polaridade negativa.

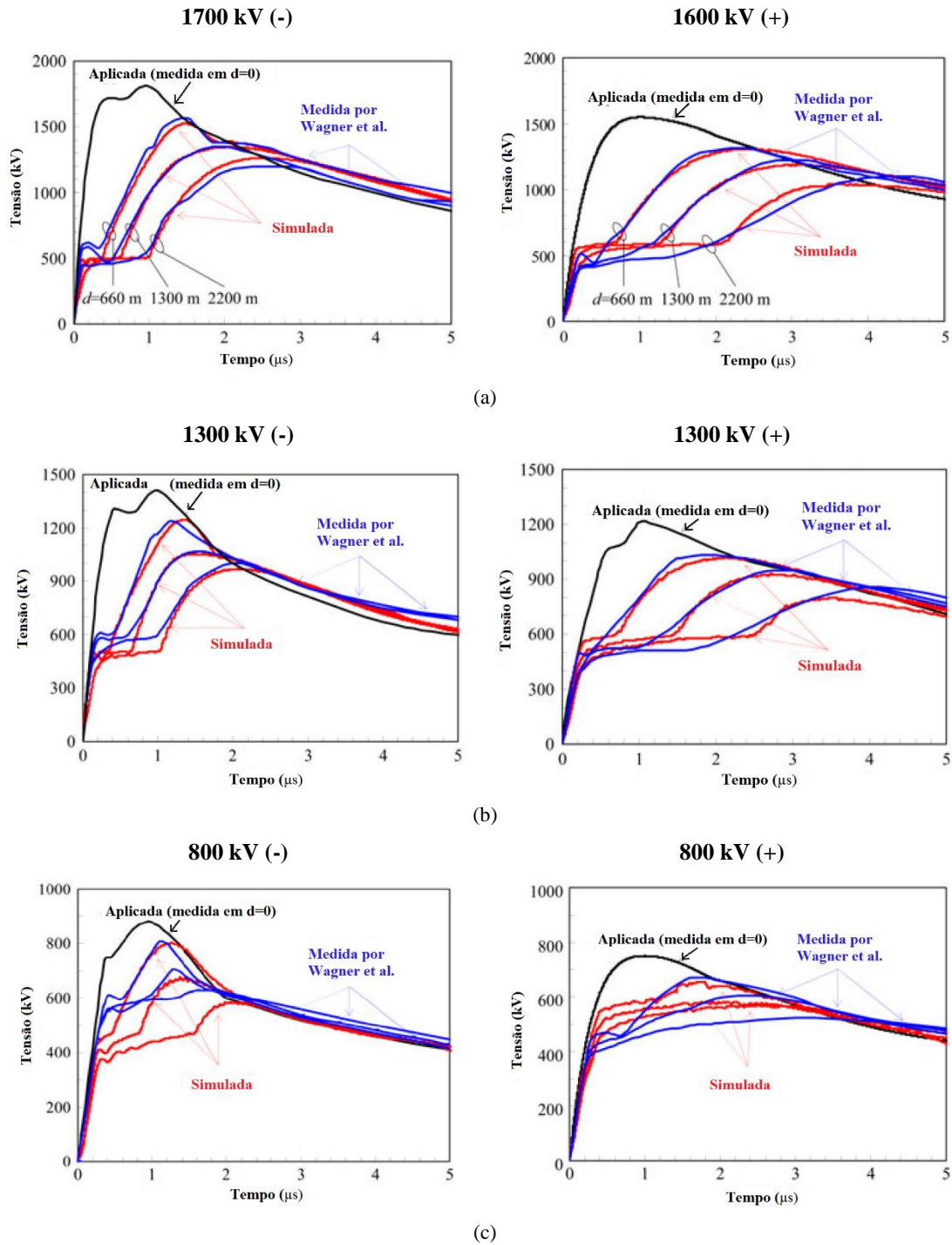


Figura 3.11 - Simulação FDTD (para $\sigma = 100\ \mu\text{S/m}$ nas células). Tensões medidas em 0 m, 660 m e 2,2 km da Linha 1 (cabo horizontal localizado a aproximadamente 15 m do solo). Coluna da esquerda: tensão aplicada negativa, $E_0 = 22\ \text{kV/cm}$ e $E_c = 15\ \text{kV/cm}$. Coluna da direita: Tensão aplicada positiva, $E_0 = 21\ \text{kV/cm}$ e $E_c = 5\ \text{kV/cm}$. (a) Tensão aplicada de 1700 kV para polaridade negativa e 1600 kV para a polaridade positiva (b) Tensão aplicada de 1300 kV para ambas as polaridades e (c) Tensão aplicada de 800 kV para ambas as polaridades. Adaptado de Thang et al (2012)

3.5 Comentários Finais

Existem diversos outros trabalhos na literatura que tratam da modelagem do efeito corona em linhas de transmissão (Mihailescu-Suliciu, et al., 1981), (Nagaoka, et al., 1987), (Gary, 1989), (Al Tai, 1989), (Carneiro, 1991) e etc. Muitos autores estudam o efeito corona causado pela incidência de descargas atmosféricas de polaridade negativa e polaridade positiva. No Brasil, estima-se que cerca de 90% das descargas observadas por medição direta são negativas (Visacro, 2004), por isto, nesta dissertação de mestrado, a representação do efeito corona é feita somente para descargas de polaridade negativa.

Atualmente existem plataformas de simulação como o ATP/EMTP que consideram a modelagem dos sistemas por parâmetros de circuitos e facilitam a aplicação e estudos de diversos fenômenos nas linhas de transmissão. Muitos trabalhos mais recentes utilizam desta plataforma para simular os efeitos causados pelo efeito corona [(Cunha, 2010), (Anane, et al., 2018) e (Pereira, et al., 2020)]. Nesta dissertação, o objetivo é modelar o efeito corona através da modificação do raio do condutor por meio de um programa que utiliza uma modelagem eletromagnética para simulação de transitórios no domínio da frequência.

4 Metodologia para representação do efeito corona no modelo HEM

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os detalhes relativos à metodologia para representação do efeito corona no modelo HEM, segundo a abordagem de representação do raio de corona descrito no Capítulo 3. É também apresentada a metodologia que busca representar o comportamento dinâmico do efeito corona segundo uma abordagem baseada na divisão em parcelas da onda de corrente injetada em um condutor.

4.2 O modelo HEM

O modelo HEM – *Hybrid Electromagnetic Model* é um modelo eletromagnético para simulação de transitórios no domínio da frequência (Visacro, et al., 2005). Ele determina o comportamento do sistema a ser simulado para cada frequência representativa do fenômeno a ser observado. Através da aplicação da Transformada de Fourier, as tensões e correntes resultantes são obtidas no domínio do tempo.

Os componentes do sistema são divididos em segmentos condutores considerando que tais segmentos possuem um comprimento muito maior do que o raio adotado para eles. Cada segmento é fonte de duas fontes de campo: de caráter divergente, que gera campo elétrico com características conservativas e, de caráter solenoidal, que gera um campo elétrico com características não-conservativas. A fonte de campo elétrico divergente se associa a uma corrente transversal que se dispersa para o meio radialmente em relação ao segmento condutor. Já a fonte de campo elétrico solenoidal, se associa a uma corrente longitudinal que se propaga ao longo do segmento (Silveira, 2006).

A fonte de corrente transversal causa elevação de potencial (em relação ao infinito) da região em que a fonte se encontra e também nos demais condutores do sistema. De outro modo, a fonte de corrente longitudinal causa queda de tensão ao longo do seu próprio condutor e também em outros segmentos condutores. A partir desses dois efeitos são definidos os acoplamentos próprios e mútuos do tipo transversal e solenoidal entre cada par de segmentos. Esses acoplamentos são traduzidos por impedâncias transversais e longitudinais entre os segmentos, considerando-se os efeitos de propagação (Silveira, 2006). Com base na determinação das impedâncias transversais e longitudinais próprias e mútuas dos elementos do sistema, é possível calcular-se tensões e correntes em todos os pontos do sistema avaliado.

Mais detalhes do modelo HEM e de suas aplicações para estudos de desempenho de sistemas elétricos são encontrados na literatura [(Silveira, 2006), (Silveira, et al., 2014), (Visacro, et al., 2015), (Silveira, et al., 2019), (CIGRE, 2019) e (Visacro, et al., 2020)].

4.3 Representação do raio de corona do condutor

A modelagem do efeito corona adotada neste trabalho considera a representação do aumento do raio do condutor. Através das equações apresentadas no item 3.3.2, de raio crítico e raio de corona, estes foram calculados de acordo com a amplitude da tensão resultante no ponto de incidência de descarga no cabo para-raios e, conseqüentemente, da amplitude da corrente injetada neste ponto.

O procedimento para determinação do raio de corona do condutor é realizado em 5 etapas. Inicialmente, simula-se no modelo HEM a injeção de corrente no condutor no qual deseja-se estimar o raio de corona. O modelo calcula a sobretensão resultante neste ponto. De posse desta sobretensão, procede-se à determinação do valor do raio de corona com base na equação 3.10 apresentada no capítulo 3 e aqui repetida como equação (4.1) para fins de facilitar a compreensão do processo.

$$R_c \ln \left(\frac{2h}{R_c} \right) = \frac{V}{E_0} \quad (4.1)$$

Onde:

R_c = Raio crítico do corona

$h = ht - (2/3) * f$ (onde f = flecha do condutor e ht = altura do condutor)

V (em kV) = Tensão máxima no condutor no ponto de injeção de corrente

E_0 = Campo crítico de Corona (kV/m)

Para os cálculos realizados, não foi considerada a flecha do condutor.

A fórmula do raio de corona é dada por:

$$\ln\left(\frac{2h}{R}\right) = \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) * \ln\left(\frac{2h}{Rc}\right)} \rightarrow R = 2 * h * e^{-\sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) * \ln\left(\frac{2h}{Rc}\right)}} \quad (4.2)$$

R = Raio de corona

Rc = Raio crítico do corona

r = raio do condutor sem o efeito corona

h = altura do condutor

Após calcular o raio de corona, o próximo passo consiste na representação desse valor de raio no sistema a ser simulado no modelo HEM.

Esta representação considera a modificação dos elementos próprios da matriz Z_T , que representa o efeito transversal em cada segmento do sistema analisado. Tais impedâncias transversais são calculadas considerando o valor do raio de corona. Os elementos mútuos da matriz Z_T (acoplamento transversal entre elementos) e os elementos próprios e mútuos da matriz Z_L (acoplamento longitudinal entre elementos) não são modificados, sendo calculados de acordo com o raio físico dos condutores que constituem o sistema.

O fluxograma das etapas desse procedimento é apresentado a seguir:

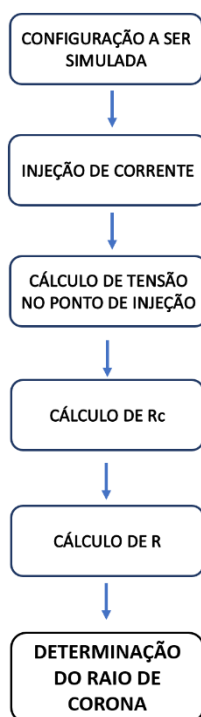


Figura 4.1 – Fluxograma indicativo das etapas de cálculo do raio de corona

Neste processo, dois pontos merecem ser destacados:

O primeiro ponto se refere à escolha do valor de campo elétrico crítico a ser considerado na solução da equação 4.1. De forma geral, neste trabalho utilizou-se o valor de 15 kV/cm, segundo recomendado em Brown (1978) e EPRI (EPRI, 1982) para utilização em caso de incidência de descargas de polaridade negativa em linhas. O segundo ponto consiste na definição do procedimento para solução da equação 4.1. Considerou-se a implementação do método Newton-Raphson (Bazaraa, 2013).

Neste trabalho todas as simulações se referem à injeção de uma corrente com forma de onda triangular, com tempo de frente de 3,8 μ s e tempo de meia onda de 75 μ s, correspondendo aos valores medianos medidos na estação de Mount San Salvatore (Anderson, et al., 1980). A escolha desse tipo de onda em detrimento a formas de ondas mais elaboradas permite perceber o impacto da variação dos parâmetros de forma mais clara.

As próximas seções desse capítulo apresentam resultados do cálculo de raio de corona segundo a abordagem descrita.

4.4 Cálculo dos raios de corona

Nesta seção são apresentados resultados de cálculo de raio de corona segundo 3 configurações:

- 1) Somente condutores e sem a presença de torres
- 2) Condutores e presença de uma torre (ausência de torres adjacentes à torre central)
- 3) Condutores, torre central e duas torres adjacentes.

4.4.1 Caso 1: Ausência de torres

Neste tipo de simulação considerou-se apenas a presença de um cabo para-raios típico de linhas de 138 kV posicionado a uma altura de 30 m. Este cabo foi simulado com raio de 0,4 cm e comprimento de 860 m, apresentando casamento de impedâncias em suas extremidades. Considerou-se a injeção de corrente no meio da extensão do cabo. Os valores de raios de corona considerando os valores de campo elétrico crítico de 15 kV/cm (EPRI, 1982) e 53,58 kV/cm dado pela aplicação da equação 3.6 apresentada na brochura do CIGRE (CIGRE, 1991) são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores de campo elétrico crítico e tensão de início de corona para diferentes referências considerando a injeção de uma corrente de 1 kA

Tensão máxima no ponto de injeção (kV)	Referência	Campo elétrico crítico (kV/cm)	Tensão de início de corona (kV)
287,7	EPRI	15	57,69
	CIGRE	53,48	205,68

Os valores de campo elétrico crítico e da tensão de início de corona referentes à fórmula do CIGRE são 3,6 vezes superiores aos valores de referência propostos pelo EPRI. Consequentemente, os valores de raio de corona são muito maiores segundo as condições do EPRI. A Figura 4.2 apresenta um gráfico com os valores calculados de raio de corona para ambas as referências em função do valor da corrente injetada. A Tabela 4.2 resume alguns valores de raio de corona calculados. Nota-se que os valores calculados pela referência CIGRE são muito menores, apresentando uma diminuição na faixa observada de 70,5% a 89,9% em relação à referência EPRI.

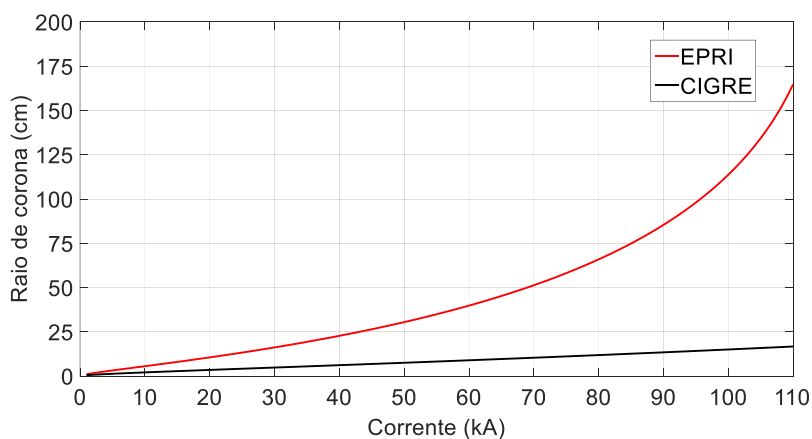


Figura 4.2 - Raios de corona para diferentes valores de campo elétrico crítico para configuração sem torres

Tabela 4.2 - Raios de corona para configuração sem torres calculados para diferentes valores de campo elétrico crítico de acordo com a corrente

Corrente (kA)	Raio de corona (cm)		Variação
	EPRI	CIGRE	
31	16,79	4,95	-70,5%
40	22,73	6,16	-72,9%
50	30,47	7,52	-75,3%
60	39,80	8,92	-77,6%
70	51,30	10,36	-79,8%
80	65,90	11,85	-82,0%
100	113,71	15,02	-86,8%
110	164,83	16,70	-89,9%

Nesta dissertação decidiu-se pela utilização do valor de campo crítico de 15 kV/cm de modo a se considerar a influência mais pronunciada do efeito corona nas análises desenvolvidas.

4.4.2 Caso 2: Presença de uma torre

Nesta simulação foi utilizada a configuração de torre típica do nível de tensão de 138 kV ilustrada na Figura 4.3:

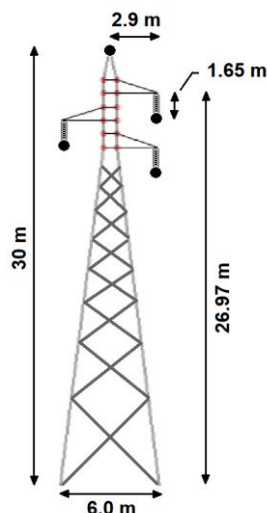


Figura 4.3 - Torre de 138 kV utilizada nas simulações

Considerou-se a presença de uma torre típica de 138 kV de 30 m de altura (Figura 4.3), um cabo para-raios de raio de 0,4 cm posicionado a uma altura de 30 m (no topo da torre) e um cabo fase de raio de 1,13 cm posicionado a 25,32m de altura, sendo que ambos os cabos apresentam casamento de impedâncias em suas extremidades. O comprimento dos cabos foi de 860 m, sendo 430 m antes e 430 m após a torre. É importante destacar que em modelagens eletromagnéticas como a do modelo HEM, os elementos que compõem o sistema são representados diretamente a partir de seu arranjo físico e geometria, como um conjunto de segmentos condutores. Além disso, as simulações consideraram a injeção de corrente no topo da torre e no cabo para-raios a 200 m do topo da torre. Os valores de raios de corona foram calculados considerando o valor de campo elétrico crítico de 15 kV/cm (EPRI, 1982) e são apresentados na Tabela 4.4.

A torre foi aterrada através de uma impedância de aterramento representada pela impedância impulsiva Z_p seguindo as recomendações de Visacro et al (2015), onde foi demonstrado que representar o aterramento através de Z_p resulta praticamente no mesmo desempenho frente a descargas atmosféricas em comparação à representação dos cabos contrapeso.

A representação da configuração simulada é apresentada na Figura 4.4.

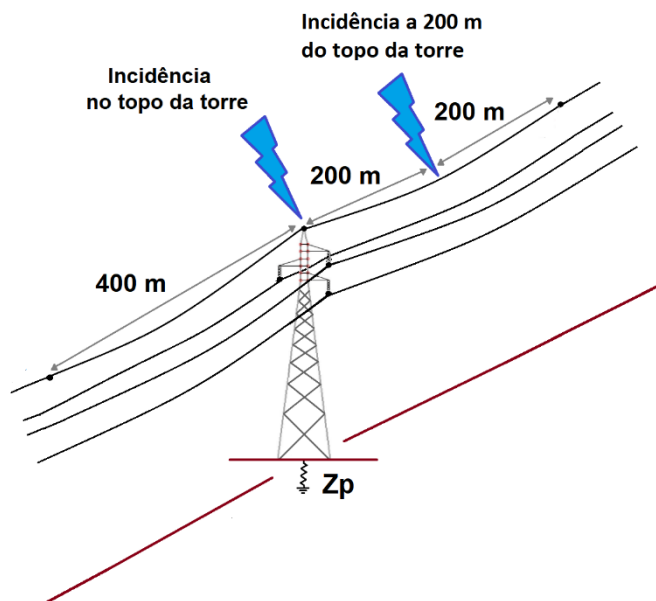


Figura 4.4 – Representação da configuração da linha com uma torre

Os valores máximos de tensão no ponto de injeção de corrente estão dispostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores máximos de tensão no ponto de injeção de corrente para configuração com uma torre

Z_p (Ω)	Tensão no ponto de injeção de corrente (kV)		
	Topo torre	200 m	Variação
20	24,75	117,61	375%
40	40,32	127,50	216%
80	66,24	143,94	117%

Na Tabela 4.3 observa-se que os maiores valores de tensão ocorreram para injeção de corrente em 200 m (o que seria o meio do vão, considerando um vão de 400 m), sendo de 117% a 375% maiores que os valores obtidos para injeção de corrente no topo da torre para valores de Z_p entre 20 Ω e 80 Ω , de modo a se obter uma análise em uma faixa de valores intermediários a elevados de Z_p . Consequentemente, os raios de corona calculados para injeção de corrente em 200 m serão maiores, conforme apresentado na Figura 4.5 e na Tabela 4.4.

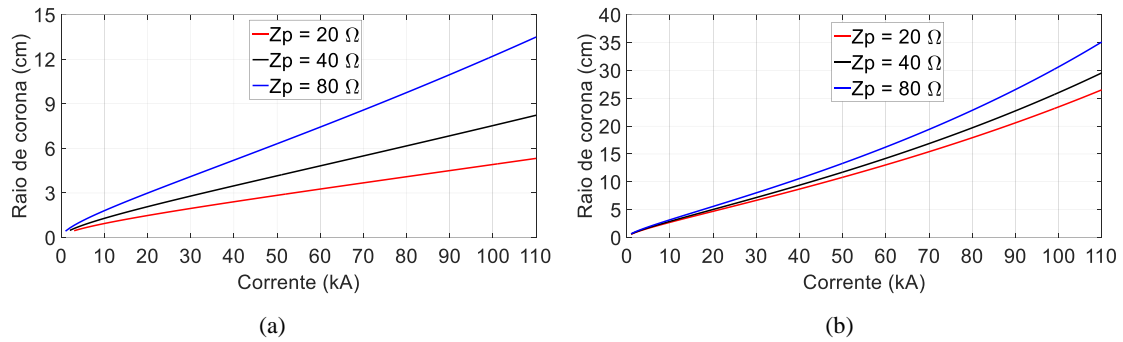


Figura 4.5 - Raios de corona para simulação com apenas uma torre. (a) Injeção no topo da torre (b) Injeção a 200 m do topo da torre

Na Figura 4.5 é possível observar que quanto maior o valor de Z_p , maior o valor do raio de corona. Isso ocorre pois, quanto maior a impedância de aterramento, menos negativa será a onda de tensão refletida no aterramento e, conseqüentemente, maior será a tensão máxima alcançada no ponto de injeção de corrente. Nota-se que, para injeção de corrente no meio do vão a variação do raio de corona para diferentes valores de Z_p é menor.

Tabela 4.4 - Raios de corona calculados para configuração sem torres adjacentes de acordo com a corrente injetada

Injeção de corrente no topo da torre				Injeção de corrente a 200 m do topo da torre			
Corrente (kA)	Raio de corona (cm)			Corrente (kA)	Raio de corona (cm)		
	$Z_p = 20 \Omega$	$Z_p = 40 \Omega$	$Z_p = 80 \Omega$		$Z_p = 20 \Omega$	$Z_p = 40 \Omega$	$Z_p = 80 \Omega$
31	2,01	2,86	4,22	31	6,88	7,40	8,28
40	2,41	3,48	5,21	40	8,70	9,40	10,59
50	2,84	4,16	6,31	50	10,82	11,74	13,32
60	3,26	4,83	7,44	60	13,05	14,22	16,25
70	3,68	5,50	8,58	70	15,41	16,86	19,41
80	4,09	6,17	9,76	80	17,91	19,69	22,83
90	4,51	6,85	10,97	90	20,59	22,73	26,56
100	4,92	7,54	12,21	100	23,45	26,01	30,63
110	5,33	8,23	13,50	110	26,51	29,55	35,10

4.4.3 Caso 3: Presença de 3 torres

Para este caso considerou-se a presença da mesma torre de 138 kV de 30 m de altura (Figura 4.3), um cabo para-raios de raio de 0,4 cm posicionado a uma altura de 30 m (no topo da torre) e um cabo fase de raio de 1,13 cm posicionado a 25,32m de altura, sendo que ambos os cabos apresentam casamento de impedâncias em suas extremidades. Posicionadas a 400 m de distância da torre de 138 kV, foram consideradas mais duas

torres de 30 m de altura, uma de cada lado, formando dois vãos de 400 m. De modo a simplificar a simulação, essas torres foram modeladas como condutores verticais. Tal simplificação, porém, não afeta os resultados de sobretensão na torre central. O comprimento dos cabos foi de 860 m: 400 m em cada vão e 30 m após as torres externas. Considerou-se a injeção de corrente no topo da torre e no cabo para-raios a 200 m do topo da torre. Os valores de raios de corona foram calculados considerando o valor de campo elétrico crítico de 15 kV/ cm (EPRI, 1982) e são apresentados na Tabela 4.7.

Da mesma forma que no item anterior, as torres foram aterradas através de uma impedância de aterramento representada pela impedância impulsiva Z_p seguindo as recomendações de Visacro et al (2015). A representação da configuração simulada é apresentada na Figura 4.6.

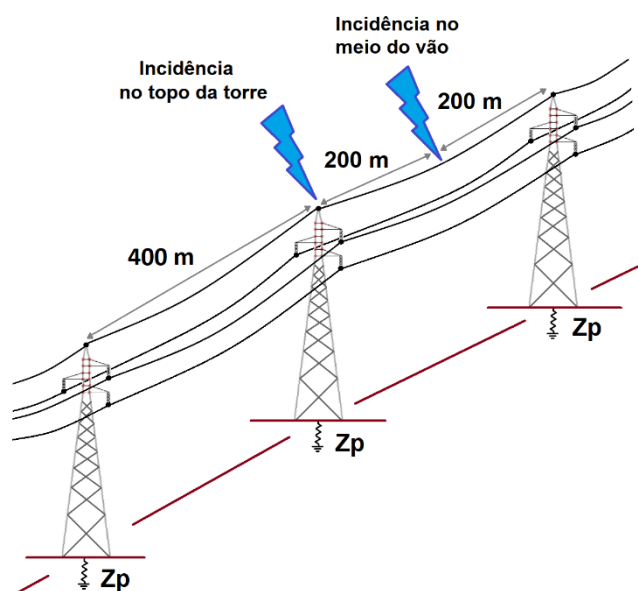


Figura 4.6 - Representação da configuração da linha com 3 torres

Os valores máximos de tensão no ponto de injeção de corrente estão dispostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores máximo de tensão no ponto de injeção de corrente para configuração com torres adjacentes

Z_p (Ω)	Tensão no ponto de injeção de corrente (kV)		
	Topo torre	200 m	Variação
20	22,99	134,30	484%
40	36,21	116,64	222%
80	58,07	103,38	78%

Nota-se que os valores de tensão máxima foram muito maiores quando a injeção de corrente é no meio do vão, apresentando valores máximos de 484% a 78% maiores em relação a injeção no topo da torre para valores de Z_p entre 20Ω e 80Ω . Além disso, para injeção de corrente no topo da torre as tensões máximas aumentam com o valor de Z_p , enquanto que para injeção de corrente no meio do vão as tensões máximas diminuem com o valor de Z_p .

Na Tabela 4.6 são dispostos os valores máximos de tensão para o caso com somente uma torre (sem torres adjacentes) e para o caso com 3 torres (com torres adjacentes) a fim de se comparar os dois casos.

Tabela 4.6 - Valores máximo de tensão no ponto de injeção de corrente para os casos com torres adjacentes e sem torres adjacentes

Z_p (Ω)	Tensão no ponto de injeção de corrente (kV)					
	Topo da torre			Meio de vão (200 m)		
	STA	CTA	Variação	STA	CTA	Variação
20	24,75	22,99	-7,1%	117,61	134,30	14,2%
40	40,32	36,21	-10,2%	127,5	116,64	-8,5%
80	66,24	58,07	-12,3%	143,94	103,38	-28,2%

STA= Sem torres adjacentes, CTA= Com torres adjacentes.

Percebe-se que, para injeção no topo da torre, os valores de tensão máxima no caso com torres adjacentes são menores em relação ao caso sem torres adjacentes, apresentando uma variação de 7,1% a 12,3% para valores de Z_p entre 20Ω e 80Ω . Na injeção no meio de vão ocorre um aumento de 14,2% para Z_p de 20Ω no caso com torres adjacentes e uma diminuição de 8,5% e 28,2% nos casos de Z_p de 40Ω e 80Ω , respectivamente. A Figura 4.7 e a Tabela 4.7 denotam os resultados de raio de corona em função do valor do pico de corrente injetada no topo da torre e no meio do vão.

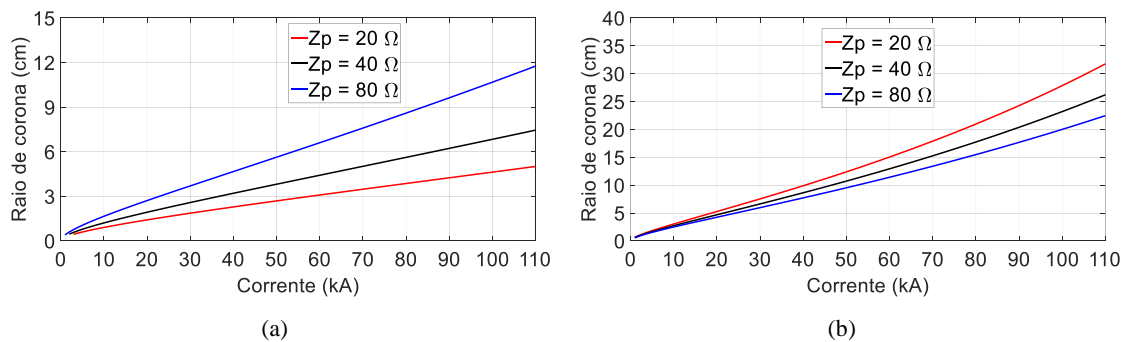


Figura 4.7 - Raios de corona para simulação com torres adjacentes. (a) Injeção no topo da torre (b) Injeção no meio do vão.

Tabela 4.7 - Raios de corona calculados para configuração com torres adjacentes de acordo com a corrente injetada

Injeção de corrente no topo da torre				Injeção de corrente no meio do vão			
Corrente (kA)	Raio de corona (cm)			Corrente (kA)	Raio de corona (cm)		
	Z _p =20 Ω	Z _p =40 Ω	Z _p =80 Ω		Z _p =20 Ω	Z _p =40 Ω	Z _p =80 Ω
31	1,91	2,64	3,80	31	7,76	6,83	6,13
40	2,28	3,20	4,67	40	9,89	8,63	7,71
50	2,69	3,81	5,63	50	12,39	10,73	9,53
60	3,09	4,42	6,60	60	15,05	12,93	11,42
70	3,48	5,02	7,59	70	17,90	15,27	13,40
80	3,86	5,62	8,60	80	20,96	17,74	15,48
90	4,24	6,23	9,63	90	24,28	20,38	17,68
100	4,63	6,84	10,68	100	27,86	23,20	20,01
110	5,01	7,45	11,76	110	31,77	26,22	22,48

Os valores de raio de corona apresentados na Tabela 4.7 em relação aos resultados de raio de corona calculados para a simulação sem torres adjacentes (apenas com torre central), para o caso de injeção de corrente no topo da torre, apresentaram um aumento, variando de 5,3% a 6,4% e de 8,4% a 14,8% para valores de Z_p de 20 Ω a 80 Ω nas correntes de 31 kA a 110 kA, respectivamente. No caso de injeção de corrente no meio do vão, houve um aumento do valor do raio de corona para o caso de Z_p igual a 20 Ω, apresentando uma variação de 11,4% a 16,6% nas correntes de 31 kA a 110 kA, respectivamente. Para os valores de Z_p de 40 Ω e 80 Ω, houve uma redução no valor do raio de corona, com variações de 8,4% a 12,7% e de 35% a 56,2%, respectivamente, para correntes de 31 kA a 110 kA.

O raio de corona apresenta maior valor para injeção de corrente no meio do vão em comparação com a injeção de corrente no topo da torre, assumindo o mesmo valor de corrente. Tal condição é resultado dos maiores valores de pico de tensão no ponto de injeção no meio do vão. Este comportamento é explicado pelo maior tempo necessário para que o efeito da reflexão negativa de tensão no aterramento da torre atue para reduzir a tensão resultante no ponto de injeção no meio do vão.

4.5 Metodologia para representação da dinâmica do efeito

corona em linhas

No capítulo anterior foram descritos modelos desenvolvidos por diversos autores. Sabe-se que o efeito corona é dinâmico e varia ao longo do tempo. Desta forma, além de simular o efeito como um aumento radial de todo o cabo, é necessário implementar um modelo que inclua o efeito dinâmico do corona ao longo do tempo e do espaço. Para isto, foi realizada a divisão em parcelas da onda de corrente injetada, desta forma, serão considerados raios diferentes de corona para uma mesma injeção de corrente. Essa divisão se assemelha à divisão da onda de tensão realizada no trabalho de Santiago (1987).

A divisão em parcelas foi implementada de forma que ocorra um aumento gradual do raio ao longo do tempo para representar o aumento também gradual da tensão no ponto de injeção de corrente no condutor. Para uma corrente de 100 kA foram escolhidos três níveis de corona para representar este efeito, ou seja, foi realizada uma divisão da corrente em três parcelas: a primeira parcela com o raio de corona referente a 20 kA, a segunda parcela com o raio de corona referente a 60 kA e a terceira e última parcela com o raio de corona referente a 100 kA.

A parcela de 20 kA foi representada com uma amplitude de 0,2 kA, a parcela de 60 kA foi representada com uma amplitude de 0,6 kA e a parcela de 100 kA foi representada com uma amplitude de 1 kA. Como a soma das parcelas resulta em 1,8 kA, para normalizar os resultados para uma corrente de 1 kA, após a soma e obtenção do resultado final, este é dividido por 1,8. Na Tabela 4.8 estão dispostos os valores dos raios de corona referentes a cada parcela de corrente em função da impedância impulsiva do aterramento.

Tabela 4.8 - Valores de raio de corona e de corrente referentes às parcelas da divisão para injeção de corrente no meio do vão

Raio de corona (cm)	$Z_p = 20 \Omega$	$Z_p = 40 \Omega$	$Z_p = 80 \Omega$	Tempo de subida (μs)	Corrente (kA)
Parcela 1	5,27 (20 kA)	4,68 (20 kA)	4,24 (20 kA)	0 a 0,4	0 a 0,1895
Parcela 2	15,05 (60 kA)	12,93 (60 kA)	11,42 (60 kA)	0,4 a 1,7	0 a 0,6174
Parcela 3	27,86 (100 kA)	23,20 (100 kA)	20,01 (100 kA)	1,7 a 3,8	0 a 1,0062

A soma das três parcelas de corrente deve ter como resultado uma onda resultante de 3,8 μs de tempo de frente e 75 μs de tempo de meia onda. A Figura 4.8 mostra cada parcela separadamente e a soma das mesmas, resultando em uma onda de 1,8 kA de amplitude e tempos de 3,8/75 μs .

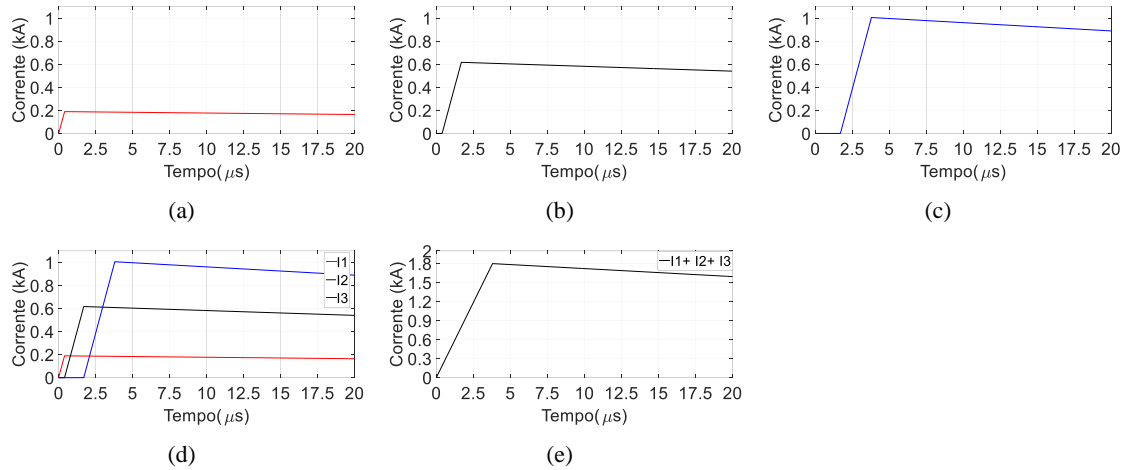


Figura 4.8 - 1ª linha: Tensões relacionadas à divisão em parcelas. (a) Corrente da parcela 1 (b) Corrente da parcela 2 (c) Corrente da parcela 3, (d) Parcelas 1,2 e 3 (e) Resultado da soma das parcelas – onda de 1,8 kA - 3,8/75 μs

Nesta divisão em parcelas, as simulações foram realizadas com a injeção de corrente no meio do vão. Os resultados de tensão em cada ponto foram obtidos através da soma dos resultados referentes a cada uma das três parcelas de corrente e da divisão desta soma por 1,8, de modo a normalizar os resultados. Os resultados das simulações são apresentados no capítulo 5.

5 Resultados e Análises

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações com a inclusão do efeito corona realizadas no programa HEM (Visacro, et al., 2005) . Tais resultados são comparados com simulações sem a representação do efeito corona e as diferenças são discutidas e analisadas.

As simulações consideraram uma linha de transmissão de 138 kV, com vão de 400 m de comprimento e valor de CFO (*critical flashover overvoltage*, tensão crítica em que ocorre disrupção elétrica do isolamento em 50% dos casos) de 650 kV. Os raios do cabo para-raios e do cabo fase são de 0,4 cm e 1,13 cm, respectivamente. Foram injetadas correntes no topo da torre e no meio do vão (200 m). A forma de onda da corrente de descarga utilizada foi triangular com tempo de frente (Td30) e tempo de meia onda de 3,8 μ s e 75 μ s, respectivamente, de acordo com os valores medianos medidos por Berger (Anderson, et al., 1980).

O aterramento das torres foi representado como um elemento concentrado com o seu valor igual ao da impedância impulsiva Z_P (Z_P é dado pela razão da tensão máxima, V_P pela corrente máxima no aterramento, I_P , $Z_P = V_P/I_P$). Esta representação é analisada em Visacro et al (2015), onde é demonstrado que a utilização de Z_P apresenta resultados de desempenho muito próximos aos obtidos quando o aterramento é representado por cabos contrapeso. Desta forma, otimiza-se o tempo de processamento das simulações. Neste trabalho, as impedâncias de aterramento utilizadas foram 20 Ω , 40 Ω e 80 Ω .

A torre utilizada nas simulações é uma torre típica de uma linha de 138 kV e está apresentada na Figura 5.1. A altura do cabo para-raios é de 30 m e do cabo fase superior é de 25,32 m. Em todas as simulações apresentadas ao longo do capítulo, os cabos para-raios e fase apresentam casamento de impedância em suas extremidades. O efeito corona caracterizado como a expansão do raio do condutor é considerado por toda a extensão do cabo para-raios.

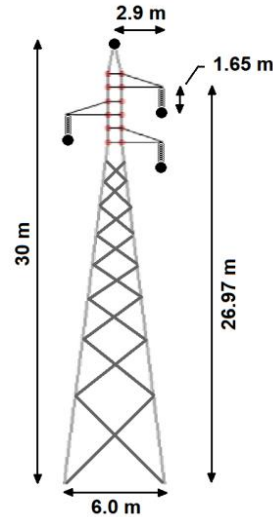


Figura 5.1 - Torre de 138 kV utilizada nas simulações

A análise da disrupção elétrica no isolamento foi realizada através do método DE (Disruptive Effect Method) no qual foram utilizadas as constantes propostas por Hileman (Kd=1,36 e $\frac{V_0}{CFO} = 0,77$) (Hileman, 1999). Através da aplicação do método DE, foi possível determinar os valores de corrente crítica, que se refere ao valor mínimo de corrente capaz de levar ao *backflashover*. Além disso, determinou-se o percentual de correntes que excedem a corrente crítica através da curva de probabilidade cumulativa proposta em IEEE Std. 1243 (1997). Neste trabalho, tal percentual de correntes que excedem a corrente crítica é denominado percentual de *backflashover*, ou probabilidade de *backflashover*. Este percentual é calculado através da equação 5.1:

$$P(I > I_c) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_c}{\bar{I}}\right)^{2,6}} \quad (5.1)$$

Onde \bar{I} é o valor mediano de corrente de 31 kA e I_c é a corrente crítica calculada, em kA.

Uma diminuição no percentual de *backflashover* indica uma melhora de desempenho da linha enquanto um aumento no percentual de *backflashover* indica uma piora de desempenho da linha.

Nos itens seguintes, são apresentados os resultados encontrados para as diferentes configurações em teste.

5.2 Simulações somente com cabo para-raios

O objetivo dessa análise é apresentar o efeito puro causado pela representação do raio de corona nas sobretensões desenvolvidas ao longo do cabo para-raios

As simulações consideraram duas condições para o cabo para-raios: sem corona e com um raio de corona 100 vezes maior que o raio original do condutor (0,4 cm e 40 cm, respectivamente). O valor de raio de corona de 40 cm em um condutor infinito estaria associado à injeção de uma corrente de 60 kA. Foi considerada a injeção de corrente no meio do condutor (o que seria geometricamente o ponto localizado em 0 m, onde estaria posicionada uma eventual torre). A Figura 5.2 ilustra a configuração utilizada nas simulações, e a Figura 5.3 apresenta as formas de onda obtidas ao longo do cabo para-raios.

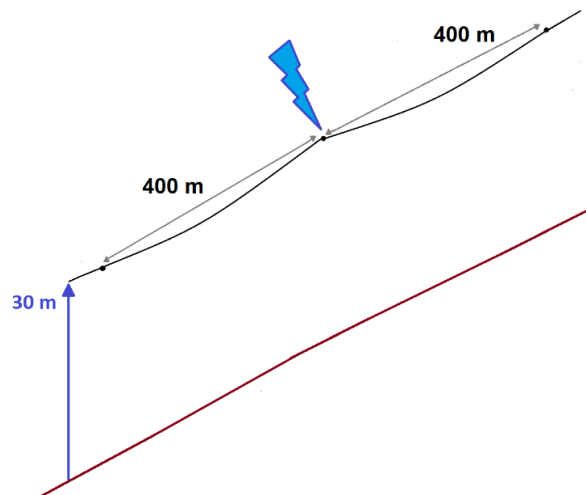


Figura 5.2 - Configuração utilizada para simulações somente com o cabo para-raios

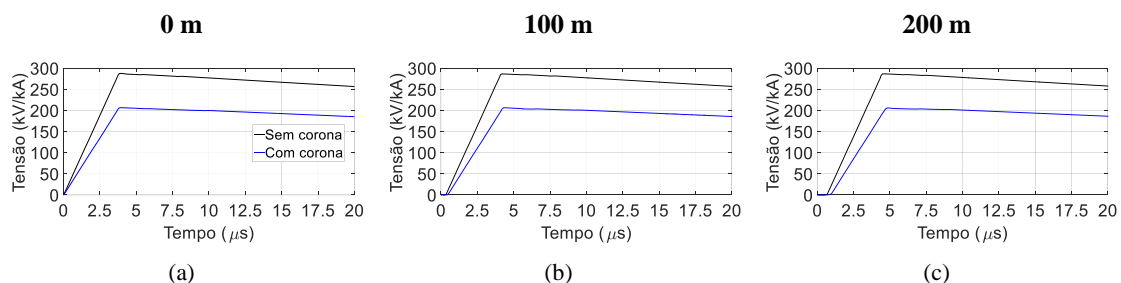


Figura 5.3 - Tensões ao longo do cabo para-raios para injeção de corrente em 0 m. (a) Tensão no ponto de incidência, (b) Tensão a 100 m do ponto de incidência, (c) Tensão a 200 m do ponto de incidência. Curva em preto: sem corona; curva em azul: corona relativo a um raio de 40 cm

Nas formas de onda apresentadas, nota-se que para a simulação com corona ocorre uma redução da tensão em todos os pontos em relação à simulação sem corona. Isso ocorre pois, com a inclusão do efeito corona, a impedância de surto do cabo diminui, porém a corrente injetada permanece a mesma. Desta forma, como a tensão resultante pode ser vista como resultado da multiplicação da corrente pela impedância de surto da linha, considerando uma impedância menor, a tensão resultante também será menor. Nas tensões observadas, nota-se uma redução de aproximadamente 28% no valor da tensão máxima nas simulações em que o efeito corona é considerado. É possível perceber também que, para a mesma simulação, a tensão praticamente não se modifica ao longo do cabo devido à configuração não possuir torres e devido ao comprimento do cabo ser pequeno para que ocorra uma queda de tensão expressiva ao longo do mesmo.

5.3 Configuração: Linha com apenas uma torre (ausência de torres adjacentes)

Nesta configuração considera-se a presença de uma torre, o cabo para-raios e o condutor fase superior. O objetivo deste tipo de simulação consiste em proporcionar uma condição na qual seja observada a influência da representação do efeito corona, considerando apenas o efeito das reflexões nos aterramentos de uma torre.

Raios de corona relativos a valores de pico de corrente de 31 kA e 100 kA foram calculados e os resultados são apresentados na Tabela 5.1. Tais valores de corrente se referem aos valores mediano (50% das correntes de descarga têm valor superior a 31 kA) e de 5% (5% das correntes de descarga possuem valor acima de 100 kA) segundo a distribuição de probabilidade acumulada dos picos de corrente de primeira descarga negativa medidas na estação de Monte San Salvatore (Anderson, et al., 1980).

Considera-se a injeção de corrente no topo da torre e no meio do vão (a 200 m da torre), conforme ilustrado na Figura 5.4.

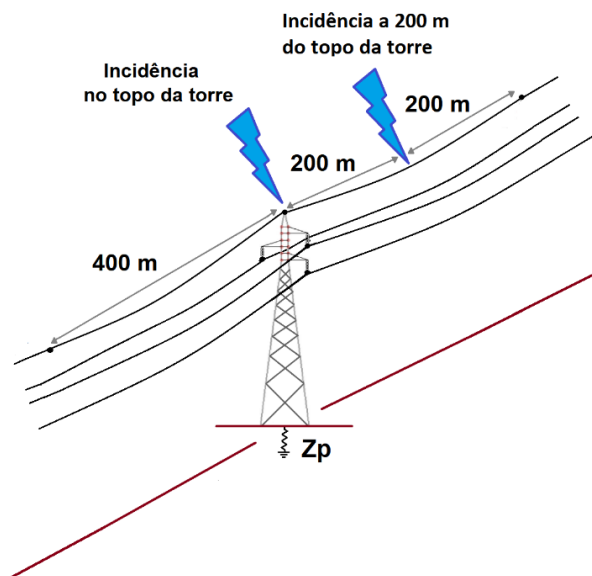


Figura 5.4 - Configuração da linha sem torres adjacentes – Incidência de descarga no topo da torre ou no meio do vão

Tabela 5.1 - Valores de raios de corona para configuração sem torres adjacentes

Z_p (Ω)	Injeção de corrente: Topo da torre		Injeção de corrente: Meio do vão	
	Raio de corona relativo a 31 kA (cm)	Raio de corona relativo a 100 kA (cm)	Raio de corona relativo a 31 kA (cm)	Raio de corona relativo a 100 kA (cm)
20	2,01 (5x)	4,92 (12,3x)	6,88 (17,2x)	23,45 (58,6x)
40	2,86 (7,2x)	7,54 (18,9x)	7,40 (18,2x)	26,01 (65x)
80	4,22 (10,6x)	12,21 (30,5x)	8,28 (20,7x)	30,63 (76,6x)

Em parênteses: quantidade de vezes que o raio de corona é maior que o raio original do cabo para-raios

Nota-se que os raios de corona são muito maiores para injeção de corrente no meio do vão em comparação à injeção de corrente no topo da torre assumindo o mesmo valor de corrente. Tal condição é resultado dos maiores valores de pico de tensão no ponto de injeção no meio do vão. Este comportamento é explicado pelo maior tempo necessário para que o efeito da reflexão negativa de tensão no aterramento da torre atue para reduzir a tensão resultante no ponto de injeção no meio do vão.

5.3.1 Injeção de corrente no topo da torre

A Figura 5.5 apresenta as formas de onda de tensão ao longo do cabo para-raios para a injeção de uma corrente de 1 kA 3,8/75 μ s no topo da torre. Os valores são apresentados na unidade kV/kA de modo a ser possível comparar os valores de tensão envolvidos. Para todos os resultados de tensão ao longo deste capítulo será adotada a unidade de medida kV/kA. As formas de onda não se modificam independentemente do

valor de corrente injetada, a única diferença é que ao se injetar 31 kA ou 100 kA, todos os valores de tensão seriam multiplicados por 31 ou por 100.

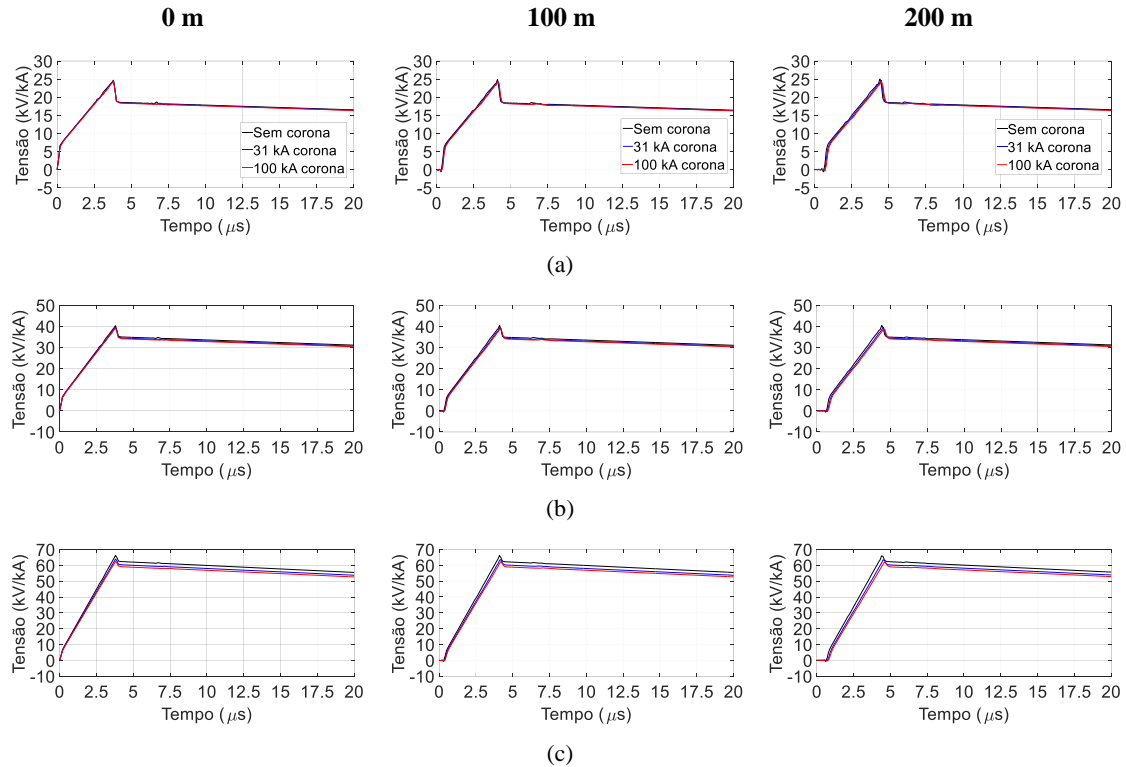


Figura 5.5 - Tensões ao longo do cabo para-raios para configuração sem torres adjacentes. Injeção no topo da torre. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$, (c) $Z_p= 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão no ponto de incidência; coluna central: tensão a 100 m do ponto de incidência; coluna da direita: tensão a 200 m do ponto de incidência. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I= 100 \text{ kA}$

Nota-se pelas formas de onda que o efeito corona alterou muito pouco os valores máximos ao longo do cabo para-raios. Apesar dos valores serem muito parecidos, os casos com corona apresentaram uma leve diminuição em seus valores máximos em comparação ao caso sem corona. A maior variação ocorreu para os casos de Z_p igual a 80Ω , apresentando no caso com corona relativo a 100 kA uma diminuição de 5,6%, 5,7% e 6%, na tensão no topo da torre, a 100 m do topo da torre e a 200 m do topo da torre, respectivamente. Para o corona relativo a 31 kA e o mesmo valor de Z_p , essa diminuição foi de 3,4%, 3,9% e 3,8%, respectivamente para as mesmas posições. Uma característica esperada e observada nas formas de onda ao longo do cabo para-raios consiste no aumento do valor máximo de tensão com o aumento do valor da impedância impulsiva de aterramento.

Também foram calculadas as tensões na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior da linha. A escolha dessa cadeia de isoladores se deve ao fato da fase

associada estar mais próxima do cabo para-raios e, portanto, sujeita a uma maior influência da representação do efeito corona, em termos do aumento do acoplamento entre tais cabos. A Figura 5.6 mostra as formas de onda de tensão e a Tabela 5.2 resume os valores máximos para cada situação. Nota-se que na estrutura as formas de onda estão sobrepostas, apresentando valores máximos muito próximos em todos os casos. Ou seja, a representação do efeito corona devido à injeção de corrente no topo da torre não afetou as sobretensões na própria torre. Como a simulação não contempla torres adjacentes, não são observadas reflexões e as ondas apresentam um decaimento linear, sem oscilações.

Da mesma forma que nas ondas ao longo do cabo para-raios, as maiores variações de tensão no cabo fase ocorreram nos casos de impedância impulsiva de 80Ω . Com o efeito corona, ocorre um aumento no fator de acoplamento entre o cabo para-raios e o cabo fase, desta forma a tensão na fase nos casos com corona tende a ser maior. Isso ocorreu para todos os valores de Z_p . Para 80Ω , esse aumento da tensão máxima na fase foi de 10,9% e de 17,4% para os raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA, respectivamente. Para Z_p de 20Ω , esse aumento na fase foi de 8,6% e 14,6% para os raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA, respectivamente.

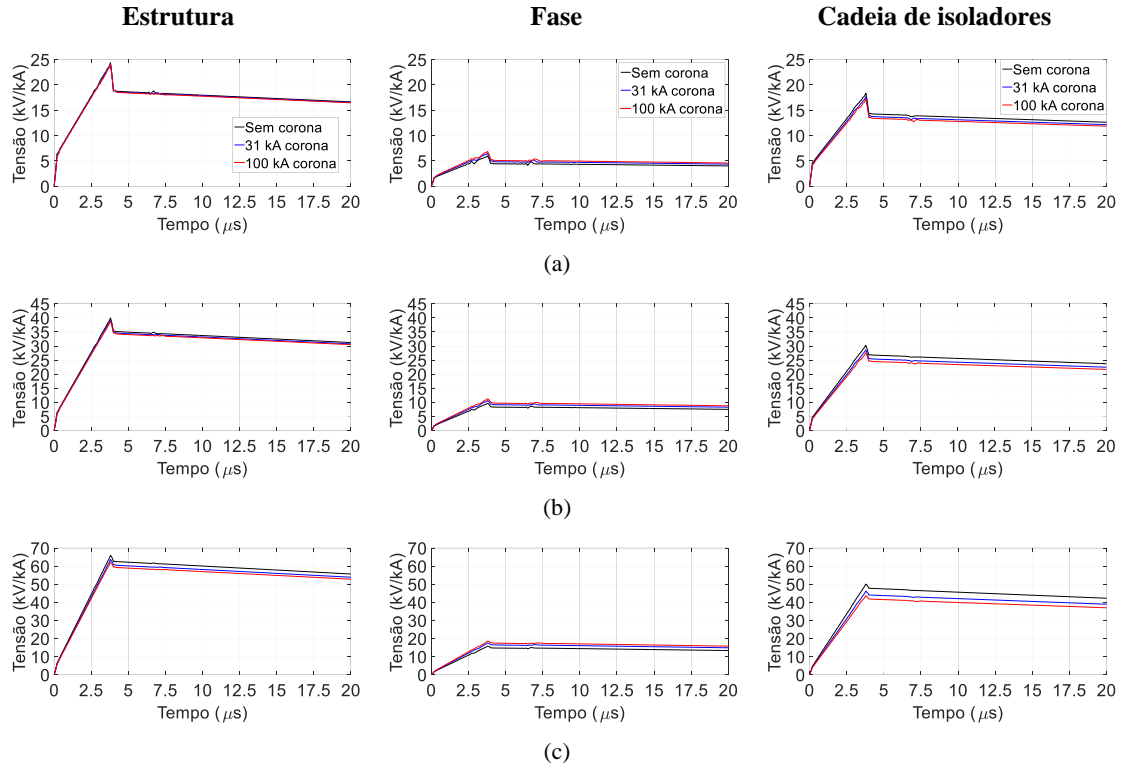


Figura 5.6 - Tensões na estrutura, fase e cadeia superior para configuração sem torres adjacentes. Injeção no topo da torre. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão na estrutura superior; coluna central: tensão na fase superior; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

Tabela 5.2 - Valores máximos de tensão na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior para configuração sem torres adjacentes – injeção de corrente no topo da torre

$Z_p (\Omega)$	Local	Tensão (kV/kA)		
		Sem corona	Corona relativo a 31 kA (2,01 cm)	Corona relativo a 100 kA (4,92 cm)
20	Estrutura	24,40	24,21 (-0,8%)	24,12 (-1,1%)
	Fase	6,02	6,54 (8,6%)	6,90 (14,6%)
	Cadeia de isoladores	18,38	17,67 (-3,9%)	17,22 (-6,3%)
40	Estrutura	40,01	39,34 (-1,7%)	38,95 (-2,6%)
	Fase	9,71	10,66 (9,8%)	11,32 (16,6%)
	Cadeia de isoladores	30,30	28,67 (-5,4%)	27,63 (-8,8%)
80	Estrutura	65,97	63,73 (-3,4%)	62,27 (-5,6%)
	Fase	15,84	17,56 (10,9%)	18,59 (17,4%)
	Cadeia de isoladores	50,14	46,17 (-7,9%)	43,68 (-12,9%)

Em parênteses: variação em relação ao caso sem corona.

Como consequência dos efeitos observados na estrutura e na fase, observa-se uma redução da sobretensão na cadeia de isoladores ao representar o efeito corona. No entanto, essa redução é muito discreta. As reduções para Z_p de 20 Ω foram de 3,9% e 6,3% para raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA respectivamente, para Z_p de 40 Ω reduções de 5,4% e 8,8% para raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA, respectivamente, e para Z_p de 80 Ω reduções de 7,9% e 12,9% para raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA, respectivamente.

A Figura 5.7 ilustra a corrente que desce pela torre em todos os casos. Os valores de pico dessas correntes estão apresentados na Tabela 5.3.

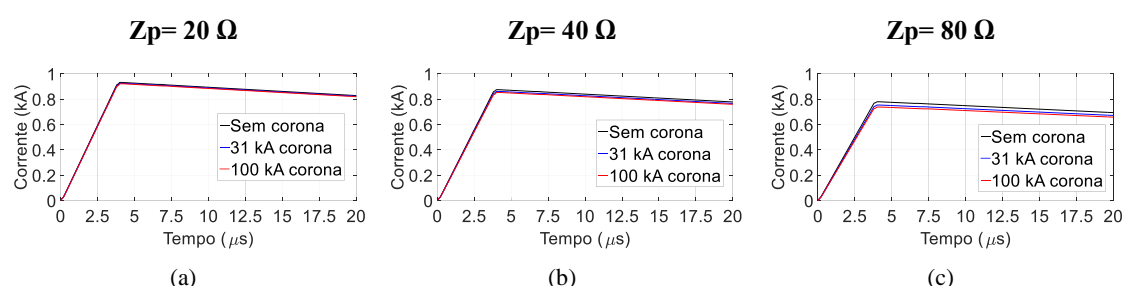


Figura 5.7 - Corrente na torre para injeção no topo da torre na configuração sem torres adjacentes. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$ e (c) $Z_p= 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I= 100$ kA

Tabela 5.3 - Valores máximos de corrente na torre para configuração sem torres adjacentes – injeção de corrente no topo da torre

Z_p (Ω)	Corrente (kA)			
	Sem corona	Corona relativo a 31 kA		Corona relativo a 100 kA
20	0,93	0,93	(-0,7%)	0,92 (-1,2%)
40	0,88	0,86	(-1,6%)	0,85 (-2,5%)
80	0,78	0,75	(-3,3%)	0,74 (-5,3%)

Em parênteses: variação em relação ao caso sem corona

Os resultados mostram que as correntes que descem pela torre variam pouco para cada valor de Z_p . Para Z_p igual a 20 Ω , a redução em relação ao caso sem corona foi de 0,7% e 1,2% para raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA, respectivamente. Para Z_p igual a 40 Ω , a redução em relação ao caso sem corona foi de 1,6% e 2,5% para raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA, respectivamente, e finalmente, para Z_p igual a 80 Ω a diminuição foi maior, de 3,3% e 5,3%, respectivamente para os raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA. Apesar da variação ser pequena, em todos os casos com corona houve

uma redução na corrente que desce pela torre e essa variação se torna maior com o aumento do valor de Z_p .

5.3.2 Injeção de corrente no meio do vão

Na Figura 5.8 são apresentadas as formas de onda da tensão ao longo do cabo para-raios para a injeção de uma corrente de 1 kA 3,8/75 μ s no meio do vão. Nota-se que em todos os gráficos a tensão máxima sempre ocorre no caso sem corona, seguido do caso do corona relativo a 31 kA e, por último, do caso do corona relativo a 100 kA.

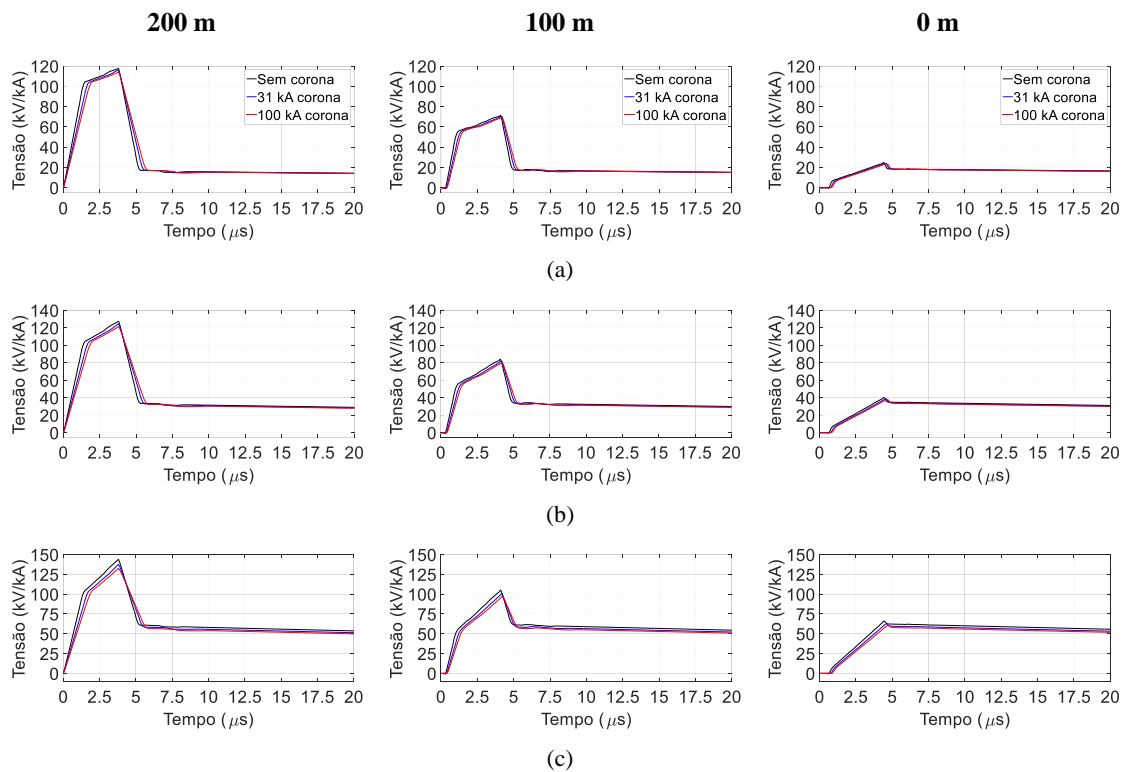


Figura 5.8 - Tensões ao longo do cabo para-raios para configuração sem torres adjacentes. Injeção no meio do vão. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão no ponto de incidência; coluna central: tensão a 100m do ponto de incidência; coluna da direita: tensão no topo da torre. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

Ao observar os gráficos, é possível perceber um atraso nos casos com corona em relação ao caso sem corona e esse atraso é maior para o caso com o maior raio de corona (relativo a 100 kA), porém o atraso apresentado é muito pequeno. A ausência das torres adjacentes resulta em ondas sem oscilações (sem as reflexões referentes aos aterramentos das torres adjacentes). Em relação aos casos sem corona, a representação do efeito corona causou uma pequena redução nas amplitudes das tensões.

Para a injeção no meio de vão, diferentemente dos resultados de injeção no topo da torre, há uma diferença pequena no valor de tensão máxima ao longo do cabo para raios. No caso de Z_p igual a 20Ω , a variação de tensão máxima no ponto de incidência em relação aos raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA foi de -1,1% e -2,8%, respectivamente. Já no topo da torre essa variação foi maior, de -3,6% e -6,3% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente. Para Z_p igual a 40Ω , a variação de tensão máxima no ponto de incidência em relação aos raios de corona de 31 kA e 100 kA foi de -2,3% e -4,7%, respectivamente. No topo da torre, essa variação foi maior, de -4,3% e -6,5% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente. Finalmente, para Z_p igual a 80Ω , a variação de tensão máxima no ponto de incidência em relação aos raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA foi de -4,3% e -7,9%, respectivamente. Já no topo da torre, essa variação foi maior, de -5,0% e -8,2% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente.

A tensão também foi observada na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior. Na Figura 5.9 estão dispostas as formas de onda obtidas e os valores máximos estão apresentados na Tabela 5.4. Nestes resultados, nota-se o atraso das ondas nos casos com corona em relação ao caso sem corona, principalmente na tensão na cadeia de isoladores. A tensão na estrutura sofre poucas modificações, mas os casos com corona sempre apresentam valores máximos ligeiramente menores em relação ao caso sem corona.

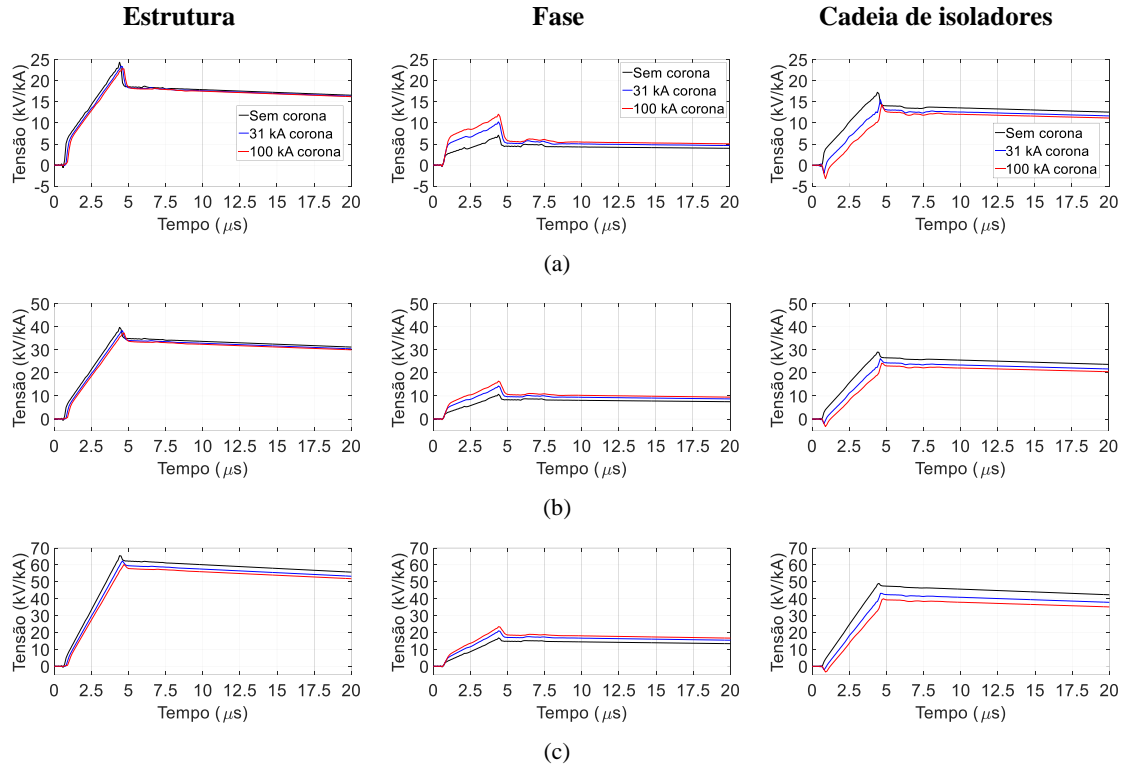


Figura 5.9 - Tensões na estrutura, fase e cadeia de isoladores superior para configuração sem torres adjacentes. Injeção no meio do vão. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão na estrutura superior; coluna central: tensão na fase superior; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

Tabela 5.4 - Valores máximos de tensão na estrutura, na fase e na cadeia superior para configuração sem torres adjacentes – injeção de corrente no meio do vão

$Z_p (\Omega)$	Local	Tensão (kV/kA)		
		Sem corona	Corona relativo a 31 kA (6,88 cm)	Corona relativo a 100 kA (23,45 cm)
20	Estrutura	24,43	23,45 (-4,0%)	22,86 (-6,4%)
	Fase	7,14	10,28 (44,1%)	12,10 (69,5%)
	Cadeia de isoladores	17,29	15,52 (-10,2%)	14,38 (-16,9%)
40	Estrutura	39,84	38,33 (-3,8%)	37,42 (-6,1%)
	Fase	10,77	14,36 (33,3%)	16,48 (53,0%)
	Cadeia de isoladores	29,06	26,21 (-9,8%)	24,26 (-16,5%)
80	Estrutura	65,47	62,40 (-4,7%)	60,25 (-8,0%)
	Fase	16,83	21,01 (24,8%)	23,50 (39,6%)
	Cadeia de isoladores	49,05	43,21 (-11,9%)	39,99 (-18,5%)

Em parênteses: variação em relação ao caso sem corona.

Na fase superior, para Z_p igual a 20Ω , a tensão máxima diminuiu 44,1% no caso do corona referente a 31 kA e 69,5% no caso do corona referente a 100 kA. Para 40Ω , essa diminuição foi de 33% e 53%, respectivamente. Em 80Ω , a redução foi de 24,8% e 39,6%. Com o aumento do raio devido ao efeito corona, há um aumento do acoplamento entre o cabo para-raios e o cabo fase, o que faz com que a tensão no cabo fase aumente. Com o aumento da tensão na fase e uma tensão na estrutura semelhante ao caso sem corona, a tensão na cadeia de isoladores tende a diminuir. Desta forma, a redução da tensão na cadeia de isoladores foi considerável: para Z_p igual a 20Ω , redução de 10,2% e 16,9% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente, e para Z_p igual a 40Ω , redução de 9,8% e 16,5%, respectivamente. O caso de Z_p igual a 80Ω é o que apresenta os maiores valores e as maiores variações de tensão em relação ao caso sem corona. Na cadeia de isoladores, essa variação foi de -12% para o raio de corona referente a 31 kA e -18,6% para o raio de corona referente a 100 kA.

As correntes que descem pela torre também foram observadas e estão dispostas na Figura 5.10 . Os valores de pico dessas correntes estão apresentados na Tabela 5.5.

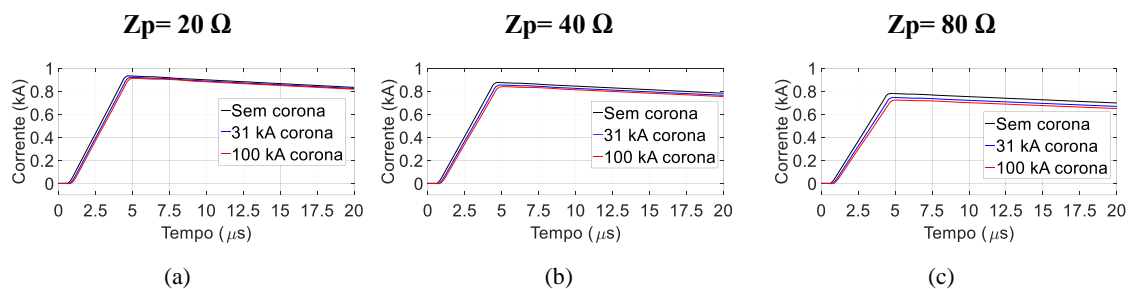


Figura 5.10 - Corrente na torre para injeção no meio do vão na configuração sem torres adjacentes. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$ e (c) $Z_p= 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31$ kA; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100$ kA

Tabela 5.5 - Valores máximos de corrente na torre para configuração sem torres adjacentes – injeção de corrente no meio do vão

Z_p (Ω)	Corrente (kA)		
	Sem corona	Corona relativo a 31 kA	Corona relativo a 100 kA
20	0,93	0,92 (-1,4%)	0,91 (-2,3%)
40	0,88	0,85 (-2,5%)	0,84 (-4,2%)
80	0,78	0,75 (-4,5%)	0,72 (-7,4%)

Em parênteses: variação em relação ao caso sem corona.

A corrente que desce na torre apresenta a mesma forma de onda, sem oscilações, com pequenos atrasos nos casos com corona. Nota-se que os valores máximos de corrente são praticamente os mesmos, independentemente do raio de corona, sendo levemente menores quanto maior o valor do raio de corona.

A variação na corrente máxima foi maior no caso de Z_p igual a 80Ω , onde houve uma redução de 4,5% no caso do corona referente a 31 kA e de 7,4% no caso do corona referente a 100 kA. O valor de corrente é menor quanto maior o valor de Z_p e quanto maior o valor do raio de corona. Quanto maior o valor de Z_p , menor a corrente que descera para a torre e, quanto maior o raio de corona, menor a impedância do cabo e menor a corrente que flui pela torre.

5.4 Configuração: Linha com torres adjacentes

O objetivo de analisar a linha com torres adjacentes consiste em proporcionar uma condição na qual seja observada a influência da representação do efeito corona considerando o efeito das reflexões nos aterramentos da torre central e das torres adjacentes.

Raios de corona relativos a valores de pico de corrente de 31 kA e 100 kA são calculados e os resultados são apresentados na Tabela 5.6. Tais valores de corrente se referem aos valores medianos (50% das correntes de descarga têm valor superior a 31 kA) e de 5% (5% das correntes de descarga possuem valor acima de 100 kA) segundo a distribuição de probabilidade acumulada dos picos de corrente de primeira descarga negativa medidas na estação de Monte San Salvatore (Anderson, et al., 1980).

Considera-se a injeção de corrente no topo da torre e no meio do vão (a 200 m da torre). A Figura 5.11 ilustra a condição simulada.

Tabela 5.6 - Valores de raios de corona para configuração com torres adjacentes

Z_p (Ω)	Raio (cm) - Topo da torre		Raio (cm) - Meio do vão	
	Raio de corona relativo a 31 kA (cm)	Raio de corona relativo a 100 kA (cm)	Raio de corona relativo a 31 kA (cm)	Raio de corona relativo a 100 kA (cm)
20	1,91 (4,8x)	4,63 (11,6x)	7,76 (19,4x)	27,86 (69,7x)
40	2,64 (6,6x)	6,84 (17,1x)	6,83 (17,1)	23,2 (58x)
80	3,8 (9,5x)	10,68 (26,7x)	6,13 (15,3x)	20,01 (50x)

Em parênteses: quantidade de vezes que o raio de corona é maior que o raio original do cabo para-raios

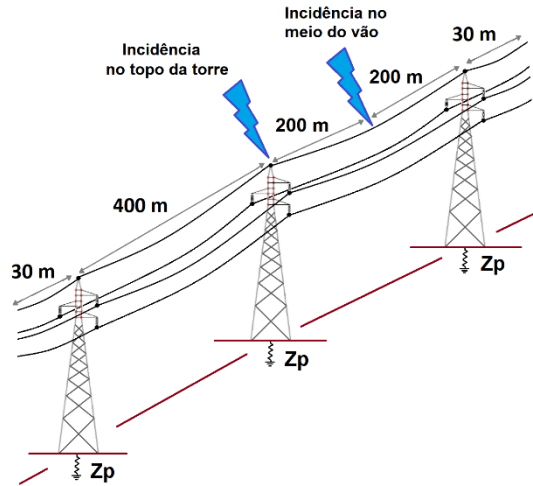


Figura 5.11 - Configuração da linha com torres adjacentes – Incidência no topo da torre ou no meio do vão

5.4.1 Injeção de corrente no topo da torre

Na Figura 5.12 são apresentadas as formas de onda da tensão ao longo do cabo para-rios em função do valor do raio de corona. Nota-se que, com a inserção das torres adjacentes nas simulações os resultados se tornaram um pouco mais oscilatórios.

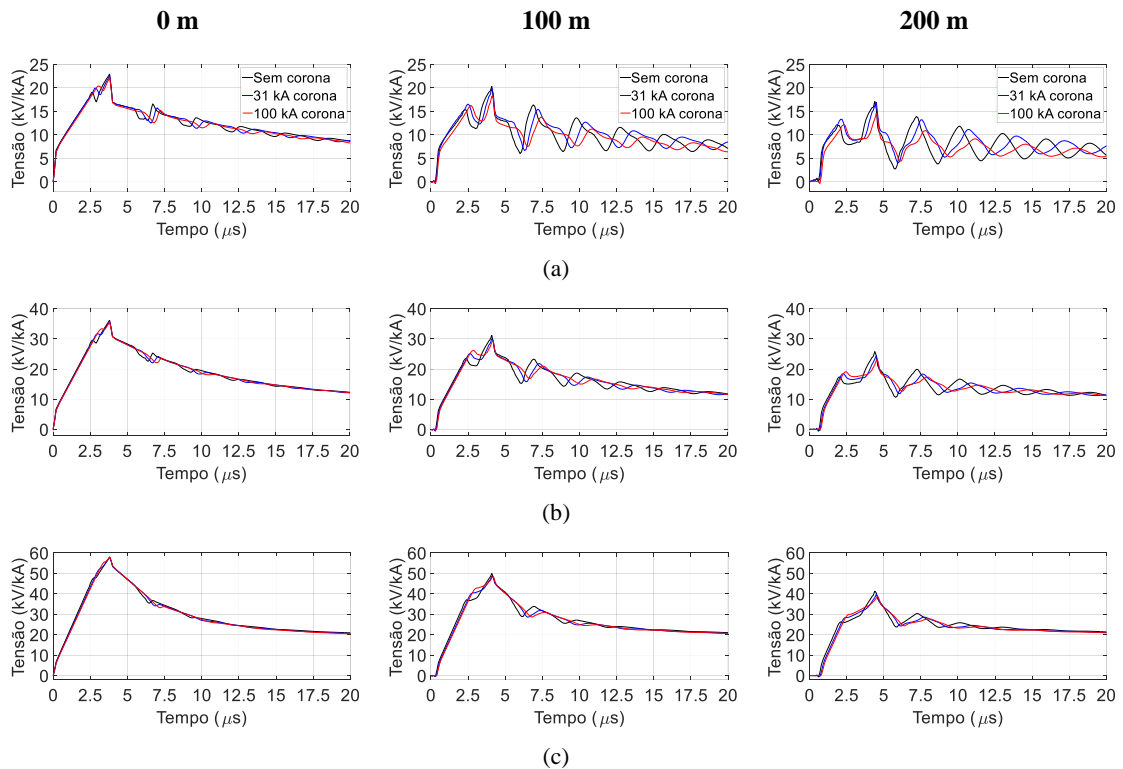


Figura 5.12 - Tensões ao longo do cabo para-rios para configuração com torres adjacentes. Injeção no topo da torre. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão no ponto de incidência; coluna central: tensão a 100m do ponto de incidência; coluna da direita: tensão a 200m do ponto de incidência. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

É possível perceber o atraso das ondas nos casos em que há efeito corona em relação ao caso sem corona. Em todos os gráficos, a tensão máxima sempre ocorre no caso sem corona, seguido do caso de corona relativo a 31 kA e por último o caso de corona relativo a 100 kA (com exceção da tensão no topo da torre para a impedância impulsiva de 80Ω , onde o caso de corona relativo a 100 kA apresenta um valor máximo maior do que o caso de corona relativo a 31 kA, mas com uma diferença de apenas 0,12%).

A tensão no topo da torre não varia muito na forma de onda e nem nos valores máximos. Ao longo do cabo para-raios, para a impedância impulsiva de 20Ω , é perceptível a influência do aterramento das torres adjacentes nas oscilações observadas ao longo da forma de onda. Nos casos com corona, há uma diminuição no valor de pico em relação ao caso sem corona. Também é possível perceber que quanto maior o valor do raio de corona, maior é o atraso em relação às ondas sem o efeito corona. Além disso, observa-se uma redução na amplitude das oscilações com o aumento do valor de Z_p .

As tensões na estrutura superior, na fase superior e na cadeia de isoladores superior também foram determinadas e são apresentadas na Figura 5.13.

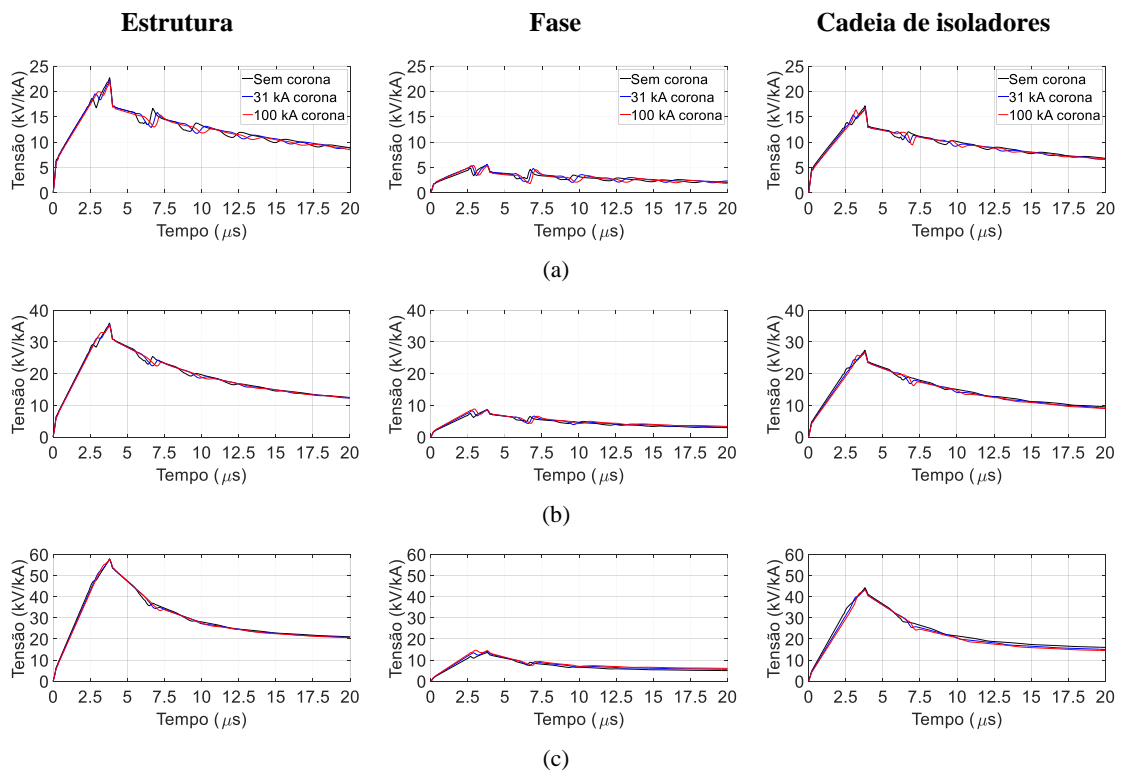


Figura 5.13 - Tensões na estrutura, fase e cadeia de isoladores superior para configuração com torres adjacentes. Injeção no topo da torre. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão na estrutura superior; coluna central: tensão na fase superior; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

De forma geral, os resultados foram muito semelhantes nos casos sem e com corona. Os valores máximos de tensão estão dispostos na Tabela 5.7. Nas simulações com corona as tensões máximas na estrutura foram um pouco menores, as tensões na fase aumentaram um pouco (devido ao maior acoplamento entre cabo para-raios e fase), resultando na redução das tensões na cadeia de isoladores.

Os valores de tensão na estrutura praticamente não se modificaram, obtendo uma variação máxima de 3% de redução no caso referente ao corona de 100 kA para um Z_p de 20 Ω . Na fase, houve um aumento no valor máximo da tensão para os casos de Z_p igual a 40 Ω (aumento de 2,9% para o caso de corona referente a 100 kA) e 80 Ω (aumento de 7,4% para o caso de corona referente a 100 kA). Para Z_p igual a 20 Ω , a tensão na fase não se alterou significativamente, variando entre 1,8% e -1,9% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente. Na cadeia de isoladores, a redução no valor da tensão máxima para Z_p igual a 20 Ω foi de 2,6% e 3,4% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente, para Z_p igual a 40 Ω a redução foi de 1,8% e 2,4% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente, e para Z_p igual a 80 Ω a redução foi de 1,6% e 2% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente.

Tabela 5.7 - Valores máximos de tensão na estrutura, na fase e na cadeia superior – injeção de corrente no topo da torre

Z_p (Ω)	Local	Tensão (kV/kA)		
		Sem corona	Corona relativo a 31 kA (1,91 cm)	Corona relativo a 100 kA (4,63 cm)
20	Estrutura	22,72	22,39 (-1,5%)	22,03 (-3,0%)
	Fase	5,53	5,64 (1,8%)	5,43 (-1,9%)
	Cadeia de isoladores	17,19	16,75 (-2,6%)	16,61 (-3,4%)
Z_p (Ω)	Local	Sem corona	Corona relativo a 31 kA (2,64 cm)	Corona relativo a 100 kA (6,84 cm)
40	Estrutura	36,03	35,72 (-0,8%)	35,52 (-1,4%)
	Fase	8,58	8,76 (2,2%)	8,83 (2,9%)
	Cadeia de isoladores	27,45	26,96 (-1,8%)	26,80 (-2,4%)
Z_p (Ω)	Local	Sem corona	Corona relativo a 31 kA (3,8 cm)	Corona relativo a 100 kA (10,68 cm)
80	Estrutura	57,98	57,87 (-0,2%)	57,96 (-0,04%)
	Fase	13,67	14,26 (4,4%)	14,67 (7,4%)
	Cadeia de isoladores	44,31	43,60 (-1,6%)	43,41 (-2,0%)

Em parênteses: variação em relação ao caso sem corona.

As correntes que descem pela torre também foram calculadas. Na Figura 5.14 estão dispostas as formas de onda de corrente e os valores de pico estão apresentados na Tabela 5.8.

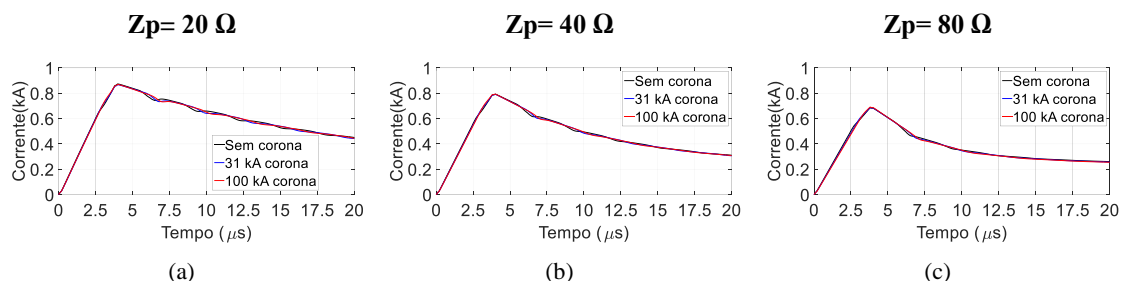


Figura 5.14 - Corrente na torre para injeção no topo da torre na configuração com torres adjacentes. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$ e (c) $Z_p= 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

Tabela 5.8 - Valores máximos de corrente na torre para configuração com torres adjacentes – injeção de corrente no topo da torre

$Z_p (\Omega)$	Corrente (kA)			
	Sem corona	Corona relativo a 31 kA		Corona relativo a 100 kA
20	0,87	0,87	(-0,65%)	0,87 (-0,38%)
40	0,79	0,79	(-0,14%)	0,79 (0,11%)
80	0,69	0,69	(0,21%)	0,69 (0,80%)

Em parênteses, variação em relação ao caso sem corona

Nota-se poucas variações na onda e seus valores máximos atingidos praticamente não sofreram modificações.

Com base nas sobretensões calculadas, procede-se à avaliação de desempenho da linha. Na Tabela 5.9 estão dispostos os valores de corrente crítica e percentual de *backflashover* para os casos sem corona, com corona referente a 31 kA e com corona referente a 100 kA. A representação do corona levou a uma pequena diminuição no percentual de *backflashover*, onde a variação máxima foi a redução de 2,06% no percentual de *backflashover* para o corona relativo a uma corrente de 100 kA no caso em que Z_p é igual a 40 Ω . Nos demais casos, essa redução foi de 1% a 1,7%.

Tabela 5.9 - Valores de corrente crítica e de percentual de *backflashover* para configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no topo da torre

Zp (Ω)	Caso	Ic (kA)	%I > Ic (IEEE)	Δ %I > Ic
20	Sem corona	53,67	19,36	
	Corona relativo a 31 kA (1,91 cm)	54,02	19,09	-1,36%
	Corona relativo a 100 kA (4,63cm)	54,07	19,06	-1,55%
40	Sem corona	32,53	46,87	-
	Corona relativo a 31 kA (2,64 cm)	32,82	46,30	-1,23%
	Corona relativo a 100 kA (6,84 cm)	33,02	45,91	-2,06%
80	Sem corona	20,18	75,33	-
	Corona relativo a 31 kA (3,8 cm)	20,51	74,54	-1,05%
	Corona relativo a 100 kA (10,68 cm)	20,71	74,05	-1,69%

Considerando os resultados apresentados na Tabela 5.9, é importante destacar alguns pontos. Para o caso de Zp igual a 20 Ω, nota-se um valor de corrente crítica de 53,67 kA. Ou seja, esse resultado indica que correntes com valor de pico igual ou superior a 53,67 kA resultam em *backflashover* na cadeia de isoladores. Quando se considera a injeção de uma corrente de 31 kA, esta não causa disrupção na cadeia de isoladores para esse valor de Zp. Mesmo ao se considerar a representação do corona por toda a extensão do cabo para-raios com raio relativo a esta corrente de 31 kA, obtém-se um valor de corrente crítica ainda superior a 31 kA (no caso, 54,02 kA, valor 0,65% superior àquele referente ao caso sem corona). Apesar do aumento da corrente crítica indicar uma ligeira melhora no desempenho da linha, como 31 kA não resulta em *backflashover* na cadeia de isoladores, o efeito corona para esse valor de corrente não modifica o desempenho da linha. O mesmo raciocínio pode ser aplicado para o caso de Zp igual a 40 Ω.

Análise similar pode ser feita considerando o resultado para a representação de corona relativa a 100 kA. Para os 3 valores de impedância impulsiva de aterramento simulados, os casos sem corona indicam correntes críticas inferiores a 100 kA, sendo 53,67 kA, 32,63 kA e 20,18 kA para 20, 40 e 80 Ω, respectivamente. A consideração de um raio de corona relativo à corrente de 100 kA denota um pequeno aumento nos valores

de corrente crítica, de 0,7% a 2,6%. Esse aumento indica uma melhora de desempenho quando tais raios de corona são representados. No entanto, por serem valores de corrente crítica ainda inferiores a 100 kA, o resultado mostra que a representação de tal corona por toda a extensão do cabo para-raios não contribui efetivamente para a melhoria do desempenho da linha. Uma corrente de 100 kA, sem ou com efeito corona continuaria a resultar em *backflashover* na cadeia de isoladores.

5.4.2 Injeção de corrente no meio do vão

Na Figura 5.15 são apresentadas as formas de onda da tensão no ponto de incidência no cabo para-raios (200 m), a 100 m do ponto de incidência (100 m) e no topo da torre (0 m). A presença das torres adjacentes faz com que as ondas que se propagam no cabo para-raios desçam para essas torres e sofram reflexão em seu aterramento. Desta forma, as ondas possuem características mais oscilatórias em relação às simulações sem torres adjacentes. A representação do efeito corona causa uma redução do nível das oscilações. Ao longo do cabo para-raios, além da diminuição do valor de pico, as ondas dos casos com corona apresentam um formato mais distorcido e atenuado, além de um atraso em relação ao caso sem corona. Quanto maior o raio de corona, maior é o atraso das ondas de tensão em relação ao caso sem corona.

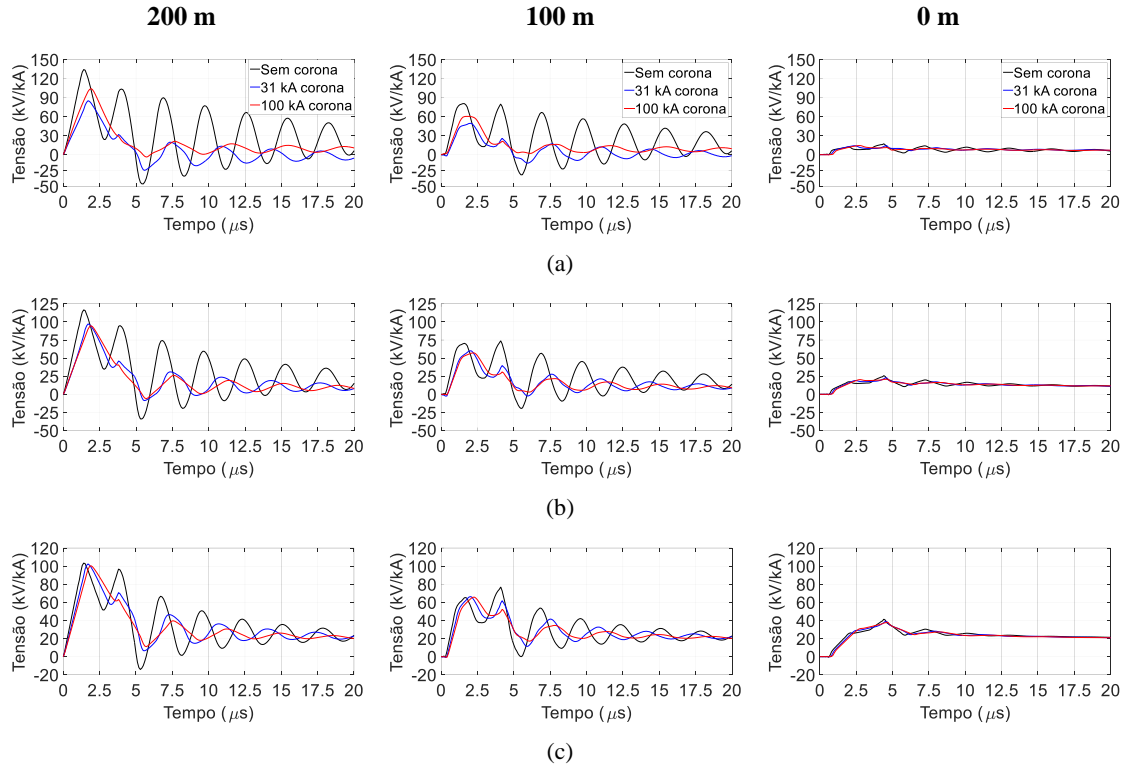


Figura 5.15 - Tensões ao longo do cabo para-ramos para configuração com torres adjacentes. Injeção no meio do vão. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão no ponto de incidência; coluna central: tensão a 100m do ponto de incidência; coluna da direita: tensão no topo da torre. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I = 31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

As tensões na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior também foram observadas e estão apresentadas na Figura 5.16, os valores máximos estão dispostos na Tabela 5.10. Nas formas de onda é possível perceber muitas oscilações advindas das reflexões nas torres adjacentes. Essas oscilações são mais severas em comparação à injeção de corrente no topo da torre devido ao tempo de trânsito requerido para as ondas chegarem na torre.

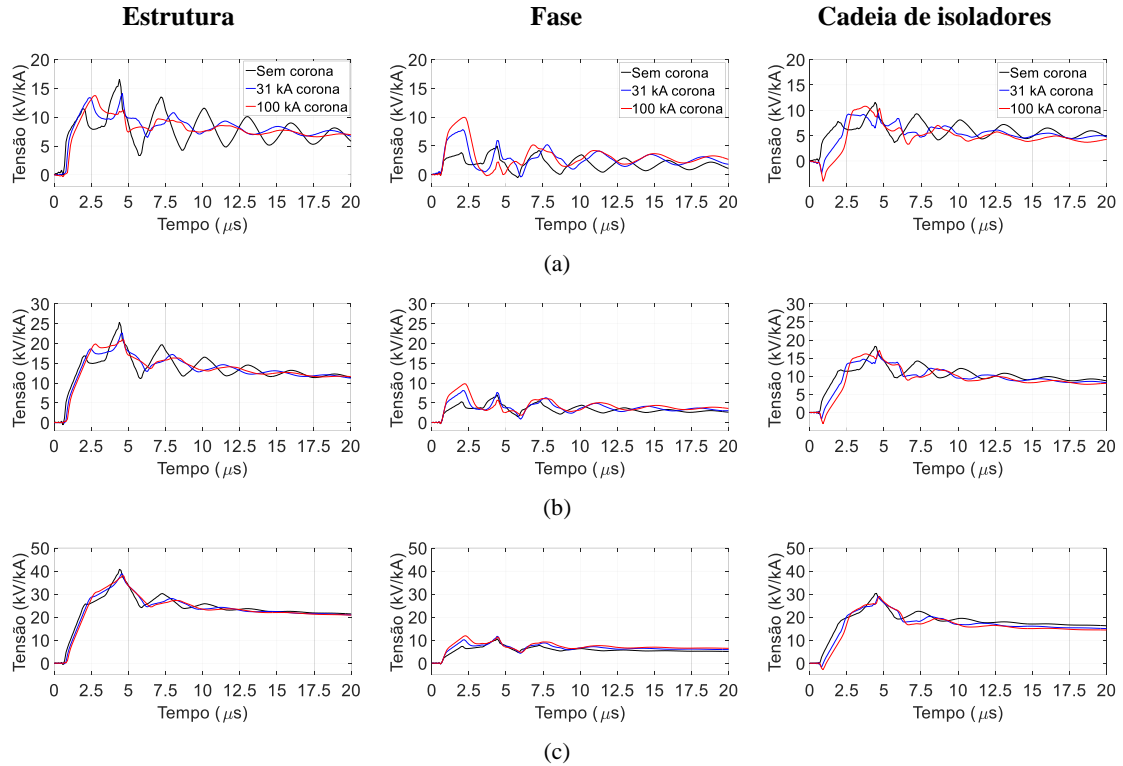


Figura 5.16 - Tensões na estrutura, fase e cadeia de isoladores superior para configuração com torres adjacentes. Injeção no meio do vão. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$, (c) $Z_p= 80 \Omega$. Coluna da esquerda: Tensão na estrutura superior; coluna central: tensão na fase superior; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

A tensão na estrutura varia bastante de acordo com cada caso, as formas de onda dos casos com corona são muito semelhantes, porém um pouco mais distorcidas e atenuadas em comparação ao caso sem corona. A redução no valor máximo de tensão na estrutura foi de 14,9% e 17,2% para os raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA, respectivamente, no caso de Z_p igual a 20Ω . Para Z_p igual a 40Ω , essa redução foi de 10,7% e 17,2% e para Z_p igual a 80Ω essa redução foi de 5% e 6,8% para os raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA, respectivamente.

Tabela 5.10 - Valores máximos de tensão na estrutura, na fase e na cadeia superior para configuração com torres adjacentes – injeção de corrente no meio de vão

Zp (Ω)	Local	Tensão (kV/kA)		
		Sem corona	Corona relativo a 31 kA (7,76 cm)	Corona relativo a 100 kA (27,86 cm)
20	Estrutura	16,59	14,12 (-14,9%)	13,74 (-17,2%)
	Fase	5,03	7,85 (56,2%)	9,99 (98,6%)
	Cadeia de isoladores	11,56	9,54 (-17,5%)	10,80 (-6,6%)
Zp (Ω)	Local	Sem corona	Corona relativo a 31 kA (6,83 cm)	Corona relativo a 100 kA (23,20 cm)
40	Estrutura	25,34	22,63 (-10,7%)	20,97 (-17,2%)
	Fase	7,06	8,12 (15,0%)	9,82 (39,1%)
	Cadeia de isoladores	18,28	16,77 (-8,3%)	17,17 (-6,0%)
Zp (Ω)	Local	Sem corona	Corona relativo a 31 kA (6,13 cm)	Corona relativo a 100 kA (20,01 cm)
80	Estrutura	40,80	38,76 (-5,0%)	38,02 (-6,8%)
	Fase	10,66	11,72 (9,9%)	11,92 (11,9%)
	Cadeia de isoladores	30,33	29,02 (-4,3%)	29,03 (-4,3%)

Em parênteses: variação em relação ao caso sem corona.

A tensão na fase aumentou consideravelmente com o efeito corona: o valor de pico para Zp igual a 20 Ω aumentou 56,2% no corona relativo a 31 kA e 98,6% no corona relativo a 100 kA. Isso se repetiu para os demais valores de Zp, com um aumento um pouco menor: 15% no corona relativo a 31 kA e 39% no corona relativo a 100 kA, para Zp igual a 40 Ω, 9,9% no corona relativo a 31 kA e 11,9% no corona relativo a 100 kA, para Zp igual a 80 Ω. Conseqüentemente, houve uma diminuição na tensão máxima na cadeia de isoladores superior. Para Zp igual a 20 Ω, essa diminuição foi de 17,5% para o corona relativo a 31 kA e de 6,6% para o corona relativo a 100 kA. Para Zp igual a 40 Ω a diminuição foi de 8,3% para o corona relativo a 31 kA e de 6% para o corona relativo a 100 kA e, finalmente, para Zp igual a 80 Ω a diminuição foi de 4,3% para ambos os casos com corona. É importante notar que o corona relativo à corrente de 31 kA obteve uma maior diminuição no valor de tensão máxima em comparação ao corona relativo a 100 kA. As reflexões causadas pelas torres adjacentes somam-se aos efeitos de distorção e atraso na onda causados pelo corona, o que resulta em ondas mais deformadas. O resultado do corona relativo a 100 kA foi pior do que o caso do corona relativo a 31 kA (o valor da tensão na cadeia de isoladores foi maior no caso de 100 kA) devido à soma desses efeitos.

As correntes que descem a torre também foram calculadas e estão apresentadas na Figura 5.17. Os valores máximos de corrente estão dispostos na Tabela 5.11.

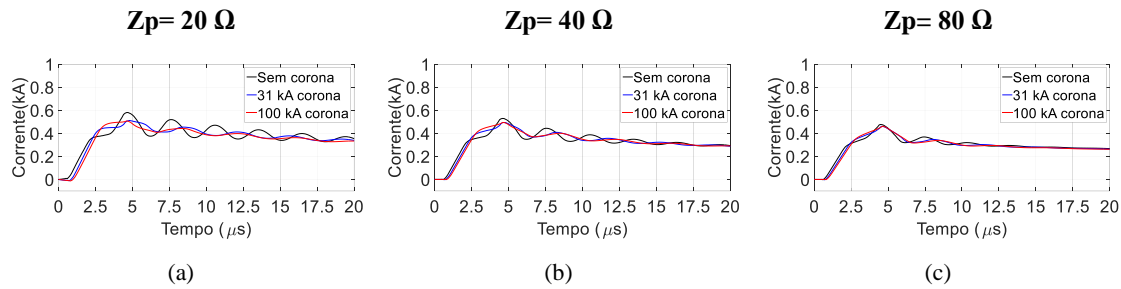


Figura 5.17 - Corrente na torre para injeção no meio do vão na configuração com torres adjacentes. (a) $Z_p= 20 \Omega$, (b) $Z_p= 40 \Omega$ e (c) $Z_p= 80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em azul: raio de corona relativo a $I=31 \text{ kA}$; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I = 100 \text{ kA}$

Nota-se que, sem corona, a onda é mais oscilatória. Com corona, as ondas são atrasadas e distorcidas, o que faz com que estas fiquem um pouco menos oscilatórias em relação ao caso sem corona. Os casos com corona apresentaram praticamente a mesma forma de onda, com os valores máximos muito próximos (diferença na terceira casa decimal). A diminuição do valor máximo de corrente nos casos com corona foi de aproximadamente 12% para Z_p igual a 20Ω , 6,6% para Z_p igual a 40 e 3,4% para Z_p igual a 80.

Tabela 5.11 - Valores máximos de corrente na torre para configuração com torres adjacentes – injeção de corrente no meio do vão

$Z_p (\Omega)$	Corrente (kA)			
	Sem corona	Corona relativo a 31 kA		Corona relativo a 100 kA
20	0,58	0,51	(-11,88%)	0,51 (-12,65%)
40	0,53	0,49	(-6,70%)	0,49 (-6,62%)
80	0,48	0,46	(-3,35%)	0,46 (-3,43%)

Em parênteses, variação em relação ao caso sem corona

O desempenho da linha frente a descargas atmosféricas também foi avaliado. Na Tabela 5.12 estão dispostos os valores de corrente crítica e percentual de *backflashover* dos casos sem corona, com corona referente a 31 kA e com corona referente a 100 kA.

Tabela 5.12 - Valores de corrente crítica e de percentual de *backflashover* para configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão

Zp (Ω)	Caso	Ic (kA)	%I > Ic (IEEE)	Δ %I > Ic
20	Sem corona	85,03	6,76	
	Corona relativo a 31 kA (7,76 cm)	90,41	5,83	-13,89%
	Corona relativo a 100 kA (27,86 cm)	88,00	6,22	-8,01%
40	Sem corona	51,13	21,40	-
	Corona relativo a 31 kA (6,83 cm)	52,18	20,52	-4,09%
	Corona relativo a 100 kA (23,20 cm)	51,32	21,24	-0,76%
80	Sem corona	29,43	53,37	-
	Corona relativo a 31 kA (6,13 cm)	30,43	51,21	-4,06%
	Corona relativo a 100 kA (20,01 cm)	30,69	50,65	-5,10%

Em todos os casos, a representação do efeito corona resultou em melhoria do desempenho da linha com aumento do valor de corrente crítica e redução do percentual de *backflashover*. A representação do corona relativo a 31 kA levou à redução do percentual de *backflashover* da ordem de 14%, 4% e 4% para valores de Zp de 20 Ω , 40 Ω e 80 Ω , respectivamente. Já a representação do corona relativo a 100 kA (portanto, maior raio), resultou em reduções de 8%, 1% e 5% para Zp de 20 Ω , 40 Ω e 80 Ω , respectivamente. Nota-se, a partir desses resultados, que não houve um comportamento linear do desempenho com o raio do corona. Tal fato pode estar relacionado com os atrasos e oscilações presentes nas ondas de tensão resultantes na cadeia de isoladores.

Considerando os resultados apresentados na Tabela 5.12, da mesma forma que observado nos casos de injeção de corrente no topo da torre, é importante destacar alguns pontos. No caso de Zp igual a 20 Ω , nota-se um valor de corrente crítica de 85,03 kA. Ou seja, correntes com valor de pico igual ou superior a 85,03 kA resultam em *backflashover* na cadeia de isoladores. Quando se considera a injeção de uma corrente de 31 kA, esta não causa disrupção elétrica na cadeia de isoladores. Mesmo ao se considerar a representação do corona por toda a extensão do cabo para-raios com raio relativo a esta corrente de 31 kA, obtém-se um valor de corrente crítica ainda superior a 31 kA (no caso,

90,01 kA, valor 6,13% superior àquele referente ao caso sem corona). Apesar do aumento da corrente crítica aparentemente indicar uma ligeira melhora no desempenho da linha, como 31 kA não resulta em *backflashover* na cadeia de isoladores, o efeito corona para esse valor de corrente não modifica o desempenho da linha. O mesmo raciocínio pode ser aplicado para o caso de Z_p igual a 40Ω no caso da corrente de 31 kA.

Análise similar pode ser feita considerando o resultado para a representação de corona relativo a 100 kA. Para os 3 valores de impedância impulsiva de aterramento simulados, os casos sem corona indicam correntes críticas inferiores a 100 kA, sendo 85,03 kA, 51,13 kA e 29,43 kA para 20Ω , 40Ω e 80Ω , respectivamente. A consideração do raio de corona relativo à corrente de 100 kA denota um pequeno aumento nos valores de corrente crítica, de 0,4% a 4,3%. Esse aumento indica uma melhora de desempenho quando tais raios de corona são representados. No entanto, por serem valores de corrente crítica ainda inferiores a 100 kA, o resultado mostra que a representação de tal corona por toda a extensão do cabo para-raios não contribui efetivamente para a melhoria do desempenho da linha. Uma corrente de 100 kA, sem ou com efeito corona continuaria a resultar em *backflashover* na cadeia de isoladores.

5.4.3 Resultados para a fase e cadeia de isoladores inferior - Injeção de corrente no meio do vão

Nesta seção, as tensões na fase e na cadeia de isoladores inferior são comparadas com as tensões na fase e na cadeia de isoladores superior para a configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão. Na Figura 5.18, Figura 5.19 e Figura 5.20 estão apresentadas as formas de onda para a fase e cadeia de isoladores inferior e superior nos casos sem corona e com raios de corona referentes a 31 kA e 100 kA.

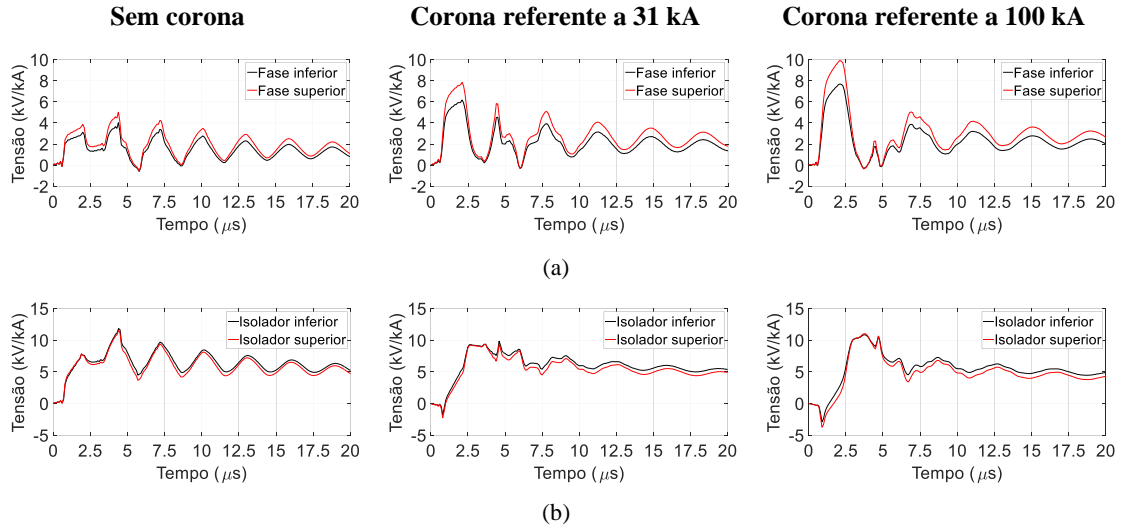


Figura 5.18 - Tensões na fase e cadeia de isoladores inferior e superior para Z_p igual a 20Ω . Injeção no meio do vão. (a) Tensões na fase, (b) Tensões na cadeia de isoladores. Coluna da esquerda: casos sem corona; coluna central: casos com corona referente a 31 kA; coluna da direita: casos com corona referente a 100 kA

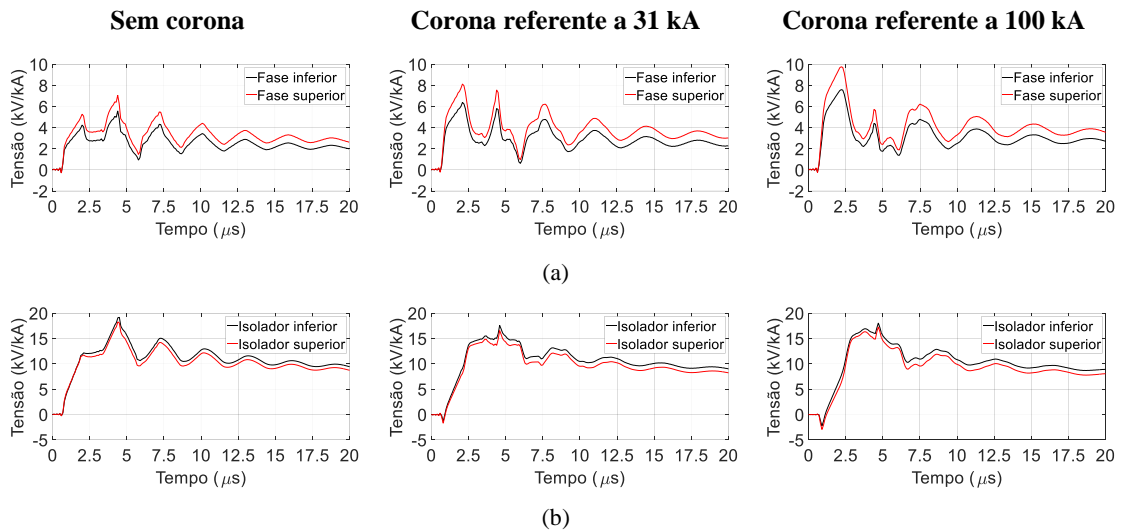


Figura 5.19 - Tensões na fase e cadeia de isoladores inferior e superior para Z_p igual a 40Ω . Injeção no meio do vão. (a) Tensões na fase, (b) Tensões na cadeia de isoladores. Coluna da esquerda: casos sem corona; coluna central: casos com corona referente a 31 kA; coluna da direita: casos com corona referente a 100 kA

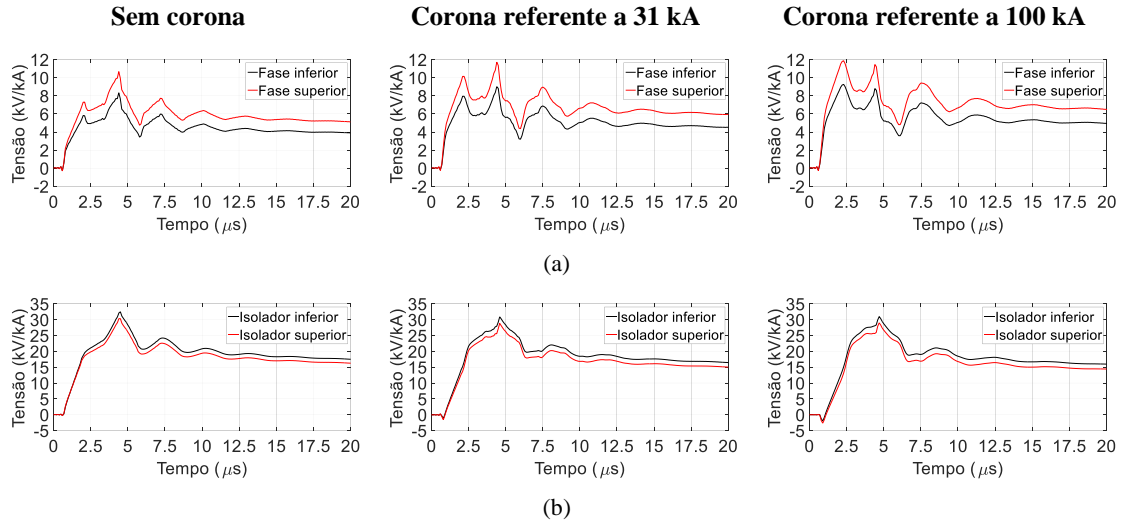


Figura 5.20 - Tensões na fase e cadeia de isoladores inferior e superior para Z_p igual a 80Ω . Injeção no meio do vão. (a) Tensões na fase, (b) Tensões na cadeia de isoladores. Coluna da esquerda: casos sem corona; coluna central: casos com corona referente a 31 kA; coluna da direita: casos com corona referente a 100 kA

Comparando-se as ondas de tensão na fase inferior e superior, nota-se que em todos os casos, sem e com corona, a fase superior apresenta maiores valores máximos devido à maior proximidade ao cabo para-raios e, conseqüentemente, a um maior acoplamento entre esses cabos. O cabo para-raios está a 30 metros de altura, a fase superior se encontra a 25,32 m de altura e a fase inferior se encontra a 21,6 metros de altura.

Considerando-se as tensões na cadeia de isoladores, as formas de onda são muito semelhantes, tanto no caso sem corona quanto nos casos com corona. Porém, as tensões são maiores na cadeia de isoladores inferior. Isto porque, considerando-se aproximadamente o mesmo valor de tensão na estrutura, como a tensão na fase superior é maior e a tensão na cadeia de isoladores é dada pela diferença entre a tensão na estrutura e a tensão na fase, o resultado da tensão na cadeia de isoladores inferior apresenta valores máximos maiores em comparação à cadeia de isoladores superior. Os valores máximos estão apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Valores máximos de tensão na fase e na cadeia inferior e superior – injeção de corrente no meio de vão

Zp (Ω)	Local	Tensão (kV/kA)					
		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
		Sem corona		Corona relativo a 31 kA (7,76 cm)		Corona relativo a 100 kA (27,86 cm)	
20	Fase	4,03	5,03	6,18	7,85	7,68	9,99
	Cadeia de isoladores	11,83	11,56	9,85	9,54	10,84	10,80
Zp (Ω)	Local	Sem corona		Corona relativo a 31 kA (6,83 cm)		Corona relativo a 100 kA (23,20 cm)	
40	Fase	5,59	7,06	6,39	8,12	7,60	9,82
	Cadeia de isoladores	19,16	18,28	17,59	16,77	18,06	17,17
Zp (Ω)	Local	Sem corona		Corona relativo a 31 kA (6,13 cm)		Corona relativo a 100 kA (20,01 cm)	
80	Fase	8,34	10,66	9,01	11,72	9,26	11,92
	Cadeia de isoladores	32,48	30,33	30,88	29,02	30,98	29,03

Em parênteses: variação em relação ao caso sem corona.

As tensões máximas na fase inferior foram aproximadamente 20%, 21% e 23% menores que as tensões máximas na fase superior, nos casos sem corona, com corona relativo a 31 kA e com corona relativo a 100 kA, respectivamente, para os valores simulados de impedância impulsiva. Já a tensão na cadeia de isoladores inferior apresentou valores máximos cerca de 2,8%, 5% e 7% maiores em relação aos resultados obtidos para a cadeia de isoladores superior nos casos sem corona e com raios de corona relativos a 31 kA e 100 kA, respectivamente, para todos os valores de Zp. Apenas no caso de Zp igual a 80 Ω, o aumento de tensão cadeia de isoladores inferior foi de apenas 0,4% para o caso de corona referente a 100 kA.

O desempenho da linha frente a descargas atmosféricas também foi avaliado para a cadeia de isoladores inferior. Na Tabela 5.14 estão dispostos os valores de corrente crítica e percentual de *backflashover* dos casos sem corona, com corona referente a 31 kA e com corona referente a 100 kA. O desempenho da linha melhora para os casos que consideram a representação do efeito corona. Para Zp igual a 20 Ω, a redução do percentual de *backflashover* foi de 11,7% e 10,46% para os raios de corona referente a 31 kA e 100 kA, respectivamente. Para Zp igual a 40 Ω a redução foi de 2,9% e 1,14%, respectivamente. Considerando Zp igual a 80 Ω, foram obtidas reduções de 2,73% e 3,52% para os raios de corona de 31 kA e 100 kA, respectivamente. Apesar de ocorrer uma melhora de desempenho para todos os valores de Zp, esta foi discreta.

Tabela 5.14 – Valores de corrente crítica e de percentual de *backflashover* para a cadeia de isoladores inferior - configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão

Z _p (Ω)	Caso	I _c (kA)	%I > I _c (IEEE)	Δ %I > I _c
20	Sem corona	80,89	7,63	
	Corona relativo a 31 kA (7,76 cm)	85,17	6,74	-11,70%
	Corona relativo a 100 kA (27,86 cm)	84,68	6,83	-10,46%
40	Sem corona	47,82	24,47	-
	Corona relativo a 31 kA (6,83 cm)	48,54	23,76	-2,91%
	Corona relativo a 100 kA (23,20 cm)	48,10	24,19	-1,14%
80	Sem corona	27,41	57,93	-
	Corona relativo a 31 kA (6,13 cm)	28,10	56,35	-2,73%
	Corona relativo a 100 kA (20,01 cm)	28,30	55,90	-3,52%

5.4.4 Representação do efeito corona associado às correntes críticas

Conforme observado nas seções anteriores, o efeito corona foi mais importante quando se injetou a corrente no meio do vão em relação à injeção no topo da torre. Nesta seção são apresentados resultados referentes ao raio de corona calculado ao se considerar o valor de corrente crítica obtido nas simulações sem corona para a injeção de corrente no meio do vão. É avaliado se o corona relativo a essa corrente crítica resulta em melhora ou piora no desempenho da linha. Os resultados de corrente crítica e dos valores de raio de corona referentes a estas correntes estão apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Valores de corrente crítica para simulação sem corona e os raios de corona correspondentes para configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão

Z _p (Ω)	I _c (kA)	Raio de corona (cm)
20	85,03	22,59 (56,5 x)
40	51,13	10,94 (27,4 x)
80	29,43	5,79 (14,5 x)

Em parênteses: quantidade de vezes que o raio de corona é maior que o raio original do cabo para-raios

Para cada corrente crítica apresentada na Tabela 5.15, foi calculado o raio de corona correspondente que também está apresentado na tabela. Foram realizadas

simulações utilizando os raios de corona calculados e, para cada simulação, determinou-se a tensão na cadeia de isoladores e, para esta condição, recalculou-se a corrente crítica associada. Os resultados das sobretensões na cadeia de isoladores são apresentados na Figura 5.21 e na Tabela 5.16.

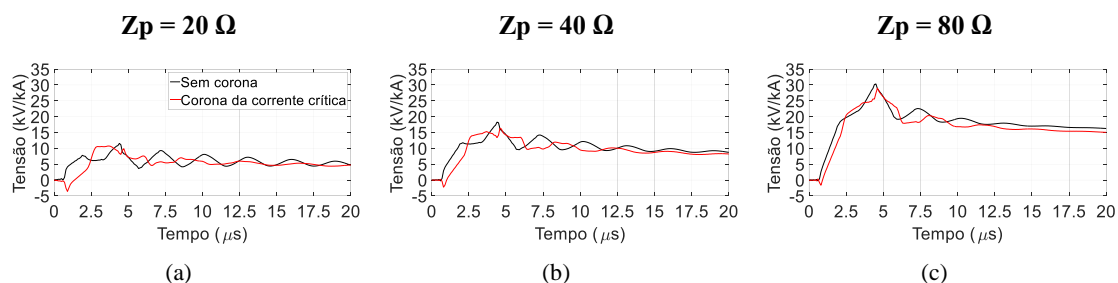


Figura 5.21 - Tensões na cadeia de isoladores superior para injeção de corrente no meio do vão. (a) $Z_p = 20 \Omega$, (b) $Z_p = 40 \Omega$, (c) $Z_p = 80 \Omega$; coluna da direita: casos com corona referente a 100 kA. Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo à corrente crítica

Tabela 5.16 - Tensões máximas na cadeia de isoladores superior - Injeção de corrente no meio do vão

Z_p (Ω)	Raio de corona da corrente crítica (cm)	Tensão na cadeia de isoladores (kV/kA)	
		Sem corona	Com corona referente à corrente crítica
20	22,59cm	11,56	10,74 (-7,1%)
40	10,94	18,28	16,37 (-10,4%)
80	5,79	30,33	29,02 (-4,3%)

Nota-se que ocorre uma distorção na forma de onda da cadeia de isoladores com corona e que as tensões são ligeiramente menores nos casos com corona relação aos casos sem corona. A redução de tensão máxima na cadeia de isoladores superior foi de 7,1%, 10,54% e 4,3% para as impedâncias impulsivas de 20 Ω , 40 Ω e 80 Ω , respectivamente.

As correntes críticas para as simulações com corona referente às correntes críticas foram calculadas e os resultados estão dispostos na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Valores de corrente crítica e de percentual de *backflashover* para configuração com torres adjacentes e injeção de corrente no meio do vão – casos com o raio de corona referente às correntes críticas

Zp (Ω)	Caso	Ic (kA)	%I > Ic (IEEE)	Δ %I > Ic
20	Sem corona	85,03	6,76	
	Corona referente a 85 kA (22,59 cm)	85,35	6,70	-0,9%
40	Sem corona	51,13	21,40	-
	Corona referente a 51 kA (10,94 cm)	52,25	20,47	-4,4%
80	Sem corona	29,43	53,37	-
	Corona referente a 29 kA (5,79 cm)	30,43	51,21	-4,1%

Para o caso de Zp igual a 20 Ω, a corrente crítica passou de 85,03 kA sem corona para 85,35 kA com o corona referente a 85 kA. O aumento de corrente foi muito pequeno, de apenas 0,4%. Pode-se considerar que isto não afetou o desempenho da linha.

No caso de Zp igual a 40 Ω, a corrente crítica passou de 51,13 kA para 52,25 kA, um aumento de 2,2% na corrente crítica. Isto resultou em uma redução no percentual de *backflashover* de aproximadamente 4,4%

No caso de Zp igual a 80 Ω, a corrente crítica passou de 29,43 kA sem corona para 30,43 kA para o corona referente a uma corrente de 29 kA. O aumento da corrente crítica foi de 3,4%, o que levou uma redução no percentual de *backflashover* de 4,1%.

De forma geral, houve uma pequena melhora no desempenho, mas as variações observadas foram muito pequenas, onde a variação máxima foi a redução de 4,4% no percentual de *backflashover* para o caso de corona relativo à corrente de 51 kA para Zp igual a 40 Ω.

5.4.5 Resultados referentes à representação da dinâmica do efeito

corona: divisão da onda de corrente injetada em parcelas

Foi realizada a divisão em parcelas da onda de corrente injetada para representar o efeito corona, segundo o procedimento descrito na seção 4.5 referente a uma corrente de 100 kA. As simulações foram realizadas com a injeção de corrente no meio do vão para a configuração com torres adjacentes.

Foram observadas as tensões ao longo do cabo para-raios (incidência no meio do vão) e a divisão em parcelas foi comparada com o caso sem corona e com o corona referente a injeção de uma corrente única de 100 kA. Todas as tensões referentes à divisão da corrente injetada em parcelas foram divididas por 1,8 de modo a normalizar os resultados. Os resultados estão apresentados na Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24.

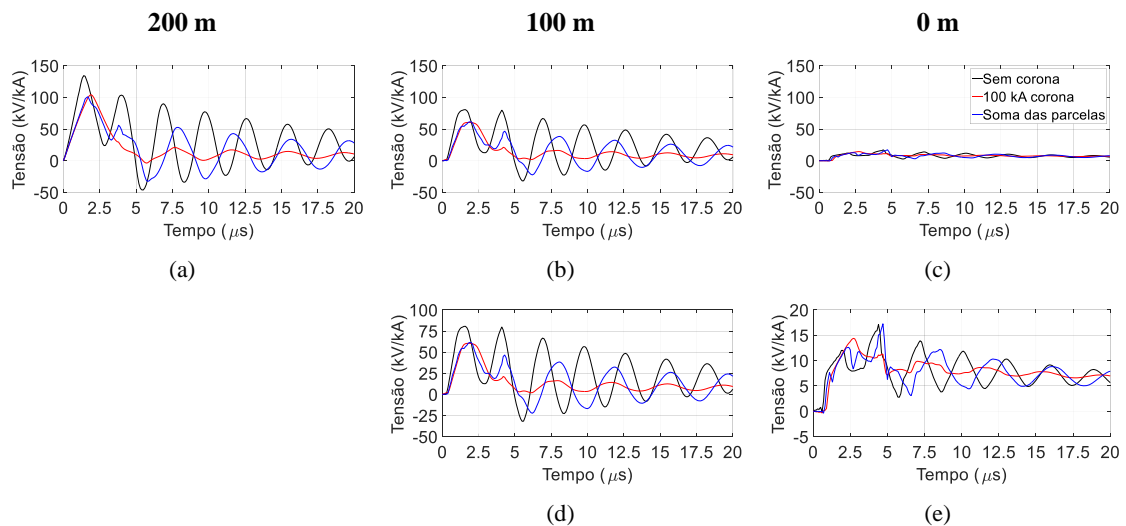


Figura 5.22 - Tensões ao longo do cabo para-raios para $Z_p=20\ \Omega$. Injeção no meio do vão. (a) Tensão no ponto de incidência (200 m), (b) Tensão a 100m do ponto de incidência, (c) tensão no topo da torre, (d) zoom da tensão em (b) e (e) zoom da tensão em (c). Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I=100\ \text{kA}$; curva em azul: soma das parcelas de correntes resultante em corona referente a 100 kA

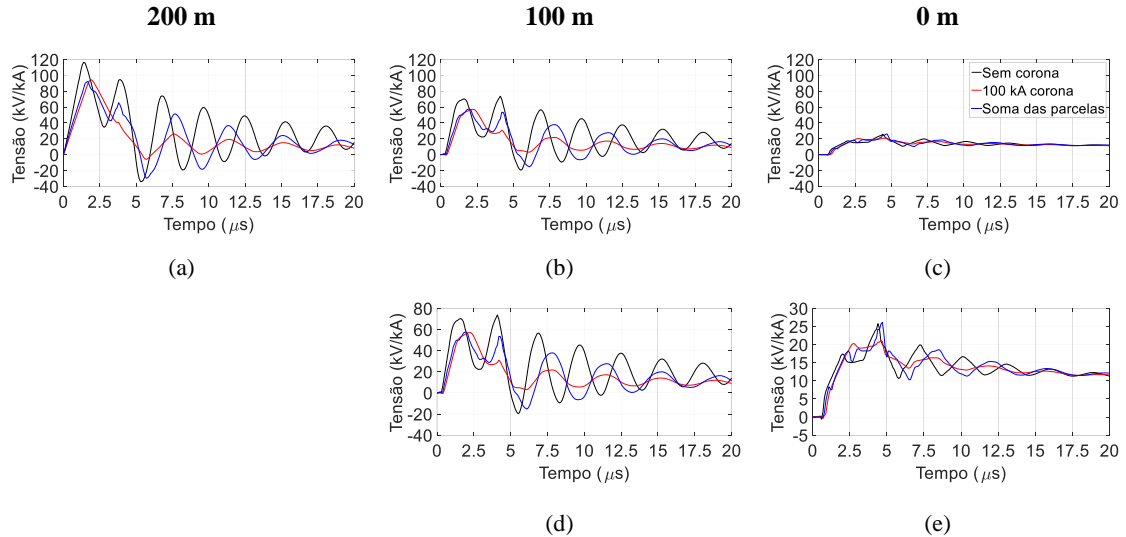


Figura 5.23 - Tensões ao longo do cabo para-raios para $Z_p= 40 \Omega$. Injeção no meio do vão. (a) Tensão no ponto de incidência (200 m), (b) Tensão a 100m do ponto de incidência, (c) tensão no topo da torre, (d) zoom da tensão em (b) e (e) zoom da tensão em (c). Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I=100$ kA; curva em azul: soma das parcelas de correntes resultante em corona referente a 100 kA

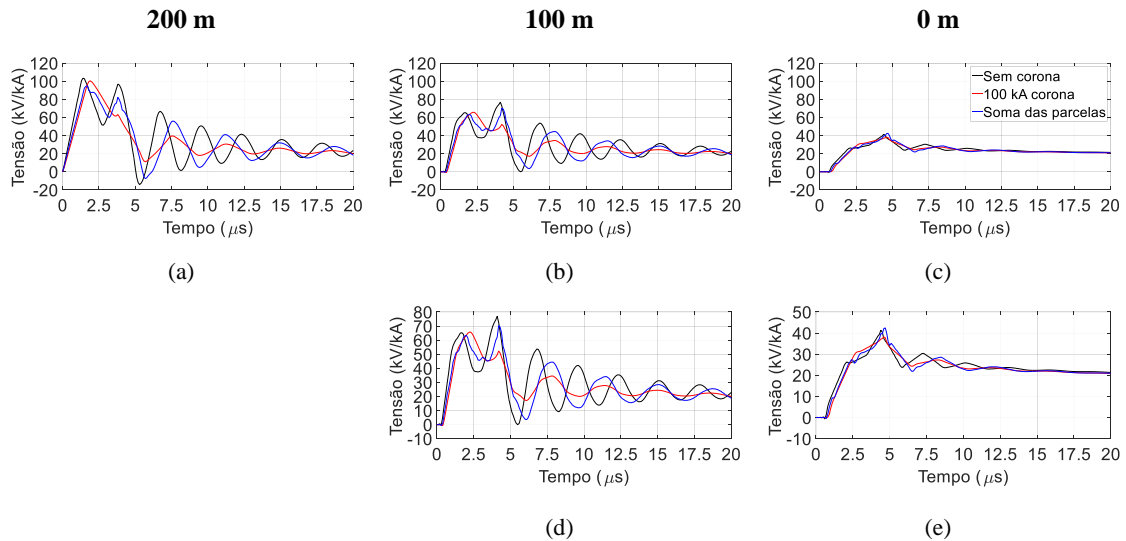


Figura 5.24 - Tensões ao longo do cabo para-raios para $Z_p= 80 \Omega$. Injeção no meio do vão. (a) Tensão no ponto de incidência (200 m), (b) Tensão a 100m do ponto de incidência, (c) tensão no topo da torre, (d) zoom da tensão em (b) e (e) zoom da tensão em (c). Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I=100$ kA; curva em azul: soma das parcelas de correntes resultante em corona referente a 100 kA

Nas figuras apresentadas nota-se que as ondas referentes à soma das parcelas são mais semelhantes ao caso do corona referente a injeção de uma corrente única de 100 kA, apresentando um formato um pouco mais oscilatório. O caso sem corona é o mais oscilatório devido às reflexões nas torres adjacentes, o caso com corona referente a 100 kA (injeção de corrente única) e o caso com a divisão da corrente em parcelas sofrem

atenuação e distorção ao longo do cabo para-raios devido ao efeito corona, o que diminuiu o pico das oscilações ao longo do tempo.

De forma geral, a divisão da corrente em parcelas diminuiu os valores máximos das ondas de tensão ao longo do cabo para-raios (com exceção das tensões no topo da torre em Z_p igual a 40Ω e 80Ω), porém os resultados são muito oscilatórios e distorcidos. Além das tensões ao longo do cabo para-raios, também foram observadas as tensões na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior. Na Figura 5.25, Figura 5.26 e Figura 5.27, além da soma das parcelas, são apresentadas as ondas de cada parcela que somadas formaram o resultado do caso de divisão da corrente injetada.

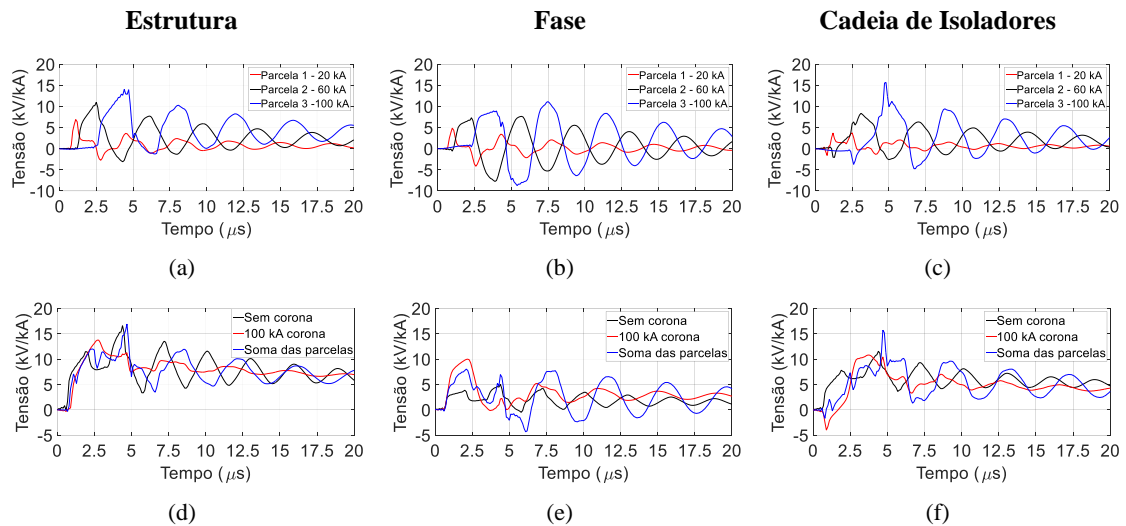


Figura 5.25 - Injeção no meio do vão - $Z_p = 20 \Omega$. 1ª linha: Tensões relacionadas à divisão da corrente em parcelas: (a) Tensão na estrutura (b) tensão na fase (c) tensão na cadeia de isoladores. 2ª linha: comparação da divisão em parcelas em relação aos casos sem corona e com corona relativo à $I = 100 \text{ kA}$ (injeção de corrente única) - (d) Tensão na estrutura (e) tensão na fase (f) tensão na cadeia de isoladores superior

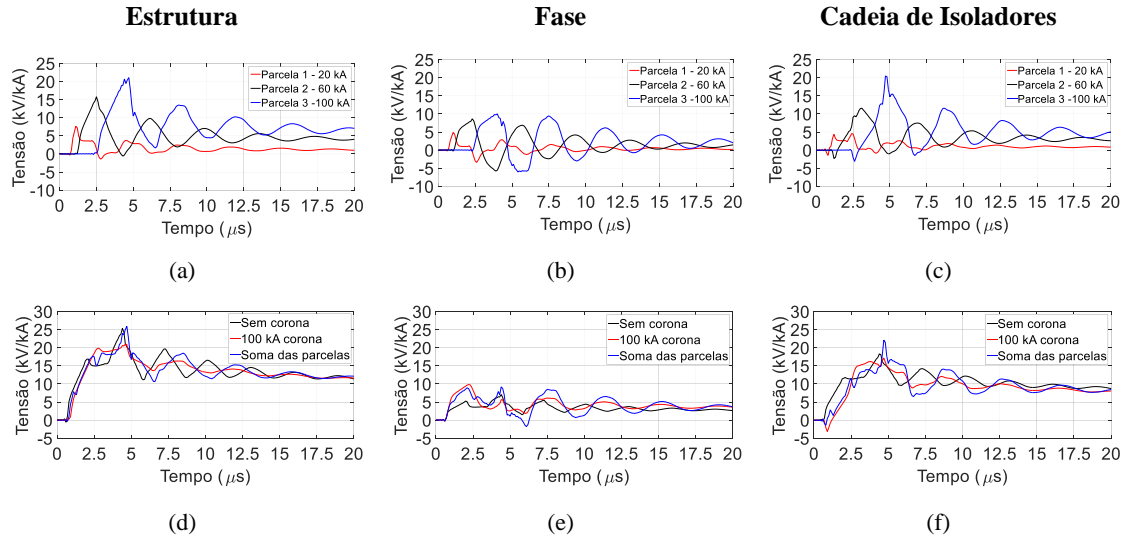


Figura 5.26 - Injeção no meio do vão - $Z_p = 40 \Omega$. 1ª linha: Tensões relacionadas à divisão da corrente em parcelas: (a) Tensão na estrutura (b) tensão na fase (c) tensão na cadeia de isoladores. 2ª linha: comparação da divisão em parcelas em relação aos casos sem corona e com corona relativo à $I = 100 \text{ kA}$ (injeção de corrente única) (d) Tensão na estrutura (e) tensão na fase (f) tensão na cadeia de isoladores superior

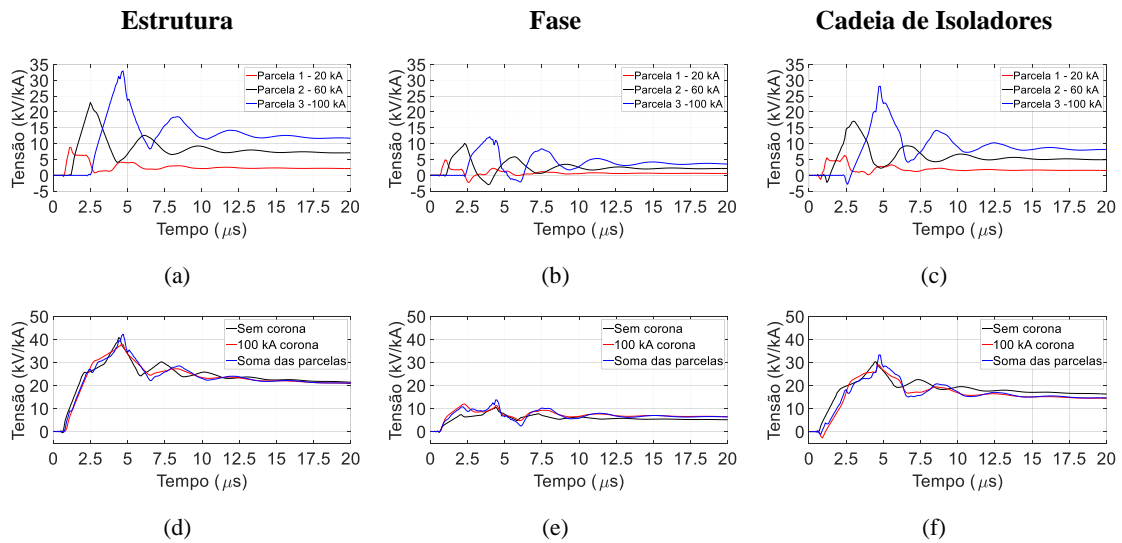


Figura 5.27 - Injeção no meio do vão - $Z_p = 80 \Omega$. 1ª linha: Tensões relacionadas à divisão da corrente em parcelas: (a) Tensão na estrutura (b) tensão na fase (c) tensão na cadeia de isoladores. 2ª linha: comparação da divisão em parcelas em relação aos casos sem corona e com corona relativo à $I = 100 \text{ kA}$ (injeção de corrente única) (d) Tensão na estrutura (e) tensão na fase (f) tensão na cadeia de isoladores superior

Ao analisar as tensões máximas que ocorreram no caso da divisão em parcelas percebe-se que a soma dos efeitos de atenuação, distorção e da reflexão das torres adjacentes em cada uma das parcelas resultou em ondas bem distorcidas e em tensões máximas na cadeia de isoladores maiores que o caso sem corona. O aumento percentual da tensão máxima na cadeia de isoladores foi de 20%, 20,7% e 9,8% para os valores de Z_p de 20Ω , 40Ω e 80Ω , respectivamente. Consequentemente, os valores de tensão

máxima na divisão em parcelas foram maiores que no caso referente à injeção de uma corrente única de 100 kA.

As correntes que descem pela torre também foram analisadas e são apresentadas na Figura 5.28. Na divisão em parcelas, a soma das parcelas de corrente resultou em uma onda oscilatória, inicialmente semelhante com o caso sem corona, apresentando um atraso após um tempo. Os valores máximos não variaram consideravelmente em relação ao caso sem corona, sendo 1,72% menor no caso de Z_p igual a 20 Ω e 2,08% maior no caso de Z_p igual a 80 Ω .

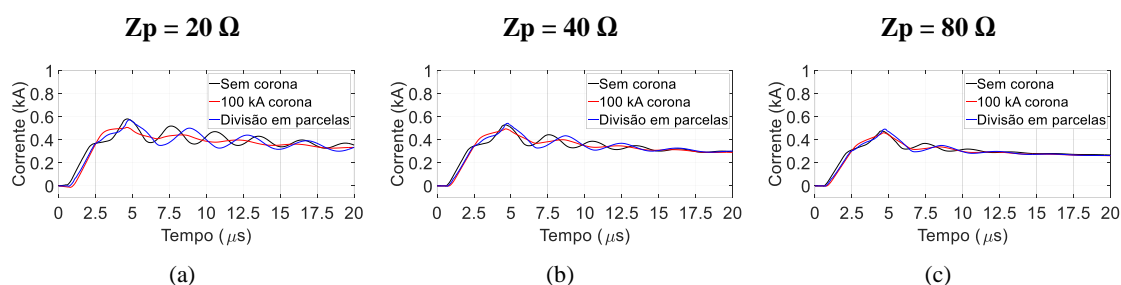


Figura 5.28 - Comparação das correntes na torre para injeção no meio do vão. (a) $Z_p=20 \Omega$ (b) $Z_p=40 \Omega$ e (c) $Z_p=80 \Omega$. Curva em preto: sem corona; curva em vermelho: raio de corona relativo a $I=100 \text{ kA}$; curva em azul: soma das parcelas de correntes resultante em corona referente a 100 kA

O desempenho da linha para os casos da divisão da corrente em parcelas também foi analisado e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Comparação de correntes críticas e percentual de *backflashover* (injeção no meio do vão) - Casos com torres adjacentes

Z_p (Ω)	Raio	I_c (kA)	% $I > I_c$ (IEEE)	Δ % $I > I_c$
20	Sem corona	85,03	6,76	
	Corona relativo a 100 kA (27,86 cm)	88,00	6,22	-8,01%
	Divisão em parcelas	78,67	8,16	20,57%
40	Sem corona	51,13	21,40	
	Corona relativo a 100 kA (23,20 cm)	51,32	21,24	-0,76%
	Divisão em parcelas	48,95	23,37	9,19%
80	Sem corona	29,43	53,37	
	Corona relativo a 100 kA (20,01 cm)	30,69	50,65	-5,10%
	Divisão em parcelas	30,28	51,53	-3,46%

Nota-se que, para todos os casos com a divisão da corrente em parcelas, a corrente crítica diminuiu em relação ao caso sem corona e ao caso referente à injeção de uma corrente única de 100 kA (com exceção do caso de $Z_p = 80 \Omega$, onde houve um aumento de 2,9% na corrente crítica em relação ao caso sem corona). As ondas resultantes na cadeia isoladores foram muito oscilatórias e distorcidas, desta forma, os valores máximos foram maiores que no caso sem corona. Isso influencia no cálculo da corrente crítica através do método DE e, conseqüentemente, no cálculo do percentual de *backflashover*. Novamente é importante observar que as correntes críticas dos casos sem corona foram de 85,03 kA, 51,13 kA e 29,43 kA, para Z_p igual a 20 Ω , 40 Ω e 80 Ω , respectivamente, todas menores que 100 kA, ou seja, a corrente de 100 kA resulta em *backflashover* na cadeia de isoladores com ou sem o efeito corona, o que não melhoraria o desempenho da linha.

Os resultados com a divisão da corrente em parcelas inicialmente denotam a ideia de que houve uma piora de desempenho ao considerar a injeção da onda de corrente de 100 kA em parcelas. Porém, o resultado é inconclusivo, pois, ao considerar o corona referente a injeção de uma corrente única de 100 kA, as correntes críticas resultantes foram ligeiramente maiores que as correntes críticas no caso sem corona.

5.5 Efeitos Conjugados: Corona e Perdas na propagação em decorrência da resistividade elétrica do solo

As análises anteriores não consideraram as perdas que existem na propagação do surto de tensão no cabo para-raios devido à resistividade elétrica do solo. Sabe-se também que, na prática, os valores de resistividade e permissividade do solo são dependentes da frequência, desta forma, esta seção irá abordar resultados de simulações que consideram tais efeitos.

Para isso, considerou-se a implementação das formulações de Sunde (1949) no modelo HEM para modificação do acoplamento longitudinal próprio e mútuo referente aos cabos para-raios e fase. Tais formulações foram consideradas de modo a contabilizar os efeitos das perdas no solo na propagação dos surtos ao longo da linha e foram incluídas nos elementos próprios e mútuos da matriz de impedâncias longitudinais do modelo HEM. As simulações consideraram os parâmetros resistividade e permissividade elétrica

constantes e variando com a frequência segundo a fórmula Visacro-Alípio proposta em Visacro e Alípio (2012).

Nas seções anteriores foi observado que a injeção de corrente no meio do vão é a que obteve maiores valores de raio de corona e resultados nos quais o efeito corona foi mais relevante. Por este motivo, serão realizadas simulações apenas com a injeção de corrente no meio do vão com a configuração com torres adjacentes, apresentada na Figura 5.11, considerando valor de Z_p de 20Ω . Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.5.1 Efeito das perdas na propagação

Na Figura 5.29 são apresentadas as curvas de tensão na fase e na cadeia de isoladores para a injeção no meio do vão nos casos com perdas (o caso sem perdas se refere ao solo com resistividade elétrica nula). A tensão na estrutura não sofreu modificações.

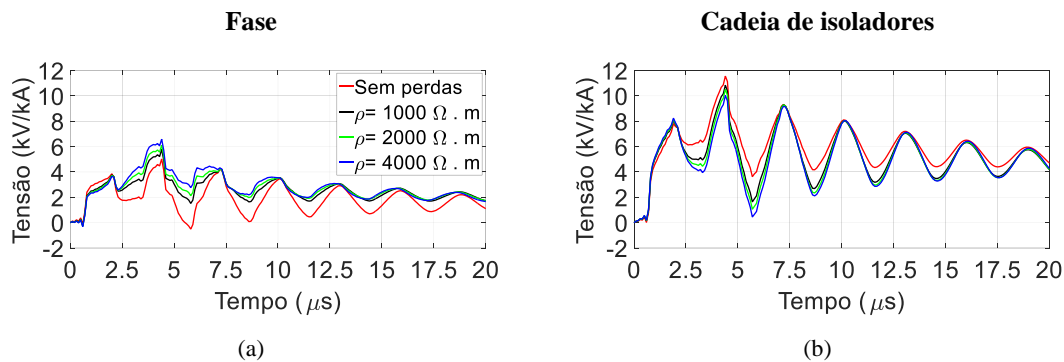


Figura 5.29 - Tensões para simulações com perdas sem variação dos parâmetros com a frequência – $Z_p = 20 \Omega$. (a) Tensão na fase (b) Tensão na cadeia de isoladores superior

Nota-se que, quanto maior o valor da resistividade do solo, maior o valor da tensão na fase e menor o valor da tensão na cadeia de isoladores. A variação em relação ao caso do solo ideal é de 14,6%, 21,6% e 31,1% de aumento na tensão na fase para os valores de resistividade $1000 \Omega \cdot m$, $2000 \Omega \cdot m$ e $4000 \Omega \cdot m$, respectivamente. Na cadeia de isoladores, a redução foi de 6,2%, 9,0% e 13,2% para os valores de resistividade de $1000 \Omega \cdot m$, $2000 \Omega \cdot m$ e $4000 \Omega \cdot m$, respectivamente.

Foram feitas simulações incluindo a variação dos parâmetros do solo (resistividade e permissividade) com a frequência e os resultados foram comparados com as simulações em que esta variação não é considerada. Os resultados das ondas de tensão

na fase e na cadeia de isoladores para as resistividades de 1000 $\Omega.m$ e 4000 $\Omega.m$ são apresentados na Figura 5.30.

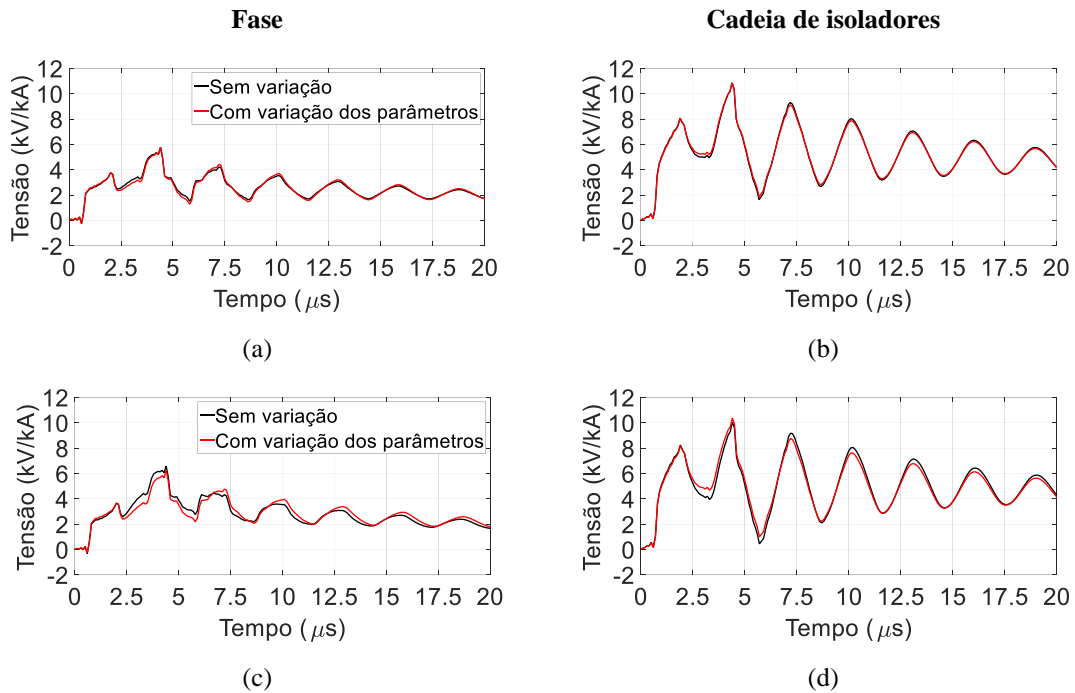


Figura 5.30 - Tensões para simulações com perdas com e sem variação dos parâmetros com a frequência – $Z_p = 20 \Omega$. (a) e (c) Tensão na fase (b) e (d) Tensão na cadeia de isoladores. Primeira linha: 1000 $\Omega.m$ e segunda linha 4000 $\Omega.m$

Ao adicionar o efeito da variação dos parâmetros do solo com a frequência, a tensão na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores praticamente não sofreram modificações no caso da resistividade de 1000 $\Omega.m$ (diminuição da tensão na fase de 0,3% e aumento da tensão na cadeia de isoladores de 0,9%). Para a resistividade de 4000 $\Omega.m$ as variações também foram pequenas, porém um pouco mais expressivas. As tensões na estrutura não sofreram modificações. No condutor fase observou-se uma redução de 5,3% no valor máximo de tensão, enquanto na cadeia de isoladores a tensão resultante teve um aumento de 3,4% ao considerar-se a variação dos parâmetros do solo com a frequência.

As correntes críticas e o percentual de *backflashover* para as simulações com perdas foram calculadas e os resultados estão dispostos na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 - Valores de corrente crítica e de percentual de *backflashover* para casos com perdas sem corona – injeção de corrente no meio do vão e $Z_p = 20 \Omega$

Resistividade ($\Omega.m$)	Varição dos parâmetros com a frequência	Ic (kA)	%I > Ic (IEEE)	Δ %I > Ic
0 (sem perdas)	-	85,03	6,76	
1000	Não	89,77	5,93	-12,4%
	Sim	90,48	5,81	-14,0%
2000	Não	90,84	5,76	-14,9%
	Sim	92,10	5,57	-17,7%
4000	Não	92,09	5,57	-17,7%
	Sim	93,80	5,32	-21,3%

Nota-se que a representação das perdas na propagação resultou em um aumento da corrente crítica e em uma melhora no desempenho em todos os casos analisados. O aumento da corrente crítica foi maior nos casos que consideram a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Para os casos sem variação dos parâmetros com a frequência houve uma redução no percentual de *backflashover* de 12,4%, 14,9% e 17,7% para as resistividades de 1000 $\Omega.m$, 2000 $\Omega.m$ e 4000 $\Omega.m$, respectivamente. Ao considerar a variação dos parâmetros com a frequência a redução é um pouco maior, de 14%, 17,7% e 21,3% para as resistividades de 1000 $\Omega.m$, 2000 $\Omega.m$ e 4000 $\Omega.m$, respectivamente.

5.5.2 *Efeito corona considerando as perdas na propagação*

De modo a avaliar a influência de se considerar em conjunto a representação dos efeitos corona e de perdas na propagação, simulações foram realizadas para a mesma configuração da seção anterior. Os raios utilizados nas simulações com corona foram calculados através das correntes críticas apresentadas na Tabela 5.19 para os casos sem variação dos parâmetros com a frequência. Esses raios estão dispostos na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Valores de raio de corona calculados de acordo com a corrente crítica considerando perdas na propagação - $Z_p = 20 \Omega$

Resistividade ($\Omega.m$)	I_c (kA)	Raio de corona (cm)
1000	89,77	24,28
2000	90,84	24,62
4000	92,09	24,97

Os resultados de tensão na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior para as resistividades de 1000 $\Omega.m$ e 4000 $\Omega.m$ são apresentados na Figura 5.31. As tensões na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior se modificam nos casos com corona, se tornando muito mais distorcidas. Ocorre uma redução no valor máximo de tensão na estrutura, um aumento da tensão na fase e uma pequena redução da tensão resultante na cadeia de isoladores.

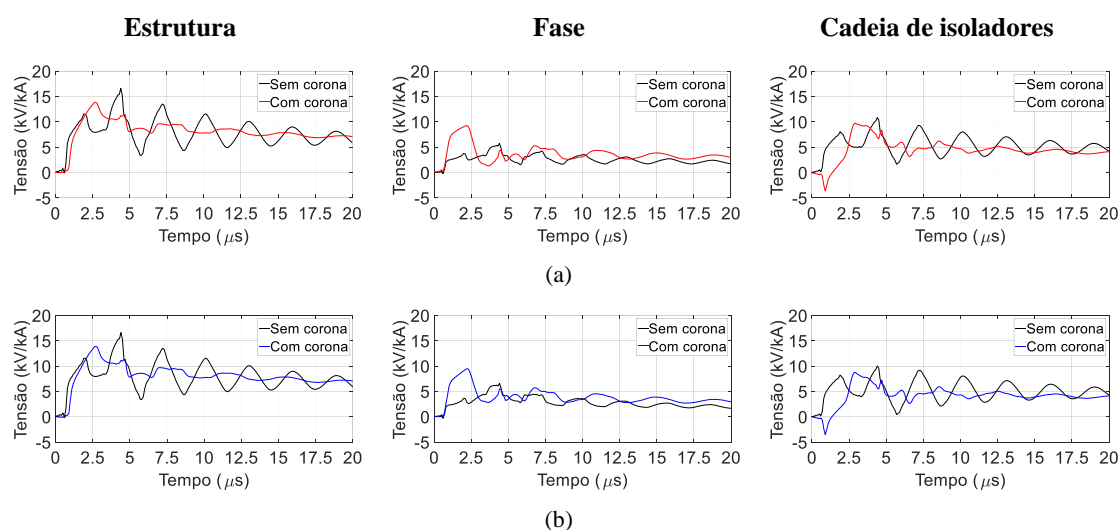


Figura 5.31 - Tensões para simulações com perdas e com perdas e corona— $Z_p = 20 \Omega$. (a) 1000 $\Omega.m$ (b) 4000 $\Omega.m$. Coluna da esquerda: tensão na estrutura; coluna central: tensão na fase; coluna da direita: tensão na cadeia de isoladores superior. Curva em preto: resultados sem o efeito corona, curva em azul: resultados com o raio de corona referente à corrente crítica

Os valores de corrente crítica e percentual de *backflashover* estão indicados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Valores de corrente crítica e de percentual de *backflashover* para casos sem perdas sem corona, com perdas sem corona e com perdas com corona – injeção de corrente no meio do vão - $Z_p = 20 \Omega$ – Variação percentual em relação ao caso sem corona e sem perdas

Resistividade ($\Omega.m$)	Caso	Ic (kA)	%I > Ic (IEEE)	Δ %I > Ic
0 (sem perdas)	Sem corona	85,03	6,76	
	Sem corona	89,77	5,93	-12,4%
1000	Corona referente a 90 kA (24,28 cm)	100,47	4,49	-33,6%
	Sem corona	90,84	5,76	-14,9%
2000	Corona referente a 91 kA (24,62cm)	105,56	3,97	-41,2%
	Sem corona	92,09	5,57	-17,7%
4000	Corona referente a 92 kA (24,97cm)	113,93	3,28	-51,5%
	Sem corona	92,09	5,57	-17,7%

A representação das perdas, em relação ao caso sem corona e sem perdas leva a uma redução de 12,4%, 14,9% e 17,7% no percentual de *backflashover* para resistividades do solo de 1000 $\Omega.m$, 2000 $\Omega.m$ e 4000 $\Omega.m$, respectivamente. A representação do efeito corona em conjunto com as perdas resulta em uma redução adicional no percentual de *backflashover* da ordem de 21%, 26% e 37% para as mesmas resistividades do solo, respectivamente, denotando a maior influência da representação do efeito corona em relação à representação das perdas na propagação.

Tomando como base os resultados que já consideram as perdas na propagação, a representação do efeito corona resultou em reduções no percentual de *backflashover* da ordem de 24%, 31% e 41%, para os casos de resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$, 2000 $\Omega.m$ e 4000 $\Omega.m$, respectivamente. Esta comparação é denotada na Tabela 5.22. Conseqüentemente, há uma melhora de desempenho em todos os casos com corona e com perdas tanto em relação ao caso com perdas e sem corona quanto em relação ao caso sem perdas e sem corona.

Tabela 5.22 - Valores de corrente crítica e de percentual de *backflashover* para casos com perdas sem corona e com perdas com corona – injeção de corrente no meio do vão - $Z_p = 20 \Omega$ – Variação percentual em relação ao caso sem corona e com perdas

Resistividade ($\Omega.m$)	Caso	Ic (kA)	%I > Ic (IEEE)	Δ %I > Ic
1000	Sem corona	89,77	5,93	-
	Corona relativo a 90 kA (24,28 cm)	100,47	4,49	-24,3%
2000	Sem corona	90,84	5,76	-
	Corona relativo a 91 kA (24,62cm)	105,56	3,97	-31,1%
4000	Sem corona	92,09	5,57	-
	Corona relativo a 92 kA (24,97cm)	113,93	3,28	-41,1%

6 Considerações finais e propostas de continuidade

6.1 Considerações finais

Neste trabalho foi abordada a representação do efeito corona em uma linha de transmissão de 138 kV frente a incidência de descargas atmosféricas no topo da torre e no meio do vão utilizando o modelo HEM. As correntes na torre, as tensões ao longo do cabo para-raios, na estrutura da torre, no condutor fase e na cadeia de isoladores foram avaliadas. Foi realizada a análise de desempenho da linha através do cálculo das correntes críticas e da probabilidade de ocorrência de correntes maiores que a corrente crítica calculada. Além disso, também foram avaliadas simulações em que foram considerados os efeitos de perdas na propagação das ondas juntamente com o efeito corona.

O efeito corona foi considerado como a extensão radial do raio do cabo para-raios através de equações que utilizam um campo elétrico crítico e a tensão máxima no ponto de injeção de corrente. No modelo HEM, esta representação considerou a modificação dos elementos próprios da matriz Z_T , que representa o efeito transversal em cada segmento do sistema analisado.

6.1.1 *Injeção de corrente no topo da torre*

Para a injeção de corrente no topo da torre, ao considerar a configuração com torres adjacentes, as tensões observadas ao longo do cabo para-raios dos casos com efeito corona referentes às correntes de 31 kA e 100 kA sofreram poucas modificações em relação ao caso sem corona. O mesmo comportamento é observado nas tensões na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior: considerar o efeito corona resultou em poucas modificações na forma de onda e nos valores máximos. As ondas de corrente que descem a torre foram praticamente iguais, com variações máximas menores que 1%

e a análise das correntes críticas calculadas com o efeito corona juntamente com o percentual de *backflashover* praticamente não sofreram modificações.

6.1.2 *Injeção de corrente no meio do vão*

Para a injeção de corrente no meio do vão, ao considerar a configuração com torres adjacentes, os resultados dos casos com efeito corona referentes às correntes de 31 kA e 100 kA já se mostraram muito mais oscilatórios em relação ao caso sem corona. Nas tensões observadas ao longo do cabo para-raios é possível perceber que enquanto no caso sem corona as ondas apresentam muitas oscilações, os casos com corona apresentam oscilações menores, sendo mais atenuados e distorcidos.

As tensões observadas na estrutura, na fase e na cadeia de isoladores superior também apresentaram resultados mais distorcidos ao se considerar a presença do efeito corona. Um efeito que se destacou foi o aumento da tensão na fase ao considerar o efeito corona, devido ao maior acoplamento entre os cabos fase e para-raios causado pela representação do aumento do raio deste último. Apesar deste aumento da tensão na fase, a tensão na cadeia de isoladores apresentou apenas uma leve redução no seu valor de pico, devido ao formato distorcido das ondas.

Ao considerar os casos de raio de corona referentes às correntes críticas, que levam ao *backflashover*, notou-se que, apesar do efeito corona levar à diminuição da tensão na cadeia de isoladores, o aumento da corrente crítica não foi tão significativo e apesar de ocorrer uma melhora de desempenho, esta melhora é percentualmente pequena. Ou seja, a influência do efeito corona não é tão intensa a ponto de modificar significativamente na melhora do desempenho da linha.

A corrente que desce pela torre, assim como no caso de injeção no topo da torre, sofre pouca influência, apesar de ser menos oscilante nos casos com corona. Isso indica que apesar da presença do efeito corona, o que prevalece no estabelecimento da corrente que flui pela torre é o efeito do aterramento.

Foram avaliadas também as tensões na cadeia de isoladores inferior para diferentes valores de Z_p e esses resultados foram comparados com as tensões na cadeia de isoladores superior. Mostrou-se que, apesar da tensão na fase inferior também aumentar com a consideração do efeito corona, a maior proximidade do cabo fase superior

com o cabo para-raios resulta em tensões maiores na fase superior e conseqüentemente, sobretensões menores na cadeia de isoladores superior. Para a cadeia de isoladores inferior o aumento da corrente crítica também não foi tão significativo e conseqüentemente a melhora de desempenho foi percentualmente pequena.

A divisão da corrente injetada em parcelas foi uma alternativa de representar de forma aproximada a dinâmica do efeito corona ao longo do tempo. Essa divisão foi desenvolvida de modo que a primeira parcela tivesse uma amplitude menor que a segunda, e a segunda parcela uma amplitude menor que a terceira, representando um aumento gradual do raio ao longo do tempo. Para uma corrente de 100 kA de valor de pico, procedeu-se à divisão em 3 parcelas: a primeira parcela com valor de pico de 20 kA, a segunda parcela com valor de pico de 60 kA e a terceira parcela com valor de pico de 100 kA. Porém, os resultados obtidos não foram conclusivos. Tais resultados indicaram um desempenho pior para os valores de Z_p de 20 Ω e 40 Ω e melhor para Z_p de 80 Ω (considerando as ressalvas em relação ao valor da corrente crítica que leva ao desligamento da linha). Desta forma, esse é um ponto que merece evolução em trabalhos futuros.

Em relação as simulações com a representação simultânea das perdas na propagação devido à resistividade do solo e do efeito corona, observou-se que, ao adicionar o efeito das perdas, houve uma redução no percentual de *backflashover*. Além disso, ao considerar também a adição do efeito corona, essa redução foi ainda maior (de 24% a 41% para valores de resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$ a 4000 $\Omega.m$ em relação ao caso com perdas e sem corona).

Os resultados correspondentes à redução da sobretensão nos isoladores foram desenvolvidos assumindo-se um valor para o campo elétrico crítico de 15 kV/cm, segundo recomendação de EPRI (EPRI, 1982). Se outro valor tivesse sido adotado, por exemplo 53,8 kV/cm (calculado através da fórmula do CIGRE), a redução seria menor. Da mesma forma, se fosse simulado a condição de uma linha de transmissão de tensão superior, por exemplo 230 kV, onde a distância do cabo de blindagem para as fases é maior, menor seria o aumento do acoplamento eletromagnético entre os condutores proporcionado pela representação do efeito corona e, conseqüentemente, menor seria a redução da sobretensão resultante na cadeia de isoladores.

6.1.3 *Propostas de continuidade*

O presente trabalho representou o efeito corona considerando a extensão radial do raio do cabo para-raios em toda a sua extensão. Para aperfeiçoamento do modelo e consideração do comportamento dinâmico do efeito corona ao longo do tempo foi proposta a metodologia de injeção de corrente através de parcelas de corrente com diferentes amplitudes que se iniciam em diferentes valores de tempo. A aplicação deste modelo de divisão da corrente em parcelas obteve resultados ainda não conclusivos. É proposta a continuação do estudo do efeito da divisão da corrente injetada em mais parcelas, de modo a implementar um modelo no HEM que considere o efeito dinâmico do corona ao longo do tempo. Parte desses desenvolvimentos estão incluídos em Silva (2021), que trata de uma versão no domínio do tempo no modelo HEM. Além disso, as simulações foram realizadas somente com a configuração de uma torre típica de 138 kV. Em trabalhos futuros pode-se analisar o efeito corona em outras configurações de torres. É proposto também considerar a influência do valor de tempo de frente da onda de corrente na representação do efeito corona e sua consequência em termos da tensão observada na cadeia de isoladores e no desempenho da linha.

Foram realizadas simulações considerando as perdas na propagação em decorrência da resistividade do solo juntamente com a consideração do efeito corona. Em trabalhos futuros, propõe-se um estudo mais profundo neste aspecto para incluir as perdas juntamente com a representação do comportamento dinâmico do efeito corona ao longo do tempo.

Referências Bibliográficas

Al Tai, M. A., Elayyan, H. S. B., German, D. M., Haddad, A., Harid, N., & Waters, R. T. 1989. The simulation of surge corona on transmission lines. *IEEE Power Engineering Review. IEEE Power Engineering Review*. 1989, Vol. 9, 4, pp. 98-99.

Almeida, Frederico Santos. 2020. *Uma contribuição ao estudo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas com base no método de Monte Carlo*. Belo Horizonte : Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Dissertação de Mestrado, 2020.

Anane, Zahira, Bayadi, Abdelhafid e Huang, Kejie. 2018. Distortion phenomena on transmission lines using corona modeling ATP/EMTP. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018, Vol. 25, 2, pp. 383 - 389.

Anderson, R. B. e Eriksson, A. J. 1980. Lightning parameters for engineering application. *Electra*. 1980, Vol. 69, pp. 65–102.

Barros, M.T. Correia de e Jesus, C. de. 1994. Wide bandwidth modeling of corona on high voltage transmission lines. *Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - (CEIDP'94)*. 1994.

Bazaraa, Mokhtar S., Hanif D. Sherali, and Chitharanjan M. Shetty. 2013. *Nonlinear programming: theory and algorithms*. s.l. : John Wiley & Sons, 2013.

Brown, Gordon W. 1978. Lightning Performance II - Updating Backflash Calculations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Jan de 1978, Vols. PAS-97, 1, pp. 39 - 52.

Carneiro, Sandoval, and Jose R. Marti. 1991. Evaluation of corona and line models in electromagnetic transients simulations. *IEEE Transactions on Power Delivery* . 1991, Vol. 6, 1, pp. 334-342.

CIGRE. 2019. *Electromagnetic computation methods for lightning surge studies with emphasis on the FDTD method*. s.l. : Cigre brochure 785. Working Group C4.37, 2019.

—. 1991. *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*. 1991.

Cunha, Leandro Veloso. 2010. *Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: influência do efeito corona na ruptura a meio de vão*. Belo Horizonte : Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Dissertação de Mestrado, 2010.

EPRI. 1982. *Transmission line reference book, 345 kV and above*. 2 edition. Pittsfield : Electric Power Research Institute, 1982.

Gary, C., Critescu, D., Dragan, G.,. 1989. Attenuation and Distortion of Travelling Waves Caused by Transient Corona. *Cigré Study Committee 33, Brochure 55*. 1989.

Hartmann, Gildas. 1984. Theoretical Evaluation of Peek's Law. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Nov. de 1984, Vols. IA-20, 6, pp. 1647 - 1651.

Hayt Jr, William H. e Buck, John A. 2013. *Eletromagnetismo*. s.l. : Bookman Editora, 2013.

Hileman, Andrew R. 1999. *Insulation coordination for power systems*. s.l. : CRC Press, 1999.

IEEE Std. 1243. 1997. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, . 1997.

Jesus, C. de e Barros, M.T. Carreia de. 1995. Improved modelling of corona for surge propagation studies. *Proceedings of 1995 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 1995.

Jesus, C. de e Barros, M.T. Correia de. 1994. Modelling of corona dynamics for surge propagation studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Julho de 1994, Vol. 9, 3, pp. 1564 - 1569.

Macedo, Sany A., Silveira, Fernando H. e Visacro, Silvério. 2021. Evaluation of Backflashover of Transmission Lines Considering the Representation of Corona

Effect. *GROUND 2020/21 & 9th LPE. International Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects*. Jun de 2021.

Martinez, J.A. e Castro-Aranda, F. 2005. Lightning Performance Analysis of Overhead Transmission Lines Using the EMTP. *IEEE Trans. Power Del.* Jul de 2005. Vols. Vol. 20, nº 3.

McCann, G. D. 1943. The Effect of Corona on Coupling Factors Between Ground Wires and Phase Conductors. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. Dezembro de 1943, Vol. 62, 12, pp. 818 - 826.

Mihailescu-Suliciu, M. e Suliciu, I. 1981. A Rate Type Constitutive Equation for the Description of the Corona Effect. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 8, August de 1981, Vols. PAS-100, pp. 3681 - 3685.

Nagaoka, N, Motoyama, H e Ametani, A. 1987. Lightning surge calculations including corona effects using a two-conductor model. *Electric power systems research*,. 1987, Vol. 13, 1, pp. 31-41.

ONS. 2020. Submódulo 2.7: Requisitos mínimos para linhas de transmissão. Procedimentos de Rede .Revisão: 2020.12. [Online] 2020. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Acesso em 12/04/2021.

Peek, F. W. 1915. *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. 1st ed. s.l. : McGraw-Hill Book Company, Incorporated., 1915.

—. **1911.** The law of corona and the dielectric strength of air. *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*. Julho de 1911, Vol. 30, 7, pp. 1485 - 1561.

Pereira, Thassio Matias e Tavares, Maria Cristina. 2020. Development of a Voltage-Dependent Line Model to Represent the Corona Effect in Electromagnetic Transient Program. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020.

Santiago, N. C. e Portela, C. M. 1987. Atenuação de surtos em linhas de transmissão devido ao efeito corona - Análise e modelagem. *IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. 1987.

Santiago, N. H. C. 1987. Atenuação de Surtos em Linhas de Transmissão devido ao Efeito Corona. *Ph. D. Dissertation COPPE/UFRJ*. 1987.

Silva, Bárbara Pereira. 2021. *Modelo no domínio do tempo para cálculo de grandezas eletromagnéticas associadas a correntes impulsivas: desenvolvimento e aplicação em solicitação por descargas atmosféricas*. Belo Horizonte : Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Tese de Doutorado, 2021.

Silveira, F. e Visacro, S. 2019. Lightning Performance of Transmission Lines: Impact of Current Waveform and Front-Time on Backflashover Occurrence. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Dec de 2019, Vol. 34, 6, pp. 2145 - 2151.

Silveira, Fernando H., et al. 2014. Lightning-Induced Voltages Over Lossy Ground: The Effect of Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2014, Vol. 56, pp. 1129-1136.

Silveira, Fernando Henrique. 2006. *Modelagem para cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas*. Belo Horizonte : Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Tese de Doutorado, 2006.

Skilling, H. H. e Dykes, P. De K. 1937. Distortion of traveling waves by corona. *Electrical Engineering*. Julho de 1937, Vol. 56, 7, pp. 850 - 857.

Sunde, Erling Ditlef. 1949. *Earth conduction effects in transmission systems*. New York : Dover Publications Inc., 1949.

Thang, Tran Huu, et al. 2011. A Simplified Model of Corona Discharge on Overhead Wire for FDTD Computations. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Novembro de 2011, Vol. 54, 3, pp. 585 - 593.

Thang, Tran Huu, et al. 2013. FDTD Simulation of Insulator Voltages at a Lightning-Struck Tower Considering Ground-Wire Corona. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Maio de 2013, Vol. 28, 3, pp. 1635 - 1642.

Thang, Tran Huu, et al. 2012. FDTD Simulation of Lightning Surges on Overhead Wires in the Presence of Corona Discharge. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Junho de 2012, Vol. 54, 6, pp. 1234 - 1243.

Udo, T. 1965. Switching surge and impulse sparkover characteristics of large gap spacings and long insulator strings. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1965, Vol. 84, 4, pp. 304-309.

Visacro, S. 2005. *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. s.l. : Artliber, 2005.

— **2007.** Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines. *Journal of Lightning Research*. 2007, Vol. 1, pp. 60-68.

Visacro, S e Silveira, F.H. 2015. Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires. *IEEE Transactions on Power Delivery* . 2015, Vol. 31, 4, pp. 1524-1532.

Visacro, S e Soares, Jr. A. 2005. HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems. *IEEE Trans. Power Del.* Abr de 2005, Vols. Vol. 20, nº2, pp. 1026-1208.

Visacro, S., et al. 2020. Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines. *Electric Power Systems Research*. 2020, Vol. 180, p. 106064.

Visacro, S., Soares Jr, A., Schroeder, M. A. O., Cherchiglia, L. C., & de Sousa, V. J. 2004. Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2004, Vol. 109 (D1).

Visacro, Silverio e Alipio, Rafael. 2012. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012, Vol. 27, 2, pp. 927-935.

Visacro, Silverio e Silveira, Fernando H. 2015. The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2015, Vol. 57, pp. 434-441.

Wagner, C. F. e Lloyd, B. L. 1955. Effects of corona on traveling waves. *Electrical Engineering*. Dezembro de 1955, pp. 1071 - 1071.

Wagner, C. F., Gross, I. W. e Lloyd, B. L. 1954. High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*. Abril de 1954, Vol. 73, 2, pp. 196 - 210.