



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

THASSIO MATIAS PEREIRA

**MODELAGEM DO EFEITO CORONA PARA ESTUDOS DE SOBRETENSÕES
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**CAMPINAS
2019**

THASSIO MATIAS PEREIRA

**MODELAGEM DO EFEITO CORONA PARA ESTUDOS DE SOBRETENSÕES
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO THASSIO MATIAS PEREIRA
E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. MARIA CRISTINA DIAS TAVARES

Assinatura da Orientadora

**CAMPINAS
2019**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

P414m Pereira, Thassio Matias, 1994-
Modelagem do efeito corona para estudos de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão / Thassio Matias Pereira. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Maria Cristina Dias Tavares.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Simulação computacional. 2. Campos eletromagnéticos. 3. Campos eletromagnéticos - Modelos matemáticos. 4. Ondas eletromagnéticas - Transmissão. 5. Energia elétrica - Transmissão. 6. Linhas elétricas - Transmissão. I. Tavares, Maria Cristina Dias, 1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Titulo em outro idioma: Corona modeling for lightning overvoltages studies in overhead transmission lines

Palavras-chave em inglês:

Computer simulation
Electromagnetic fields
Electromagnetic fields - Mathematical models
Electromagnetic waves - Transmission
Electric power - Transmission
Electric lines - Carrier transmission

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Maria Cristina Dias Tavares [Orientador]
Alberto Resende De Conti
Rafael Silva Alípio

Data de defesa: 29-11-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)
- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-8318-1190>
- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1064890314381682>

COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Thassio Matias Pereira RA: 209420

Data de Defesa: 29 de novembro de 2019

Título da Dissertação: “MODELAGEM DO EFEITO CORONA PARA ESTUDOS DE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO”

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (Presidente)

Prof. Dr. Alberto Resende De Conti

Prof. Dr. Rafael Silva Alípio

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

Com muito amor, dedicado este trabalho aos meus pais, Ronam e Marli, aos meus irmãos Thalís e Thamer e ao meu querido sobrinho Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido muita força, saúde, paz, sabedoria e inspiração durante o desenvolvimento deste trabalho. Tenho a plena convicção de que sem Ele nada seria possível de se realizar.

Agradeço imensamente aos meus amados pais, Ronam e Marli, que por meio de um amor transcendental me ensinaram desde muito cedo a prática da humildade, da responsabilidade, da fraternidade e, sobretudo, do amor. Ademais, eles jamais mediram esforços para me proporcionar uma vida digna e para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Agradeço também aos meus queridos irmãos, Thalís e Thamer, bem como ao meu amado sobrinho Gustavo. Minha família é, e sempre será, minha maior riqueza e fonte de inspiração!

À minha orientadora Prof^a. Dr^a Maria Cristina Dias Tavares, que através de sua efetiva dedicação à orientação, de sua sólida formação e de seu entusiasmo, me proporcionou um grande desenvolvimento em diversas áreas da Engenharia Elétrica, não se restringindo apenas aos temas abordados nesta pesquisa. Ademais, também não poderia deixar de citar suas notáveis características pessoais, sendo um exemplo de humildade, paciência, compreensão e de amor ao próximo. Deixo aqui registrado meu muito obrigado por tudo, professora!

A todos os grandes amigos do Laboratório de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos e de Proteção em Sistemas de Potência (LTRANSP), com os quais eu tive o prazer de conviver diariamente durante o desenvolvimento deste trabalho. Através de nossas conversas técnicas e sobre a vida de um modo geral, pude desenvolver diversos conhecimentos imprescindíveis para minha formação profissional.

A todos os meus amigos e familiares Turvolandenses, pelos quais eu guardo um profundo carinho e admiração.

Às agências de fomento que contribuíram financeiramente para o desenvolvimento deste trabalho:

- O presente trabalho foi realizado com apoio do processo nº 2018/04174-7, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).
- O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Felizes são aqueles que, por onde passam, deixam sementes de amor, bondade e afeto”

(Divaldo Pereira Franco)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da modelagem e representação do efeito corona em programas para cálculo de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo (*Electromagnetic Transient Program* - EMT), com foco para a representação das diversas atenuações e distorções provocadas por este fenômeno na ocorrência de sobretensões causadas por descargas atmosféricas.

Em síntese, o conteúdo abordado pode ser dividido em duas partes. Na primeira parte é realizada uma avaliação do desempenho e da precisão de diferentes modelos de efeito corona desenvolvidos ao longo dos anos por diferentes pesquisadores. Os modelos analisados foram implementados no programa PSCAD, onde foram realizadas diversas simulações e os resultados obtidos foram comparados com dados de medições em campo. Nessa etapa também foram descritos os procedimentos necessários para implementação dos modelos, bem como as principais vantagens e desvantagens de cada um.

Na segunda parte é apresentada uma nova metodologia para representação do efeito corona em linhas de transmissão. Baseando-se no método das características e no esquema proposto por H. Dommel para representação de linhas com parâmetros distribuídos em programas do tipo EMT, foi desenvolvido um novo modelo de linha, cujos parâmetros são dependentes da tensão (*Voltage Dependent Line Model* – VDLM). Este modelo pode ser representado por uma rede de impedância equivalente, o que o torna adequado para aplicações em programas do tipo EMT e permite uma fácil combinação com outros componentes de um sistema elétrico de potência. Para avaliação do desempenho, o modelo foi implementado no programa *Matlab* e os resultados obtidos foram comparados com dados de medições campo, podendo ser observada uma boa concordância entre eles.

Palavras-chave: Efeito corona, transitórios eletromagnéticos, simulações computacionais, linhas de transmissão, sobretensões atmosféricas, coordenação de isolamento.

ABSTRACT

This document describes a study on modeling and representation of the corona effect in electromagnetic transient programs (EMT), to properly address the attenuation and distortion caused by this phenomenon during the occurrence of lightning.

In summary, the content covered can be divided into two parts: In the first part we evaluate the performance and accuracy of corona effect models developed over the years by different researchers. The analyzed models were implemented in the PSCAD program, where several simulations were performed and the obtained results were compared with field measurement data. In this stage, the procedures necessary to implement the models were also described, as well as the main advantages and disadvantages of each one.

In the second part a new methodology for the representation of the corona effect in transmission lines is presented. Based on the method of characteristics and the scheme proposed by H. Dommel for representation of distributed parameters lines in EMT-type programs, a voltage-dependent line model (VDLM) was developed. This model can be represented through of an equivalent impedance network, which makes it suitable for applications in EMT programs, and allows easy combination with other components of the electrical power system. For performance evaluation, the proposed model was implemented in the Matlab software and the simulation's results were compared with field measurements to verify its accuracy. Good agreement could be observed between them.

Keywords: *Corona effect, electromagnetic transients, digital simulations, transmission lines, lightning overvoltages, insulation coordination.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ionização por colisão eletrônica e formação da avalanche de Townsend. Caso em que o condutor da linha possui polaridade negativa.....	24
Figura 2.2 - Desenvolvimento da avalanche de Townsend e variação do campo elétrico para o caso em que o condutor possui tensão de polaridade negativa. Adaptado de [18].....	26
Figura 2.3 - Desenvolvimento da avalanche de Townsend e variação do campo elétrico para o caso em que o condutor possui tensão de polaridade positiva. Adaptado de [19].	28
Figura 2.4 – Influência efeito corona na propagação de ondas.	31
Figura 2.5 - Representação do efeito corona através de elementos concentrados e externos à linha.	34
Figura 2.6 – Forma típica da curva q-v normalmente obtida na aplicação de dupla exponencial de polaridade positiva.	36
Figura 2.7 – Forma típica da curva q-v resultante da aplicação de uma forma de onda senoidal (60 Hz).....	37
Figura 2.8 - Forma típica da curva q-v resultante da aplicação de um pulso de tensão unipolar amortecido.	37
Figura 2.9 - Comparação entre curvas q-v obtidas para pulsos de tensão de polaridade positiva e negativa. As curvas apresentadas nessa figura foram obtidas através de medições em um condutor ACSR de 30,48 mm de diâmetro [48].....	38
Figura 2.10 - Comparação entre curvas q-v obtidas para sobretensões de chaveamento e sobretensões por descargas atmosféricas. As curvas apresentadas nessa figura foram obtidas através de medições em um condutor ACSR de 30,48 mm de diâmetro [48].....	39
Figura 2.11 - Representação da curva q-v por meio de elementos de circuito (modelo de Wagner e Lloyd [22]).	41
Figura 2.12 - Representação da curva q-v através de linearização por partes. Modelo de Gary, Timotin e Cristescu [60].	42
Figura 3.1 – Esquema utilizado para representação dos testes nas simulações computacionais. (a) Sistema Tidd, (b) Sistema EDF.....	49
Figura 3.2 – Forma de onda do pulso de tensão aplicada na linha Tidd.	51
Figura 3.3 – Forma de onda do pulso de tensão aplicado na linha EDF.	51
Figura 3.4 – Comparação entre formas de ondas medidas e simuladas (linha Tidd). Efeito corona não representado na simulação.	52

Figura 3.5 – Comparação entre formas de ondas medidas e simuladas (linha EDF). Efeito corona não representado na simulação.	52
Figura 3.6 – Tensões induzidas nas fases adjacentes (linha Tidd). Efeito corona não representado nas simulações;.....	54
Figura 3.7 - Tensões induzidas nas fases adjacentes (linha EDF). Efeito corona não representado nas simulações.....	55
Figura 3.8 –Esquema utilizado para representação do efeito corona nas simulações.	56
Figura 3.9 - Ilustração do esquema utilizado para reconstituição da curva q-v.	57
Figura 3.10 - Modelo de Kudyan e Shih.	58
Figura 3.11 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Kudyan e Shih.	59
Figura 3.12 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Kudyan e Shih.	59
Figura 3.13 – Reconstituição da Curva q-v produzida pelo modelo de Kudyan e Shih.....	60
Figura 3.14 – Representação da curva q-v segundo o modelo de Kudyan e Shih.....	61
Figura 3.15 - Modelo de K. Lee.	62
Figura 3.16 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de K. Lee.	64
Figura 3.17 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de K Lee.	65
Figura 3.18 – Reconstituição da q-v produzida pelo modelo de K. Lee para simulação na linha Tidd.....	65
Figura 3.19 - Modelo de Motoyama e Ametani.	67
Figura 3.20 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Motoyama e Ametani.	68
Figura 3.21 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Motoyama e Ametani.	69
Figura 3.22 - Reconstituição da q-v produzida pelo modelo de Motoyama e Ametani.....	69
Figura 3.23 - Circuito equivalente utilizado para representação das equações de Gary <i>et al.</i> .	71
Figura 3.24 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Gary <i>et al.</i>	72
Figura 3.25 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Gary <i>et al.</i>	73
Figura 3.26 - Reconstituição da q-v produzida pelo modelo de Gary <i>et al.</i>	73

Figura 3.27 - Curvas carga-tensão para o condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro utilizado nos experimentos na linha Tidd.....	76
Figura 3.28 - Estimação dos parâmetros do modelo de Siliciu.	77
Figura 3.29 - Modelo de Siliciu.....	78
Figura 3.30 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Siliciu.....	79
Figura 3.31 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Siliciu.....	79
Figura 3.32 - Reconstituição da q-v produzida pelo modelo de Siliciu para simulações na linha Tidd.....	80
Figura 3.33 - Comparação entre as formas de onda obtidas nas simulações e as medições da linha Tidd.....	83
Figura 3.34 - Comparação entre as formas de onda obtidas nas simulações e as medições na linha EDF.....	85
Figura 4.1 – Representação gráfica das equações que descrevem a propagação de sinais em uma linha de transmissão sem perdas.....	89
Figura 4.2 - Linha de transmissão sem perdas.	90
Figura 4.3 - Rede de impedância equivalente usada para representação de uma linha de transmissão sem perdas.	90
Figura 4.4 – Representação das perdas longitudinais no modelo de Bergeron.	90
Figura 4.5 – Rede de impedância equivalente para uma linha de transmissão com representação das perdas longitudinais.....	91
Figura 4.6 – Interpretação gráfica das equações de linha com representação da capacitância dinâmica.	93
Figura 4.7 Rede de impedância equivalente para uma linha de transmissão sem perdas e com representação da capacitância dinâmica.	94
Figura 4.8 - Representação das perdas longitudinais e da condutância transversal.	95
Figura 4.9 - Rede de impedância equivalente do VDLM.....	96
Figura 4.10 – Comparação entre os resultados obtidos na representação completa da linha Tidd e a representação da equivalente monofásica. Nas figuras acima, são apresentados os casos em que os parâmetros da equivalente monofásica foram calculados para as frequências de (a) 60 Hz, (b) 10 kHz, (c) 100 kHz.....	102
Figura 4.11 - Comparação entre a representação completa da linha EDF e a equivalente monofásica. Nas figuras acima, são apresentados os casos em que os parâmetros da	

equivalente monofásica foram calculados para as frequências de (a) 10 kHz, (b) 100 kHz, (c) 200 kHz.	104
Figura 4.12 - Comparação entre a representação completa da linha EDF e a equivalente monofásica. Ambas com parâmetros dependentes da frequência.	105
Figura 4.13 - Sistema utilizado para representação dos experimentos Tidd nas simulações computacionais.	105
Figura 4.14 - Discretização espacial da linha.	106
Figura 4.15 - Fluxograma representativo do algoritmo implementado no <i>software</i> Matlab. .	107
Figura 4.16 – Forma de onda da tensão aplicada pelo gerador de impulso.....	109
Figura 4.17 – Comparação entre os resultados obtidos com o VDLM e as medições na linha Tidd. Nas figuras apresentadas, variou-se o comprimento utilizado na discretização espacial da linha, onde utilizou-se trechos de (a) - 10 m, (b) - 20 m, (c) – 40 m, (d) – 50 m.	111
Figura 4.18 - Comparação entre os resultados obtidos com o VDLM e as medições na linha Tidd. Nas figuras apresentadas, variou-se o passo de integração utilizado nas simulações, onde adotou-se valores de (a) 1 ns, (b) 3 ns, (c) 5 ns, (d) 10 ns.	113
Figura 4.19 - Pulso de tensão aplicado no terminal emissor (caso em que a linha está equipada com condutor HH de 41,9 mm de diâmetro).	118
Figura 4.20 - Pulso de tensão aplicado no terminal emissor (caso em que a linha está equipada com condutor ACSR de 50,8 mm de diâmetro).	118
Figura 4.21 - - Comparação entre os resultados obtidos com o VDLM e as medições na linha Tidd. Caso em que a linha está equipada com condutor HH de 41,9 mm de diâmetro.....	119
Figura 4.22 - - Comparação entre os resultados obtidos com o VDLM e as medições na linha Tidd. Caso em que a linha está equipada com condutor ACSR de 50,8 mm de diâmetro.	119
Figura A.0.3 - Seção reta dos condutores utilizados nos experimentos do projeto Tidd. Adaptado de [22].	137
Figura B.3 - Medições na linha EDF.	141
Figura B.4 – Medições de curvas q-v para o condutor ACSR de 26,4 mm de diâmetro utilizado na linha EDF.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Formulações para cálculo do campo elétrico crítico	29
Tabela 3.1 - Valores dos parâmetros do modelo de Kudyan e Shih utilizados nas simulações	58
Tabela 3.2 – Valores dos parâmetros do modelo de K. Lee utilizados nas simulações	65
Tabela 3.3 - Valores dos parâmetros do modelo de Motoyama e Ametani utilizados nas simulações	68
Tabela 3.4 - Fórmulas para obtenção do valor do coeficiente B do modelo de Gary e Dragan.	71
Tabela 3.5 - Valores dos parâmetros do modelo de Gary <i>et al</i> utilizados nas simulações.....	72
Tabela 3.6 – Parâmetros do modelo de Siliciu.	78
Tabela 4.1 – Parâmetros da linha Tidd (100 kHz). Caso em que linha está equipada com um condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro.....	109
Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo de corona. Caso em que linha está equipada com um condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro.....	109
Tabela 4.3 - Tempo de cálculo necessário nos casos onde variou-se o passo de integração.	113
Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo de corona.....	117
Tabela 4.5 – Parâmetros da linha Tidd (calculados para a frequência de 100 kHz)	117
Tabela A.1 - Dados dos condutores.....	137

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	19
1.2 Objetivos gerais	19
1.3 Objetivos específicos.....	19
1.4 Contribuição da Pesquisa	20
1.5 Estrutura do trabalho	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Mecanismo do efeito corona	22
2.1.1 Corona em polaridade positiva e polaridade negativa.....	25
2.2 Campo elétrico crítico	28
2.3 Influência do efeito corona na propagação de ondas	30
2.4 Representação do efeito corona em linhas de transmissão	32
2.4.1 Modelos físicos	32
2.4.2 Modelos equivalentes.....	33
2.5 Modelagem do efeito corona para aplicações em regime transitório	35
2.5.1 Modelagem a partir da curva carga-tensão (q-v).....	35
2.5.2 Modelagem a partir da lei quadrática de Peek.....	43
2.6 Experimentos para avaliação da influência do efeito corona na propagação de surtos em linhas de transmissão	44
3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS DE EFEITO CORONA APLICÁVEIS A PROGRAMAS DO TIPO EMT	47
3.1 Implementação computacional e testes iniciais	48
3.2 Modelo de Kudyan e Shih.....	57
3.3 Modelo de K. Lee.....	61

3.4 Modelo de Motoyama e Ametani	66
3.5 Modelo de Gary <i>et al.</i>	70
3.6 Modelo de M. Siliciu e I. Siliciu.....	74
3.7 Síntese do capítulo	81
4 UMA NOVA METODOLOGIA PARA REPRESENTAÇÃO DO EFEITO CORONA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	87
4.1 Representação do modelo Bergeron em programas do tipo EMT.....	87
4.2 Um modelo de linha com parâmetros dependentes da tensão (VDLM).....	92
4.2.1 Representação da capacitância dinâmica.....	92
4.2.2 Representação da resistência longitudinal e das perdas por efeito corona	94
4.2.3 Modelo de corona	97
4.3 Técnica de solução	99
4.4 Implementação computacional e testes de validação	100
4.5 Análises complementares	114
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	121
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	125
6 BIBLIOGRAFIA	127
APÊNDICE A - MEDIÇÕES NA LINHA TIDD 500 KV	135
APÊNDICE B – MEDIÇÕES EDF	140

1 INTRODUÇÃO

O estudo das sobretensões transitórias nas linhas de transmissão constitui a base para o projeto de coordenação de isolamento. Neste projeto normalmente é necessário determinar os valores máximos de sobretensões que poderão ocorrer ao longo da linha, bem como as suas respectivas formas de onda. Com a posse desses dados é possível realizar o dimensionamento dos equipamentos e definir a localização dos dispositivos de proteção contra surtos e defeitos.

Para obtenção das formas de ondas e dos valores de sobretensões e sobrecorrentes normalmente são feitos estudos com programas computacionais para simular as diversas situações que podem ocorrer ao longo da linha. Nessa etapa podem ser utilizados diversos programas para cálculo de transitórios eletromagnéticos, onde destacam-se os programas de simulação do tipo EMT¹ (*Eletromagnetic transient program*) (DOMMEL, 1969). O simulador EMTP surgiu no final da década de sessenta e resolve as equações no domínio do tempo. Utiliza a regra de integração trapezoidal para solução das equações diferenciais que descrevem o comportamento dos diversos componentes do sistema elétrico durante a ocorrência de mudanças de estado abruptas. Diferentes métodos podem ser adotados para representação de linhas de transmissão nesses programas, onde se pode utilizar desde abordagens mais simples (como elementos π) a modelos mais robustos, com representação do fenômeno de propagação de ondas e da dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência (MARTI, 1982), (MORCHED; GUSTAVSEN; TARTIBI, 1999), (MANITOBA HYDRO INTERNATIONAL LTD, 2010).

Em grande parte das situações, verifica-se que os programas do tipo EMT são capazes de representar com boa precisão os elementos do sistema, fornecendo resultados muito próximos dos obtidos experimentalmente. Contudo, há casos específicos em que os modelos utilizados por esses programas podem não ser adequados para produzir uma representação acurada de alguns fenômenos. Este caso pode ser observado, por exemplo, quando ocorre o efeito corona em linhas de transmissão.

O efeito corona é um fenômeno comumente observado em linhas de transmissão de alta tensão, o qual ocorre quando o campo elétrico na superfície do condutor excede certo valor crítico, provocando a ionização do ar e a geração de carga espacial nas vizinhanças do condutor. Este fenômeno pode afetar o funcionamento das linhas em diferentes circunstâncias, de-

¹ Termo genérico que será utilizado ao longo do texto para identificar os diversos simuladores existentes que trabalham no domínio do tempo, como o ATP, PSCAD/EMTDC, Microtran, EMTP-RV, entre outros.

pendendo do nível de perturbação aplicado. No caso de operação em regime permanente, pode levar a perdas consideráveis de energia, além de provocar ruídos audíveis e rádio interferência. Por outro lado, no caso de sobretensões transitórias, a ocorrência deste fenômeno está ligada à atenuação e à distorção das formas de onda (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982), (MIRANDA, 1994), (BARROS; JESUS, 1994), (CERVANTES et al., 2018).

Por se tratar de um fenômeno extremamente complexo, com características não-lineares, histeréticas e dependentes da frequência, a modelagem do efeito corona em programas do tipo EMT apresenta alto grau de dificuldade, e, pelo conhecimento do autor deste trabalho, ainda não existe na literatura um modelo bem consolidado, capaz de representar fielmente todas as características do fenômeno. Por este motivo, normalmente os programas do tipo EMT ignoram a ocorrência do efeito corona nas linhas de transmissão. Contudo, tal simplificação pode levar a valores conservativos no projeto de coordenação de isolamento dos sistemas de transmissão, acarretando em maiores custos de implantação (NAGAOKA; MOTOYAMA; AMETANI, 1987), (LI; MALIK; ZHAO, 1989b), (DÁVILA et al., 2003), (YANG; CHEN; HE, 2013), (CERVANTES et al., 2018), (HUANG; ZHANG; TAO, 2018).

O estudo e a representação do efeito corona em simulações de transitórios eletromagnéticos podem ser divididos em três diferentes etapas: 1) Desenvolvimento de formulações para cálculo do campo elétrico crítico, 2) Modelagem do fenômeno físico 3) Representação do fenômeno na propagação de ondas em linhas de transmissão. O presente trabalho aborda as duas últimas etapas, sendo que o conteúdo apresentado pode ser dividido em duas partes.

Na primeira parte é realizada uma avaliação do desempenho de diversos modelos de efeito corona que foram desenvolvidos ao longo dos anos. Esses modelos foram implementados no programa PSCAD, onde se utilizou o método convencional para representação do efeito corona em programas do tipo EMT. Este método consiste em subdividir a linha em trechos lineares, e na junção entre cada trecho é disposto um barramento que representa o fenômeno de acordo com o modelo utilizado. Deve-se destacar que, nesse caso, o efeito corona é representado como um componente externo à linha. O desempenho de cada modelo foi avaliado por meio de comparações com dados de medições em campo disponíveis na literatura.

Na segunda parte é apresentada uma nova metodologia proposta na presente pesquisa para representação do efeito corona em linhas de transmissão, que consiste em um modelo de linha com parâmetros constantes na frequência, mas dependentes da tensão - *Voltage-Dependent Line Model* (VDLM). Este modelo baseia-se no método das características e no esquema apresentado por Dommel para representação de linhas de transmissão monofásicas

em programas do tipo EMT (DOMMEL, 1969), e corresponde a um caso mais geral do conhecido modelo Bergeron, permitindo que o efeito corona seja representado diretamente nas equações de linha, e não como um componente externo. Além disso, o modelo proposto pode ser representado por meio de um circuito equivalente, o que permite sua implementação em programas do tipo EMT.

1.1 Justificativa

Os programas do tipo EMT são as principais ferramentas utilizadas para o estudo de coordenação de isolamento e de transitórios eletromagnéticos. A partir das informações obtidas nas simulações é possível dimensionar as linhas de transmissão e os equipamentos que são instalados ao longo das linhas ou nas subestações. Contudo, a confiabilidade dos dados obtidos nas simulações está diretamente ligada à capacidade desses simuladores de reproduzirem os diversos fenômenos que podem ocorrer nos diversos componentes do sistema elétrico.

Conforme amplamente divulgado na literatura, o efeito corona assume um papel predominante na atenuação e distorção na forma de onda da tensão que se propaga pela linha de transmissão, principalmente em casos em que tais ondas viajam por longas distâncias. Trabalhos publicados recentemente mostram que, por mais que se leve em consideração a variação com a frequência dos parâmetros longitudinais, somente é possível obter resultados menos conservadores quando o efeito corona é representado nas simulações (CERVANTES et al., 2018). Esse fato reforça a importância de produzir modelos capazes de representar este fenômeno com o maior grau possível de precisão, com fácil implementação e baixo custo computacional.

1.2 Objetivos gerais

A presente pesquisa tem como principal objetivo o desenvolvimento de um novo método para representação do efeito corona em linhas de transmissão, para ser implementado em programas do tipo EMT e que permita a representação do fenômeno com boa precisão e baixo custo computacional.

1.3 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal foram identificados os seguintes objetivos específicos:

- a. Realizar uma análise a respeito dos fenômenos físicos que constituem a formação do efeito corona nas linhas de transmissão, buscando entender seu processo de formação e as suas principais características;
- b. Definição de sistemas testes a serem simulados. Nesta etapa, realiza-se o levantamento de dados de medições em campo disponíveis na literatura. Por meio desses dados é possível reproduzir tais experimentos nas simulações digitais e avaliar o desempenho de diferentes modelos através de comparações com os dados das medições.
- c. Análise do desempenho e da precisão de modelos de representação do efeito corona aplicáveis a programas do tipo EMT. Nessa etapa, diversos modelos de representação do efeito corona foram implementados no programa PSCAD. Foram realizadas diversas simulações, e os resultados obtidos são comparados com os dados de medições e campo a fim de avaliar a precisão dos mesmos.
- d. Desenvolvimento e implementação da nova metodologia para representação do efeito corona.
- e. Validação do modelo proposto por meio de comparação com resultados experimentais.

1.4 Contribuição da Pesquisa

No desenvolvimento deste trabalho foram realizadas algumas contribuições para o tema abordado, dentre as quais se podem destacar:

- 1) Apresentação de uma revisão geral a respeito do efeito corona em linhas de transmissão. Nesta revisão é apresentado desde o mecanismo físico que dá origem ao fenômeno, bem como os diferentes métodos empregados ao longo dos anos para sua modelagem e representação em linhas de transmissão. Ademais, também são descritos os principais experimentos realizados ao longo dos anos para avaliação da influência do efeito corona na propagação de ondas, onde são apresentados todos os dados necessários para reprodução desses experimentos em simulações computacionais.
- 2) Avaliação do desempenho de diversos modelos de efeito corona desenvolvidos para aplicação em programas do tipo EMT, onde se pode obter uma visão geral dos mesmos e determinar a precisão e eficiência de cada um. Adicionalmente,

nesta etapa também é construída uma rotina de suporte para implementação dos modelos analisados.

- 3) Apresentação de uma nova metodologia para representação do efeito corona em linhas de transmissão baseado no modelo Bergeron

1.5 Estrutura do trabalho

A presente dissertação está estruturada em 5 capítulos, cujo conteúdo é descrito a seguir.

No capítulo 1 é realizada uma breve introdução ao tema estudado, onde são apresentados a motivação, a relevância, a justificativa e os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre o efeito corona e como os modelos atuais consideram o fenômeno no cálculo de propagação de ondas em linhas de transmissão. Nesta etapa, inicialmente é descrita de maneira sucinta a física do efeito corona, e, posteriormente, são apresentados os principais métodos utilizados para modelagem e representação do fenômeno no cálculo de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão.

No capítulo 3 é apresentada uma avaliação do desempenho de diversos modelos de efeito corona disponíveis na literatura e que são aplicáveis a programas do tipo EMT. A implementação de tais modelos é realizada no programa PSCAD, e os resultados obtidos nas simulações são comparados com os dados de medições em campo.

No capítulo 4 é apresentada uma nova metodologia para representação do efeito corona em linhas de transmissão, sendo descritas a modelagem matemática e as principais características desse modelo. Ainda nesta etapa são realizados testes para validação do modelo proposto, onde se pode avaliar suas limitações, vantagens e desvantagens.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão a respeito dos principais temas relacionados à modelagem e representação do efeito corona em linhas de transmissão. Inicialmente nas seções 2.1 e 2.2 são apresentados alguns conceitos relacionados à física do efeito corona e as formulações para estimação do campo elétrico crítico. Contudo, o processo de descarga parcial em gases é um fenômeno extremamente complexo, sendo aqui tratado apenas superficialmente. Posteriormente, na seção 2.3, é apresentado um esquema que mostra como o efeito corona pode influenciar na propagação de ondas em linhas de transmissão. Na seção 2.4 são apresentados os métodos empregados para representação deste fenômeno no cálculo de propagação de ondas em linhas de transmissão. Por último, na seção 2.5 são descritos os métodos empregados para modelagem do efeito corona em regime transitório.

2.1 Mecanismo do efeito corona

Conforme definição apresentada em (BARROS, 1985), designa-se por efeito corona o conjunto de fenômenos que constituem o processo de disrupção parcial de um gás, o qual ocorre no campo elétrico não-uniforme que se verifica nas vizinhanças de um condutor elétrico sob tensão. Uma vez que o efeito corona não requer um agente exterior para ser mantido, este fenômeno configura-se como uma descarga autossustentada.

Em se tratando do processo de disrupção parcial de um gás, diversos fenômenos microscópicos estão envolvidos, como ionização por colisão eletrônica, excitação e desexcitação atômica, fotoionização, entre outros. Apesar do fato de que a grande maioria dos modelos de representação do efeito corona em linhas de transmissão baseia-se em uma perspectiva macroscópica, a apresentação dos fenômenos microscópicos é importante para que se possa compreender os limites de validade dos modelos existentes. Contudo, é oportuno destacar que o processo de descarga em gases é um fenômeno extremamente complexo, sendo que neste trabalho tais conceitos são abordados apenas superficialmente.

O primeiro ponto que se deve ressaltar é que, mesmo na ausência de campo elétrico, há na atmosfera processos naturais de ionização que ocorrem devido principalmente à incidência de raios cósmicos ou radioatividade natural. Contudo, verifica-se que os elétrons livres decorrentes deste processo de ionização possuem um tempo de vida extremamente curto (da ordem de 10^{-2} μ s), que pelo fato do oxigênio ser um gás eletronegativo absorve-os muito rapi-

damente. Deste modo, pode-se dizer que em condições normais a densidade de elétrons livres na atmosfera é praticamente nula (WATERS; JONES; BULCOCK, 1965), (CLADE; GARY; LEFEVRE, 1969), (BARROS, 1985). Por outro lado, elevando-se a intensidade de campo elétrico observa-se que depois de ultrapassado o valor do campo elétrico crítico (E_{crit}) a condutividade do ar cresce muito rapidamente devido ao aumento da densidade de elétrons livres e íons existentes no ar (ionização). Este aumento é decorrente do fato de que quando o campo elétrico ultrapassa o limite disruptivo do ar (dado pelo valor do campo elétrico crítico), o mesmo passa a desempenhar um papel predominante no processo de ionização.

O processo de ionização pode ser dividido em processo primário e processos secundários. O processo primário é conhecido como ionização por colisão eletrônica, que recebe este nome por ser o principal agente formador de elétrons livres nas descargas de corona. Os processos secundários são os demais processos que contribuem, em menor escala do que a ionização por colisão eletrônica, para liberação de elétrons livres e formação de íons (positivos ou negativos). Dentre esses processos, os mais importantes são a ionização a excitação e desexcitação atômica, fotoionização e dissociação de íons negativos. A descrição desses fenômenos é apresentada a seguir (BARROS, 1985), (ARRUDA, 2012):

Ionização por colisão eletrônica: Quando um elétron livre encontra-se nas proximidades de um condutor de uma linha de transmissão energizada, sabe-se que devido à presença do campo elétrico oriundo do condutor o elétron tende a ser acelerado e adquirir certa energia cinética, cujo valor depende da intensidade do campo elétrico e da pressão do ar no meio em que o elétron se encontra. Ao ser acelerado, este elétron pode colidir com outros átomos ou moléculas, sendo que desta colisão diferentes situações podem ocorrer, as quais dependem fundamentalmente da quantidade de energia cinética do elétron no momento da colisão.

No caso em que o elétron possui baixa energia cinética, a sua colisão com um átomo neutro resulta na captura do elétron por parte do átomo, ou seja, na formação de um íon negativo. Por outro lado, quando a energia cinética é suficientemente elevada, a colisão com um átomo neutro pode ser suficiente para arrancar um elétron do átomo, dando origem a um íon positivo e a outro elétron livre. Nessas circunstâncias, a partir do momento da colisão passam a existir dois elétrons livres, os quais serão novamente acelerados pelo campo elétrico e poderão provocar o surgimento de novos íons positivos e elétrons livres (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982). Este processo cumulativo é conhecido como avalanche de Townsend², cujo esquema representativo é apresentado na Figura 2.1.

² É fácil perceber que apesar da ionização por colisão eletrônica ser o principal fenômeno de ionização do efeito corona, este não pode se iniciar sozinho, já que sempre é necessária a existência de ao menos um elétron livre

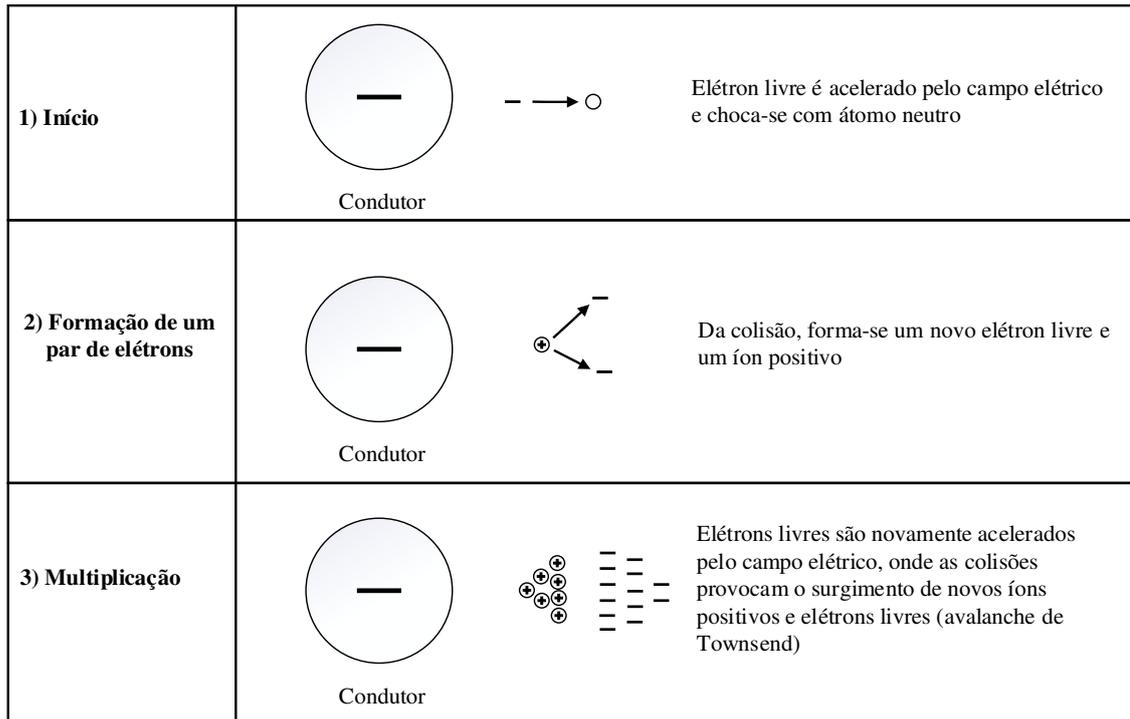


Figura 2.1 - Ionização por colisão eletrônica e formação da avalanche de Townsend. Caso em que o condutor da linha possui polaridade negativa³.

Excitação e desexcitação atômica: Um terceiro caso ocorre quando a energia produzida na colisão é elevada o suficiente para permitir a captura do elétron, mas não é suficiente para provocar a formação de um novo elétron livre. Nesse caso, parte da energia pertencente ao elétron é transferida para o átomo através do processo de excitação, e o átomo fica em um estado de energia não mínima. O estado de excitação dura cerca de aproximadamente 10^{-13} s, sendo que após este intervalo de tempo o átomo volta ao seu estado normal através do processo de desexcitação atômica, liberando energia por meio da emissão de fótons (caracterizando assim o aspecto luminoso do efeito corona) e de ondas eletromagnéticas de baixa frequência (radio interferência).

Fotoionização: Os fótons liberados no processo de desexcitação atômica podem ser absorvidos por átomos e dar origem a novos íons através do processo de fotoionização (ionização por absorção de fótons).

Dissociação de íons negativos: Quando o campo elétrico possui intensidade bastante elevada (acima de 68,4 kV/cm (BARROS, 1985)), este é capaz de promover a liberação de elétrons a partir de íons negativos. Deve-se destacar que este é um fenômeno que ocorre em

(ou elétron germe) para dar início à avalanche de Townsend. A formação do elétron germe pode ocorrer por processos naturais ou por dissociação de íons negativos, conforme explicado mais adiante.

³ Neste trabalho, todas as figuras sem indicação foram produzidas pelo autor.

menores proporções do que aqueles descritos anteriormente, uma vez que a intensidade de campo elétrico necessária para promovê-lo é maior do que aquela em que normalmente se dá a ocorrência efeito corona. Contudo, este fenômeno também assume papel importante, visto que em certos casos é por meio dele que ocorre a liberação do elétron germe, que dá início à avalanche de Townsend.

Evidentemente, além dos processos de ionização apresentados, ocorrem simultaneamente processos de recombinação, onde elétrons se chocam com íons positivos e são absorvidos pelos mesmos, dando origem a átomos neutros. Contudo, na ocorrência de efeito corona o número de recombinações é inferior ao número de ionizações, visto que caso contrário o fenômeno não ocorreria.

2.1.1 Corona em polaridade positiva e polaridade negativa

Sabendo-se que o sentido de movimentação do elétron depende da polaridade do campo elétrico no meio em que o elétron se encontra, é fácil perceber que existem diferenças significativas entre a ocorrência do efeito corona em polaridade positiva ou negativa. Além disso, a presença de cargas espaciais próximas à superfície do condutor provoca modificações na distribuição espacial de campo elétrico, sendo que em cada caso tal modificação ocorre de uma maneira diferente.

A Figura 2.2 apresenta um esquema representativo da ocorrência da avalanche de Townsend para o caso em que o condutor possui polaridade negativa (cátodo). Nessa figura também é apresentada a variação da intensidade do campo elétrico ao redor da superfície do condutor para os casos com e sem a presença de cargas espaciais.

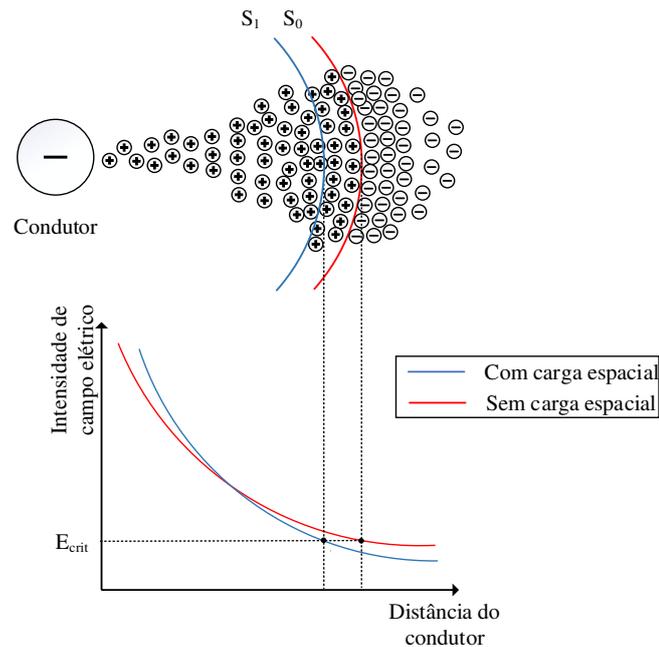


Figura 2.2 - Desenvolvimento da avalanche de Townsend e variação do campo elétrico para o caso em que o condutor possui tensão de polaridade negativa. Adaptado de (TRINH, 1995).

Inicialmente, considere que não há cargas espaciais próximas à superfície do condutor (início da avalanche de Townsend). Devido à polaridade da tensão, os elétrons são acelerados em sentido oposto ao condutor e, obviamente, a intensidade de campo elétrico se reduz continuamente na medida em que um observador se afasta do condutor. Desse modo, existe uma região a partir da qual a intensidade de campo elétrico não é mais suficiente para manter os processos de ionização, fazendo com que as avalanches sejam interrompidas. Na Figura 2.2, essa região é delimitada pela superfície S_0 (também chamada de superfície de contorno).

Como os elétrons se movem muito mais rapidamente do que os íons, os elétrons livres concentram-se na cabeça da avalanche durante o seu desenvolvimento, e à medida que a avalanche progride, vai se formando um aglomerado de íons positivos entre o condutor e a superfície de contorno. Quando os elétrons ultrapassam a superfície S_0 , esses tendem a ser capturados por átomos de oxigênio (pelo fato de os elétrons estarem com baixa energia cinética e o oxigênio ser um gás eletronegativo). Desse modo, dá-se a formação de íons negativos, que devido à baixa velocidade de deriva, tendem a se acumularem próximo à superfície de contorno (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969), (TRINH, 1995).

Depois de desenvolvidas as avalanches de Townsend e de serem formadas as cargas espaciais, a distribuição de campo elétrico é alterada. Basicamente, o que ocorre é que a presença das cargas espaciais aumenta a intensidade de campo nas regiões mais próximas do condutor, mas reduz o campo nas regiões mais próximas das cargas negativas. Obviamente, essa variação também altera a localização da região de ionização nula (demarcada pela super-

fície de contorno), que passa de S_0 para S_1 . Na Figura 2.2 são apresentadas a distribuição de campo elétrico e a localização da superfície de contorno para ambos os casos. Conforme pode ser observado, a presença das cargas especiais tende a diminuir o raio da região de ionização⁴.

A Figura 2.3 apresenta um esquema representativo da avalanche de Townsend no caso em que a tensão aplicada no condutor é de polaridade positiva (ânodo). Assim como no caso anterior, considere inicialmente que não existem cargas espaciais próximas à superfície do condutor (ou seja, início da avalanche de Townsend). Conforme pode ser observado, a avalanche desenvolve-se a partir da superfície de contorno (S_0) com direção à superfície do condutor (os elétrons são atraídos). Pelo fato de os elétrons se moverem mais rapidamente do que os íons se forma um aglomerado de íons positivos, cuja densidade é maior para regiões mais próximas do condutor devido ao sentido de evolução da avalanche. Sendo assim, é fácil perceber que nesse caso a combinação entre o condutor e as cargas espaciais (íons positivos) eleva a intensidade de campo elétrico para regiões mais afastadas⁵, fazendo com que a região de ionização zero ocorra para maiores distâncias do condutor (passando de S_0 para S_1 , conforme apresentado na Figura 2.3).

Os elétrons que são acelerados pelo campo elétrico acabam colidindo com a superfície do condutor. Contudo, devido à alta energia existente nessa colisão eles não podem ser absorvidos imediatamente. Como resultado, os elétrons tendem a se espalhar pela superfície do condutor, perdem energia através da ionização das moléculas de gás ou se recombinam com íons positivos (TRINH, 1995). Na Figura 2.3 é apresentada a distribuição do campo elétrico na direção radial para os casos com e sem a presença de cargas espaciais.

Perante as informações apresentadas, pode-se perceber que a complexidade do fenômeno cresce consideravelmente no caso da ocorrência do efeito corona em regime de tensão alternada, uma vez que a presença das cargas espaciais criadas em um determinado semiciclo afetam no processo de formação de cargas do semiciclo subsequente, além de existir um processo de recombinação entre íons positivos e negativos, os quais são atraídos ou repelidos de acordo com a polaridade da tensão aplicada. Adicionalmente, destaca-se que neste caso o deslocamento de partículas causado pela ação do campo elétrico contribui significativamente para o aumento das perdas, sendo este processo o principal agente causador de perdas por efeito corona em linhas de transmissão. Uma descrição mais detalhada a este respeito pode ser encontrada em (CLADE; GARY; LEFEVRE, 1969), (BARROS, 1985).

⁴ A ocorrência de uma região de ionização reduzida é uma característica da ocorrência do efeito corona em polaridade negativa. Conforme será mostrado adiante, para polaridade positiva o raio da região de ionização é maior.

⁵ Diversos processos secundários são observados durante a ocorrência de efeito corona em polaridade positiva, como a formação de *streamers*, *bursts* corona entre outros. Contudo, a descrição de tais fenômenos foge do escopo deste trabalho, e maiores informações podem ser encontradas em (TRINH, 1995).

Neste trabalho todas as análises serão realizadas para estudos de descargas atmosféricas, onde é suficiente a consideração da ocorrência do efeito corona em apenas uma das polaridades⁶. Além disso, conforme será apresentado na seção 2.5.1, verifica-se experimentalmente⁷ que no caso da ocorrência do efeito corona em polaridade positiva a densidade de cargas espaciais criadas é maior do que em polaridade negativa. Este fato faz com que, em termos de propagação de surtos em linhas de transmissão, o efeito corona em polaridade positiva provoque maiores distorções e atenuações do que em polaridade negativa (WAGNER; LLOYD, 1955), (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978).

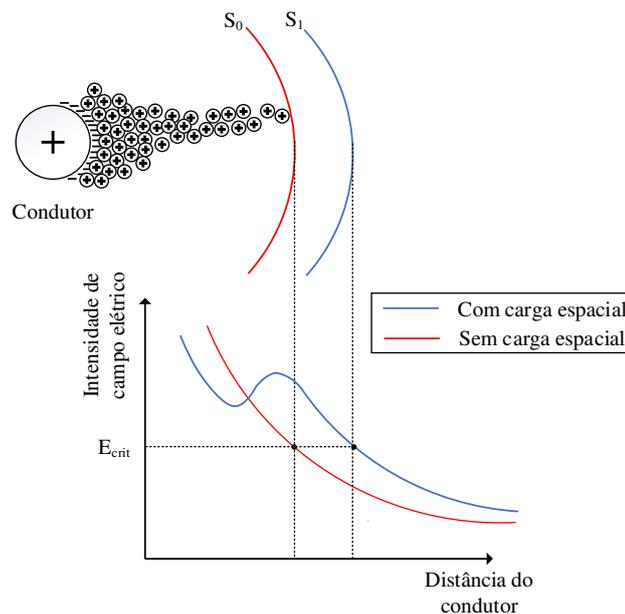


Figura 2.3 - Desenvolvimento da avalanche de Townsend e variação do campo elétrico para o caso em que o condutor possui tensão de polaridade positiva. Adaptado de (TRINH, 1995).

2.2 Campo elétrico crítico

Define-se campo elétrico crítico (E_{crit}) como o menor valor do campo elétrico na superfície do condutor a partir do qual se têm as condições necessárias para formação do efeito corona (ou desenvolvimento das avalanches autossustentadas) (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969). O valor do campo elétrico crítico é definido por diversos fatores, como raio do condutor⁸, número de condutores por feixe, umidade, pressão, temperatura, po-

⁶ Com exceção de casos onde a descarga atinge o condutor no meio do vão, visto que nessa situação as sobretensões resultantes apresentam caráter oscilatório e, portanto, valores positivos e negativos.

⁷ Tal constatação é obtida por meio de medições de curvas carga-tensão, que por praticidade são chamadas de curvas q-v.

⁸ Quanto menor o raio do condutor, maior será o valor do campo elétrico crítico. Isso ocorre porque ao se reduzir o raio do condutor, reduz-se também o raio da região de ionização.

laridade da tensão aplicada⁹, além da rugosidade superficial dos cabos¹⁰ (BARROS, 1985). Como alguns desses fatores variam ao longo do tempo e não podem ser determinados com precisão, as simulações para análise da influência do efeito corona costumam ser efetuadas para diferentes valores de campo elétrico crítico, visando analisar as diversas situações que podem ocorrer na linha de transmissão.

As primeiras formulações apresentadas para estimação do valor do campo elétrico crítico na superfície de um condutor cilíndrico foram apresentadas nos trabalhos (WHITEHEAD, 1910) e (PEEK, 1911). Após estes trabalhos precursores, diversas outras formulações empíricas e semi-empíricas foram desenvolvidas, dentre as quais se destacam as propostas por (SKILLING; DYKES, 1937), (HARTMANN, 1984) e (CIGRE, 1991). Tais formulações, juntamente com as apresentadas por Peek e Whitehead, são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Formulações para cálculo do campo elétrico crítico

Peek	$E_{crit} = 30m\delta \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r_0}} \right)$	(2.1)
Whitehead	$E_{crit} = 32m\delta \left(1 + \frac{0,297}{\sqrt{\delta \cdot r_0}} \right)$	(2.2)
Skilling-Dykes	$E_{crit} = 23m\delta^{0,67} \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r_0}} \right)$	(2.3)
Hartmann	$E_{crit} = 25,94m \left(1 + \frac{0,1269}{\left(\frac{r_0}{100} \right)^{0,4346}} \right)$	(2.4)
CIGRE	$E_{crit} = 23m \left(1 + \frac{1,22}{(2r_0)^{0,37}} \right)$	(2.5)

Nas equações (2.1) – (2.5), tem-se que:

E_{crit} : Campo elétrico crítico, em kV/cm;

r_0 : raio do condutor, em cm;

m : coeficiente de rugosidade ou fator de forma, o qual indica a rugosidade superficial do condutor e possui valor entre 0 e 1 (quanto mais lisa a superfície, mais próximo de 1);

⁹ O campo elétrico crítico tende a ser mais elevado em polaridade positiva do que em polaridade negativa, porém verifica-se experimentalmente que as diferenças não são significativas nas aplicações práticas (PALVA, 1972), (BARROS, 1985).

¹⁰ Na prática, verifica-se que a distribuição do campo elétrico na superfície do condutor é não uniforme. Desde modo, em determinados pontos o campo elétrico pode ser superior ao campo elétrico crítico, enquanto em outros pontos o mesmo não ocorre. Esse fato faz com que o efeito corona ocorra de maneira não homogênea ao longo do condutor.

δ : densidade relativa do ar, a qual pode ser obtida pela equação (2.6). Nessa equação, tem-se que p corresponde à pressão atmosférica, em mmHg, e θ corresponde à temperatura do ar, em °C.

$$\delta = \frac{0,392 \cdot p}{273 + \theta} \quad (2.6)$$

De posse do campo elétrico crítico, a tensão crítica pode ser calculada conforme apresentado na equação (2.7)¹¹ (HILEMAN, 1999), onde Z_0 é a impedância característica da linha (ou impedância de surto na ausência de efeito corona).

$$V_{crit} = \frac{Z_0 r_0 E_{crit}}{60} \quad (2.7)$$

A equação acima foi desenvolvida para casos em que a linha possui apenas um condutor por fase. Contudo, esta pode ser adaptada para condutores em feixe. Nesse caso, deve-se substituir o raio do condutor (r_0) pelo raio equivalente do feixe (r_{eq}), sendo este último calculado por meio da equação (2.8) (HILEMAN, 1999). Nessa equação, n corresponde ao número de subcondutores no feixe, e A é o espaçamento entre eles, em cm.

$$r_{eq} = \frac{nr_0}{1 + 2(n-1) \cdot \sin\left(\frac{\pi r_0}{nA}\right)} \quad (2.8)$$

2.3 Influência do efeito corona na propagação de ondas

Nas seções anteriores foi apresentada uma breve introdução do mecanismo de formação do efeito corona, bem como as formulações desenvolvidas ao longo dos anos para estimação do campo elétrico crítico. Nesta seção é apresentada a influência do efeito corona na propagação de ondas em linhas de transmissão.

Conforme apresentado, o processo de ionização promove a formação de cargas espaciais próximas à superfície do condutor. Em linhas gerais, este fenômeno provoca um aumento na capacitância entre o condutor e o solo (e também entre as fases da linha), devido à expansão da região de condução¹² e dos diversos fenômenos de ionização que ocorrem nas proximidades do condutor. Uma vez que a indutância da linha não sofre modificações, a elevação da capacitância provoca, simultaneamente, redução da velocidade de propagação e do valor da impedância característica (ou impedância de surto). Esta afirmação pode ser entendida com as equações (2.9) e (2.10), onde são apresentadas as equações referentes a uma

¹¹ Para obtenção dessa equação, considera-se que a rigidez dielétrica do ar é de 30 kV/cm.

¹² Alguns trabalhos representam o efeito corona apenas como um aumento no raio do condutor para cálculo da capacitância (MCCANN, 1943), (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982). Contudo, tal modelagem é bastante simplificada e deve ser evitada, uma vez que existem diversos outros fenômenos mais complexos associados ao processo de ionização, os quais não podem ser representados por meio de um simples aumento no raio do condutor.

linha de transmissão sem perdas, sendo que o mesmo conceito é válido para uma linha de transmissão com perdas. Nessas equações, L e C correspondem, respectivamente, à indutância e à capacitância por unidade de comprimento de uma linha monofásica, e ΔC corresponde à capacitância incremental decorrente do efeito corona.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C + \Delta C}} \quad (2.9)$$

$$v_{prop} = \frac{1}{\sqrt{L(C + \Delta C)}} \quad (2.10)$$

A redução da velocidade de propagação provoca distorção da forma de onda que, conforme apresentado na Figura 2.4, ocorre quando a tensão na linha ultrapassa a tensão crítica de corona. Por outro lado, a redução da impedância característica provoca atenuação da sobretensão. Contudo, é oportuno destacar que a redução da impedância característica é responsável por apenas uma pequena parcela na redução das sobretensões, uma vez que o transporte de íons é o principal responsável pelas perdas de efeito corona, e conseqüentemente, para redução das sobretensões (BARROS, 1985).

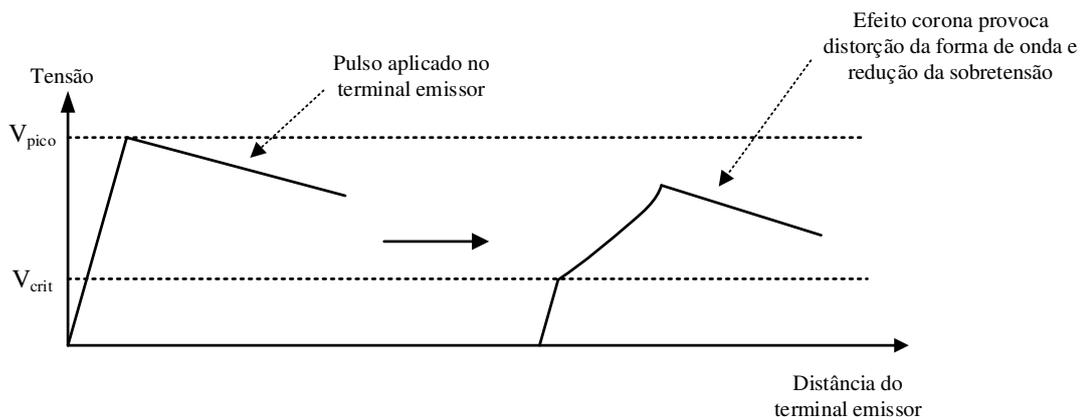


Figura 2.4 – Influência efeito corona na propagação de ondas.

Com relação à propagação de surtos atmosféricos, sabe-se que a dependência da frequência também contribui para atenuação e distorção das formas de onda (WATSON; ARRILLAGA, 2003). Apesar deste fato, o efeito corona possui um papel predominante, contribuindo de forma muito mais significativa na modificação dos sinais que se propagam ao longo da linha. Este assunto será abordado mais detalhadamente nos próximos capítulos.

2.4 Representação do efeito corona em linhas de transmissão

Nesta seção são apresentados os métodos normalmente adotados na literatura para representação do efeito corona no cálculo de propagação de ondas em linhas de transmissão. Em suma, pode-se dizer que esses métodos de representação se dividem em modelos físicos e modelos equivalentes. Uma descrição a respeito de tais modelos de representação é apresentada nas seções subsequentes.

2.4.1 Modelos físicos

Designa-se por modelos físicos aqueles que, para representação do efeito corona, realizam modificações nas equações que descrevem a propagação de ondas em linhas de transmissão. Desprezando-se a ocorrência do efeito corona e considerando-se uma linha monofásica sem perdas, tem-se as equações diferenciais da linha de transmissão no domínio do tempo:

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = C_0 \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.12)$$

Onde:

$v(x, t), i(x, t)$: Tensão e corrente no instante t a uma distância x do terminal emissor;

L_0 e C_0 : Indutância e capacitância da linha por unidade de comprimento, respectivamente.

Essas são equações diferenciais parciais de primeira ordem, as quais podem ser resolvidas analiticamente por diferentes métodos (PINTO, 2013). Por outro lado, levando-se em consideração a ocorrência do efeito corona, tem-se que a capacitância passa a ser função da tensão, assumindo características não-lineares:

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = C(v(x, t)) \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.13)$$

Infelizmente, as equações (2.11) e (2.13) não possuem solução analítica, sendo resolvíveis apenas numericamente (MIRANDA, 1994). Diversos autores utilizaram diferentes métodos para solução dessas equações, onde destaca-se o método das características (NAREDO; SOUDACK; MARTI, 1995), (RAMÍREZ et al., 2001), (DÁVILA et al., 2003), (DÁVILA; NAREDO; MORENO, 2005); método dos elementos finitos (MIRANDA, 1994), (MIRANDA et al., 1999); e método das diferenças finitas (UMOTO; HARA, 1969), (BARROS, 1985), (INOUE, 1985), (LI; MALIK; ZHAO, 1989a), (HUANG; ZHANG; TAO, 2018); sendo que em alguns desses trabalhos também é levada em consideração a dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência. Nesses modelos, também se utiliza a discretização espacial e temporal para solução das equações, onde o comprimento da linha é dis-

cretizado em intervalos da ordem de 7 metros; e o tempo em intervalos da ordem de alguns nanosegundos¹³. Obviamente, a precisão dos resultados obtidos está diretamente ligada ao nível de discretização utilizado¹⁴.

Além dos métodos que utilizam modificações nas equações de onda, recentemente foi apresentada uma série de trabalhos onde a modelagem da linha de transmissão é feita por meio das equações de Maxwell em 3D, sendo a solução das equações obtida por meio do método das diferenças finitas no domínio do tempo (THANG et al., 2012a), (THANG et al., 2012b), (THANG et al., 2012c) e (THANG et al., 2014). Nesses trabalhos avaliou-se a propagação de surtos eletromagnéticos e levou-se em consideração a ocorrência do efeito corona, contudo foi utilizado um modelo simplificado para representação do fenômeno.

Se os fenômenos fossem corretamente modelados pode-se dizer que os modelos físicos seriam os mais robustos para análise da influência do efeito corona na atenuação e distorção das ondas viajantes, já que a linha de transmissão passaria a ser considerada como um elemento não-linear a parâmetros distribuídos, reproduzindo o que ocorre na realidade. Contudo, em muitos casos estes modelos não são facilmente aplicáveis a qualquer linha de transmissão. Ademais, sabe-se que a grande maioria dos estudos a respeito de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência são realizados em programas do tipo EMT, onde os modelos de linha disponíveis desprezam a ocorrência do efeito corona. Deste modo, para utilização de modelos físicos é necessário que os mesmos sejam implementados em programas de cálculo no domínio do tempo, o que constitui uma tarefa laboriosa e muitas vezes inviável na prática.

2.4.2 Modelos equivalentes

Como uma alternativa à representação do efeito corona nas equações que descrevem a propagação de ondas, a grande maioria dos trabalhos existentes na literatura consideram a linha de transmissão como um elemento linear de parâmetros distribuídos, e o efeito corona é representado como um elemento concentrado e externo à linha. Nesse caso, a representação do efeito corona é feita através da subdivisão da linha em pequenos trechos (que para estudos de descargas atmosféricas são da ordem de algumas dezenas de metros), e na junção entre cada trecho é disposto um barramento em derivação, conforme apresentado na Figura 2.5.

¹³ Estes valores são adequados para estudo de descargas atmosféricas.

¹⁴ A discretização espacial da linha faz com que a tensão seja praticamente constante ao longo do trecho discretizado, o que corresponde a uma aproximação. Consequentemente, quanto menor o comprimento do trecho utilizado, menor será o erro associado.

Os barramentos em derivação podem possuir diferentes estruturas e características, as quais variam de acordo com o modelo de efeito corona utilizado, conforme será apresentado na seção 2.5. Todavia, independentemente do modelo adotado, o fato é que um determinado barramento permanece desconectado do sistema enquanto a tensão no ponto de junção entre os trechos for inferior à tensão crítica (ausência de efeito corona). Quando a tensão se torna superior à tensão crítica, o barramento em derivação é conectado, sendo que a sua adição visa reproduzir as principais características do efeito corona, que corresponde à atenuação e distorção das formas de onda.

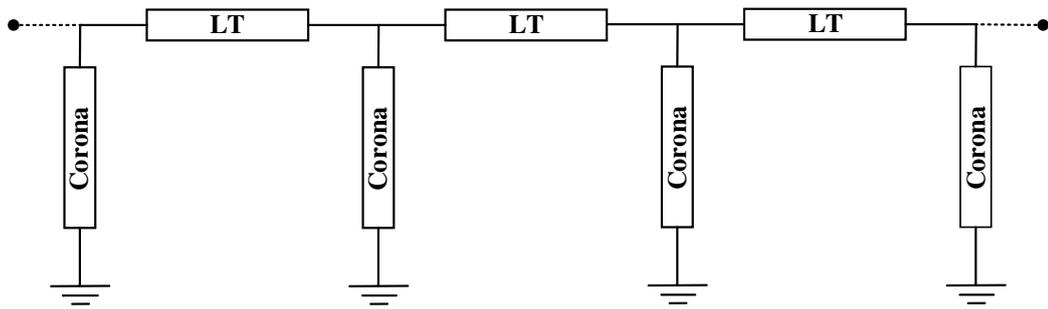


Figura 2.5 - Representação do efeito corona através de elementos concentrados e externos à linha.

A grande vantagem dessa metodologia consiste no fato de que esta pode ser facilmente aplicada a programas do tipo EMT, uma vez que os modelos de linha disponíveis nesses programas podem ser utilizados. Além disso, os modelos de efeito corona (os quais são dispostos nos barramentos em derivação) normalmente são formados por elementos de circuitos, como capacitores, resistores e fontes de corrente. Uma vez que esses componentes se encontram disponíveis nas bibliotecas desses programas, a representação do efeito corona não é complexa.

Apesar de tais facilidades, este método também apresenta algumas desvantagens, que dizem respeito à fidelidade na representação do fenômeno. Primeiramente, nesse caso o efeito corona é representado como um parâmetro concentrado, ao passo de que na realidade este fenômeno possui características distribuídas. Ademais, nesse caso as perdas por efeito corona são representadas pelo fluxo de corrente no circuito equivalente, o que também foge à verdadeira natureza do fenômeno, uma vez que as perdas por efeito corona se devem fundamentalmente ao transporte de íons.

2.5 Modelagem do efeito corona para aplicações em regime transitório

Nesta seção é apresentada uma revisão a respeito dos principais modelos desenvolvidos para representação do efeito corona em linhas de transmissão. Conforme apresentado na seção 2.1, o efeito corona é decorrente do processo de ionização do ar, cujo mecanismo é bastante complexo. Por este motivo, a grande maioria dos modelos de representação desenvolvidos para aplicação em linhas de transmissão não consistem na representação individual dos diversos fenômenos microscópicos que compõem o processo de ionização, uma vez que tal modelagem exigiria uma abordagem de natureza estocástica, fugindo do âmbito das simulações de transitórios em sistemas elétricos de potência (BARROS, 1985). Ao contrário, a abordagem usualmente adotada baseia-se em uma perspectiva macroscópica, visando representar as principais consequências do processo de ionização do ar, que é a elevação da capacitância da linha e o aumento das perdas.

Nesse contexto, diversos modelos foram propostos ao longo dos anos, os quais baseiam-se fundamentalmente em duas diferentes abordagens: 1) Modelagem a partir da curva carga-tensão; 2) Modelagem a partir da lei quadrática de Peek. Nas seções subsequentes é apresentada uma descrição a respeito desses métodos de modelagem.

2.5.1 Modelagem a partir da curva carga-tensão (q-v)

Como o próprio nome já indica, a curva q-v, também chamada de diagrama q-v, relaciona a tensão aplicada a um determinado condutor (ou feixe de condutores) e a carga espacial ao seu redor, donde é possível obter o valor da capacitância do sistema por meio da reta tangente, conforme apresentado na Figura 2.6. Nesse caso, a figura representa a forma típica da curva q-v normalmente obtida com a aplicação de um pulso de tensão cuja forma de onda é de uma dupla exponencial de polaridade positiva¹⁵.

¹⁵ Tal consideração é importante pelo fato de que, conforme será apresentado adiante, a curva q-v varia de acordo com a polaridade e a forma de onda da tensão aplicada.

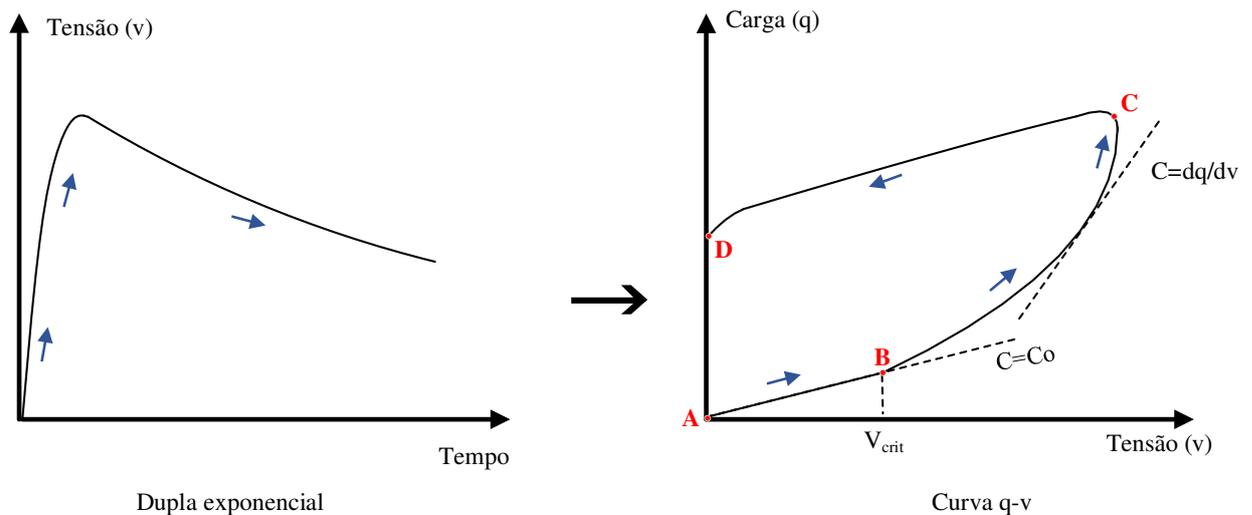


Figura 2.6 – Forma típica da curva q-v normalmente obtida na aplicação de dupla exponencial de polaridade positiva.

Conforme pode ser observado na Figura 2.6, para tensões inferiores a V_{crit} (pontos AB), a carga ao redor do condutor apresenta um crescimento linear, onde a capacitância é igual à capacitância geométrica da linha (C_0). Por outro lado, para tensões acima de V_{crit} (pontos BC) a carga passa a crescer mais rapidamente com a tensão e de forma não-linear, por causa da ionização do ar. Além disso, verifica-se que com o decréscimo da tensão (pontos CD) parte da carga tende a permanecer próxima à superfície do condutor, constituindo um fenômeno de histerese.

Existem outros aspectos importantes relacionados à formação da curva q-v, os quais são descritos resumidamente a seguir:

- A área enlaçada pela curva representa as perdas por efeito corona, conforme apresentado na equação (2.14) (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978).

$$P_{corona} = \oint v(t) dq \quad (2.14)$$

Conforme discutido anteriormente, na ocorrência do efeito corona ocorre uma distorção das formas de onda provocada pela elevação da capacitância, ao passo que a atenuação das sobretensões está majoritariamente ligada às perdas provocadas por este fenômeno. Desse modo, é fácil perceber que quanto maior a área enlaçada pela curva q-v, maior será a atenuação das sobretensões.

- O formato da curva q-v varia de acordo com a forma de onda da tensão aplicada (WAGNER; LLOYD, 1955), (WEI-GANG; XIAO-PING, 1997), (HUANG; ZHANG, 2016). Como exemplo, na Figura 2.7 é apresentada a forma típica da curva q-v resultante da aplicação de uma forma de onda senoidal (60 Hz), e na Figura 2.8 é apresen-

tado a forma típica da curva q-v resultante da aplicação de um pulso de tensão unipolar amortecido.

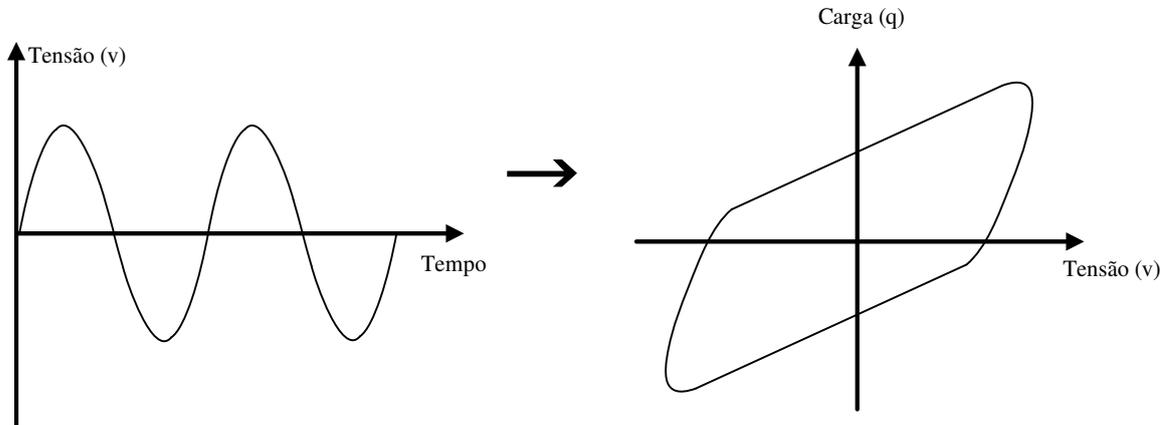


Figura 2.7 – Forma típica da curva q-v resultante da aplicação de uma forma de onda senoidal (60 Hz) (MARUVADA; NGUYEN; HAMADANI-ZADEH, 1989).

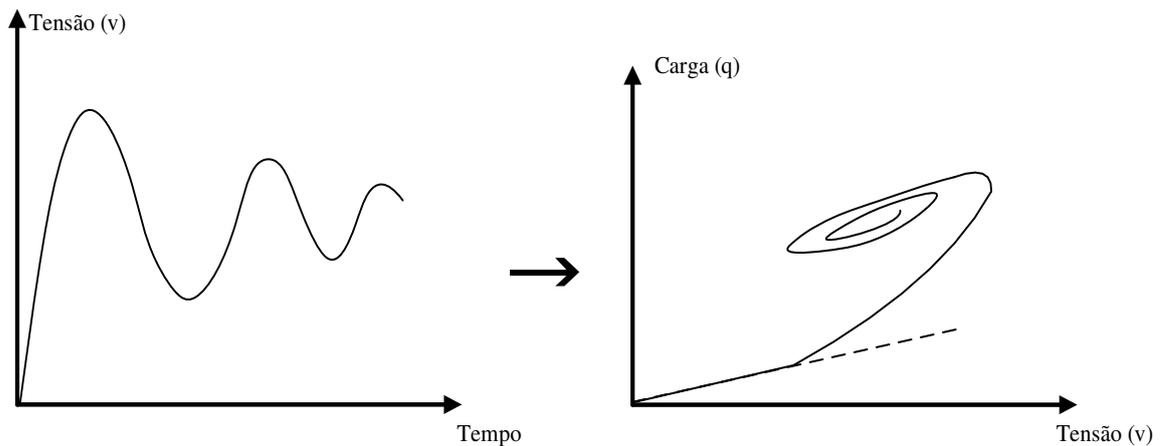


Figura 2.8 - Forma típica da curva q-v resultante da aplicação de um pulso de tensão unipolar amortecido (WEI-GANG; XIAO-PING, 1997).

- Para pulsos de tensão de polaridade negativa observa-se que após ultrapassado o valor da tensão crítica o aumento da carga espacial é menos acentuado do que em polaridade positiva, conforme apresentado na curva (Figura 2.9). Isso ocorre pois, conforme apresentado na seção 2.2, em polaridade positiva a densidade de cargas espaciais próximas à superfície do condutor é maior.

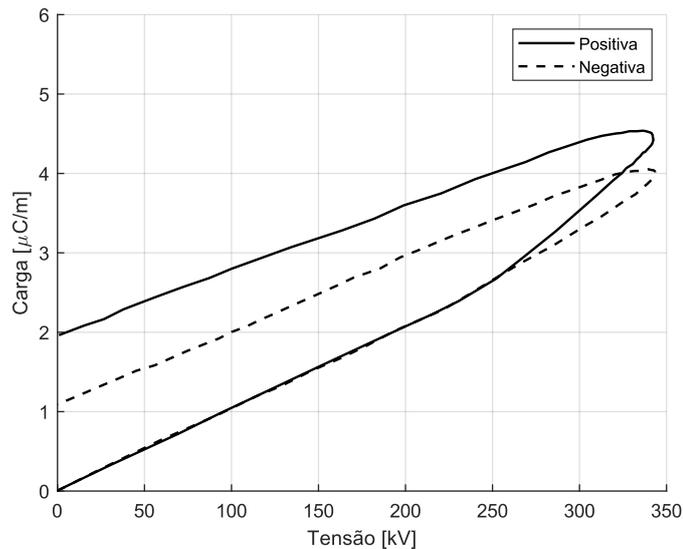


Figura 2.9 - Comparação entre curvas q-v obtidas para pulsos de tensão de polaridade positiva e negativa. As curvas apresentadas nessa figura foram obtidas através de medições em um condutor ACSR de 30,48 mm de diâmetro (MARUVADA; MENEMENLIS; MALEWSKI, 1977).

Analisando-se a Figura 2.9, pode-se perceber que em polaridade negativa a capacitância varia menos, bem como a área enlaçada pela curva é menor. Desse modo, é fácil perceber que o efeito corona possui menor relevância nesta polaridade, já que a atenuação e distorção causada pelo fenômeno é menor do que em polaridade positiva. Tal fato é comprovado experimentalmente em trabalhos que analisam a influência do efeito corona na propagação de surtos (WAGNER; LLOYD, 1955), (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978).

- O valor da tensão a partir da qual observa-se a formação do efeito corona (crescimento não-linear da carga) pode variar de acordo com a frequência do sinal aplicado.

Conforme apresentado anteriormente, uma vez que o campo elétrico na superfície do condutor tenha atingido o valor do campo elétrico crítico, surgem as condições necessárias para que se inicie o processo de ionização do ar (avalanche de Townsend). Contudo, para começar o processo da avalanche é preciso que exista ao menos um elétron germe (elétron livre que dá início à avalanche), e a probabilidade de que tal elétron exista no mesmo instante em que é atingido o valor do campo elétrico crítico é praticamente nula. Desse modo, o início do processo de ionização ocorre em um certo tempo após atingido o valor do campo elétrico crítico, sendo este tempo da ordem de microssegundos.

Como exemplo, na Figura 2.10 são apresentadas medições de diferentes curvas q-v que representam sobretensões de chaveamento (260/2700 μ s) e descargas atmosféricas (2,5/60 μ s), sendo que em ambos os casos a forma de onda da tensão aplicada corresponde à

uma dupla exponencial, onde variou-se o valor de pico. No caso em que a tensão varia mais lentamente (sobretensões de chaveamento), tem-se que o tempo necessário para formação do elétron germe é muito curto se comparado à taxa de variação da tensão no tempo, e nesse caso a tensão de início do efeito corona coincide com a tensão crítica. Como pode ser observado, variando-se o valor de pico da tensão aplicada tem-se que em todos os casos o efeito corona tem início quando $v = V_{crit}$. Por outro lado, no caso em que a taxa de variação da tensão é elevada (descargas atmosféricas), o tempo de formação do elétron germe passa a ser relevante, fazendo com que a tensão de início de efeito corona ocorra para valores maiores do que o da tensão crítica, conforme pode ser observado na Figura 2.10(b). Nesse caso, tem-se que quanto maior a taxa de crescimento da tensão no tempo, maior a tensão de início de corona.

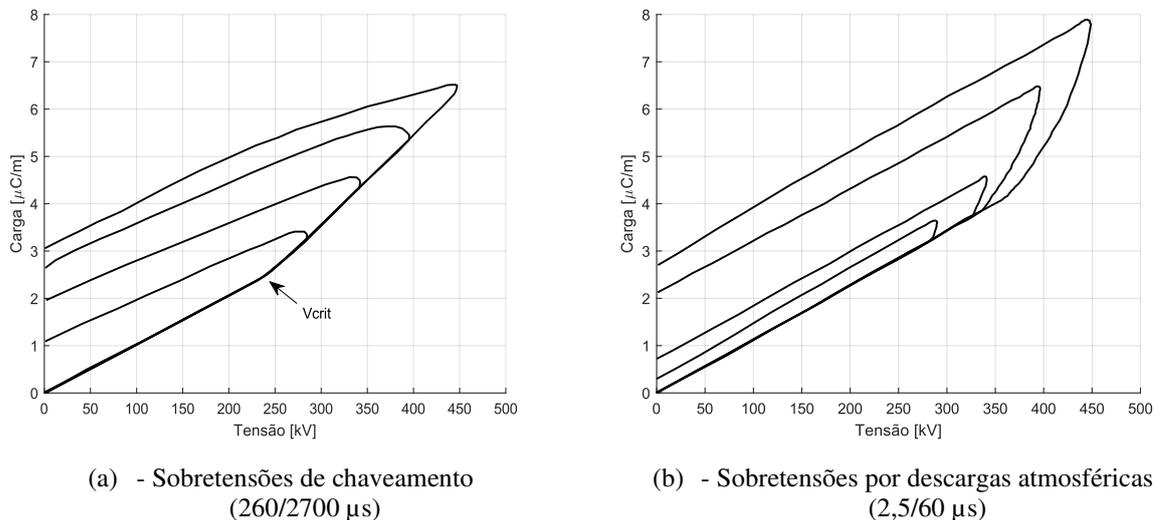


Figura 2.10 - Comparação entre curvas q-v obtidas para sobretensões de chaveamento e sobretensões por descargas atmosféricas. As curvas apresentadas nessa figura foram obtidas através de medições em um condutor ACSR de 30,48 mm de diâmetro (MARUVADA; MENEMENLIS; MALEWSKI, 1977).

Uma importante consideração deve ser feita com relação aos métodos utilizados para obtenção da curva q-v, onde basicamente podem-se utilizar métodos experimentais ou simulações computacionais. Conforme o próprio nome já indica, os métodos experimentais consistem em obter a curva q-v de um determinado condutor (ou feixe de condutores) através de medições. Essas medições normalmente são feitas em gaiolas de corona, mas também podem ser utilizados métodos alternativos, como descrito em (NODA, 1996). Fazendo frente aos métodos experimentais, existem modelos que permitem a obtenção da curva q-v diretamente por meio de simulações computacionais. A partir da geometria da linha e de constantes físicas, esses modelos são capazes de reproduzir a curva q-v com relativa precisão. Dentre estes trabalhos destaca-se o método das diferenças finitas de M. T. Correia de Barros

(BARROS, 1985) e o modelo das “casca de corona”, proposto inicialmente por (CLADE; GARY; LEFEVRE, 1969).

O modelo de M. T. Correia de Barros realiza a discretização do espaço em torno do condutor em regiões coaxiais. Em seguida, equações que descrevem a distribuição de campo elétrico, conservação de partículas com recombinação, desenvolvimento de *streamers* e ionização são resolvidas simultaneamente nas fronteiras das regiões coaxiais. Esta metodologia foi inicialmente desenvolvida para aplicações em regime estacionário (CA) e transitórios lentos (chaveamentos) (BARROS, 1985), e posteriormente foi aprimorada para aplicações em transitórios rápidos (descargas atmosféricas) (BARROS; JESUS, 1994), (JESUS; BARROS, 1994), (HUANG; ZHANG; XIAO, 2016). Por outro lado, o modelo de “casca de corona” baseia-se no fato de que as cargas espaciais geradas pela ionização do ar em torno do condutor assumem o formato de uma casca cilíndrica, cuja polaridade é a mesma da tensão aplicada ao condutor. A partir desta consideração são desenvolvidas equações que permitem descrever a relação existente entre a tensão aplicada e a carga resultante. Esta metodologia foi proposta pela primeira vez em 1969 (CLADE; GARY; LEFEVRE, 1969), e posteriormente foi adaptada para aplicação em regime transitório (SEMLYEN; WEI-GANG, 1986), (AL-TAI et al., 1989), (GUILLIER; POLOUJADOFF; RIOUAL, 1995), (NODA et al., 1999).

Independentemente do método utilizado para obtenção da curva q-v, perante as informações apresentadas pode-se perceber a dificuldade existente para representação do efeito corona em linhas de transmissão, uma vez que a curva q-v não possui um formato padrão e depende de diversos fatores, os quais não podem ser facilmente descritos matematicamente. De qualquer forma, uma vez conhecida a curva q-v para um determinado condutor, a representação do efeito corona no cálculo de propagação de ondas consiste em representar essa curva, onde podem-se utilizar tanto elementos de circuito como equações matemáticas, conforme apresentado a seguir.

2.5.1.1 Representação da curva q-v por elementos de circuito

Nesse método de representação podem-se utilizar fontes de tensão CC, diodos, resistores e capacitores para reproduzir as características da curva. Como esses elementos normalmente encontram-se disponíveis nas bibliotecas dos programas do tipo EMT a sua implementação pode ser facilmente realizada, o que constitui uma grande vantagem.

A Figura 2.11 apresenta o esquema proposto por Wagner e Lloyd (WAGNER; LLOYD, 1955) para representação da curva q-v. Estes foram os primeiros autores a utilizarem

elementos de circuito para representação do efeito corona, em 1955. Basicamente, o procedimento utilizado consiste em dispor o circuito equivalente na junção entre os trechos de linha, conforme apresentado na seção 2.4.2. Desse modo, quando a tensão na linha ultrapassa o valor de V_1 , o diodo fica diretamente polarizado, e assim capacitância C_1 é adicionada ao sistema. Analogamente, quando a tensão na linha se torna superior a V_2 , a capacitância C_2 é adicionada ao sistema.

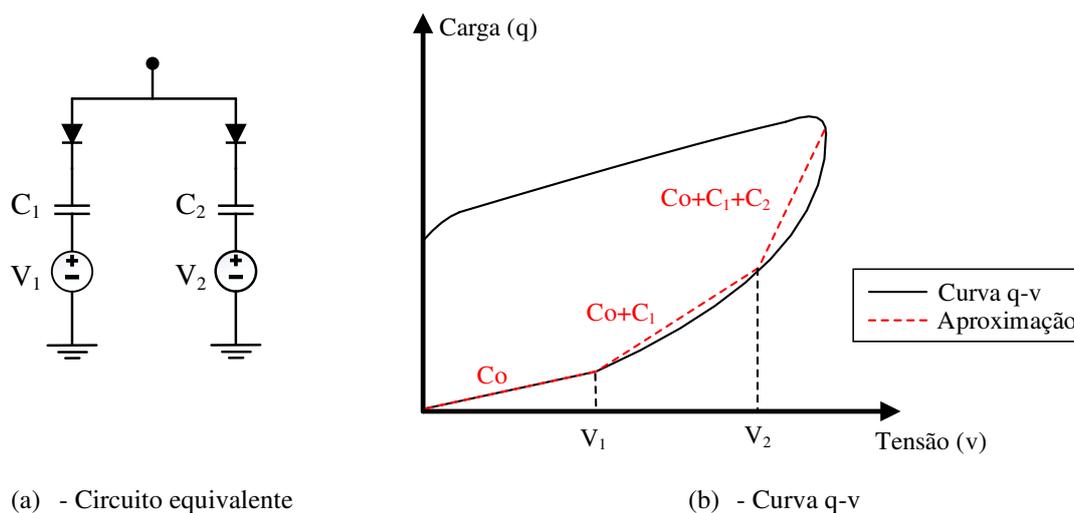


Figura 2.11 - Representação da curva q-v por meio de elementos de circuito (modelo de Wagner e Lloyd (WAGNER; LLOYD, 1955)).

Após o trabalho precursor de Wagner e Lloyd, diversos outros pesquisadores basearam-se em elementos de circuito para representação do efeito corona em linhas de transmissão (MARUVADA; MENEMENLIS; MALEWSKI, 1977), (PORTELA, 1978), (KUDYAN; H-SHIH, 1981), (CHRISTOPOULOS, 1985), (SANTIAGO; CASTELLANOS, 1992), sendo que a principal diferença entre tais modelos consiste no esquema adotado para representação da curva, especificamente por linearização por partes ou modelos não-lineares.

Independentemente do modelo utilizado, o fato é que a representação da curva q-v por meio de elementos de circuito possui algumas limitações. Basicamente, a principal limitação está relacionada ao fato de que, conforme apresentado anteriormente, a tensão de início de corona depende da frequência do pulso de tensão aplicada, sendo maior para pulsos de frequências mais elevadas. Como nesse caso a tensão de início do efeito corona é representada por uma fonte de tensão CC, não se pode representar a dependência da frequência^{16,17}.

¹⁶ Na literatura, é usual a designar por modelos estáticos aqueles que não representam a dependência da frequência, e por modelos dinâmicos aqueles que a representam.

¹⁷ Pelo conhecimento do autor, o único modelo de representação da curva q-v formado por elementos de circuito e capaz de representar a dependência da frequência é o de (MARTÍ; CASTELLANOS; SANTIAGO, 1995). Contudo, este modelo não é adequado para aplicações práticas devido à complexidade para determinação dos valores dos parâmetros do circuito equivalente.

2.5.1.2 Representação da curva q-v por modelos matemáticos

Designa-se por modelos matemáticos aqueles que realizam a representação da curva q-v por meio de equações. Nesse caso, para representação em programas do tipo EMT normalmente utiliza-se o método da compensação, onde as equações do modelo de corona interagem com o programa principal (DOMMEL, 1971).

Uma das grandes vantagens existentes em representar a curva q-v por modelos matemáticos se deve à possibilidade de produzir representações mais robustas, capazes de descrever com melhor precisão as características da curva. Nesse âmbito, (GARY; TIMOTIN; CRISTESCU, 1983) inicialmente utilizaram equação de retas (linearização por partes) para descreverem aproximadamente o formato da curva q-v, conforme apresentado na Figura 2.12. Este modelo é capaz de representar com relativa precisão as principais características da curva, incluindo a dependência da frequência. Posteriormente, (C.GARY; CRISTESCU; DRAGAN, 1989) utilizaram um modelo de regressão parabólicas para proporcionar uma representação não-linear da curva q-v, embora nesse caso a dependência da frequência não tenha sido representada.

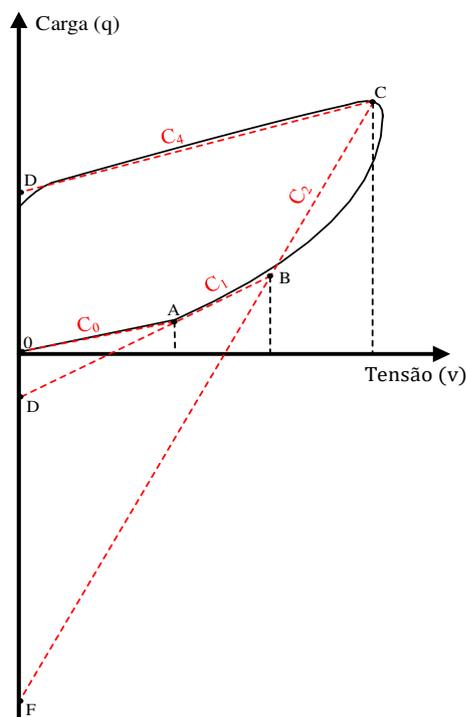


Figura 2.12 - Representação da curva q-v através de linearização por partes (GARY; TIMOTIN; CRISTESCU, 1983).

Baseando-se em estudos sobre não-linearidades em materiais com viscoplasticidade, (MIHĂILESCU-SULICIU; SULICIU, 1981) utilizaram um tipo de equação constitutiva para representação do efeito corona. Esse modelo é capaz de representar com boa precisão as ca-

racterísticas dinâmicas da curva, principalmente com relação à dependência da frequência e à não-linearidade, produzindo diferentes curvas de acordo com a frequência do sinal aplicado, conforme ocorre na realidade. Apesar deste fato, muitas vezes o modelo não é adequado para aplicações práticas. Além disso, a obtenção dos parâmetros necessários para sua implementação constitui um processo trabalhoso, e só pode ser realizada caso haja medições da curva q-v para diferentes situações. No capítulo 3 é realizada a implementação de alguns desses modelos (incluindo o de Siliciu), onde são apresentadas maiores discussões a este respeito.

2.5.2 Modelagem a partir da lei quadrática de Peek

Fazendo frente aos modelos que baseiam-se na curva carga-tensão para determinar a variação da capacitância da linha em função da tensão, alguns pesquisadores basearam-se na Lei Quadrática de Peek (PEEK, 1912) e em procedimentos empíricos para desenvolverem equações que relacionam a tensão aplicada ao condutor com a capacitância e a condutância transversal da linha. Este método foi inicialmente apresentado como um modelo físico, e posteriormente foi adaptado para aplicações em programas do tipo EMT.

Conforme apresentado anteriormente, desprezando-se as perdas longitudinais e o efeito corona, o fenômeno de propagação de ondas em linhas de transmissão pode ser expresso pelas equações diferenciais (2.11) e (2.12) (apresentadas na seção 2.4.1). Assim, baseando-se no trabalho de (SKILLING; DYKES, 1937) e em métodos empíricos, (UMOTO; HARA, 1969) incluíram termos adicionais a essas equações¹⁸, conforme apresentado em (2.15) e (2.16).

$$-\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = C_0 \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\sigma_c \sqrt{r/2h} \cdot 10^{-11}}{v} \frac{\partial (v - V_{crit})^2}{\partial t} + \frac{\sigma_g \sqrt{r/2h} \cdot 10^{-11}}{v} (v - V_{crit})^2 \quad (2.16)$$

Onde:

v : Tensão aplicada ao condutor sob corona;

V_{crit} : Tensão crítica (ou tensão de início de corona);

r e h : Raio e altura do condutor com relação ao solo, respectivamente;

¹⁸ Os termos adicionais são apresentados em negrito.

σ_c e σ_G : Constantes de perda de corona associadas à capacitância transversal e à condutância transversal, respectivamente, que são obtidas experimentalmente.

Como pode ser observado na equação (2.16), o primeiro termo representa a própria capacitância geométrica da linha, ao passo que o segundo e o terceiro termos representam, respectivamente, a parcela incremental na capacitância e a condutância transversal, os quais são termos não-lineares e dependentes da tensão.

Uma vez que o modelo insere modificações nas equações que descrevem a propagação de ondas em linhas de transmissão, este pode ser classificado como um modelo físico. Nessas circunstâncias, (LEE, 1983) baseou-se nas equações propostas no trabalho de Umoto e Hara e apresentou um modelo adequado para aplicação em programas do tipo EMT, onde basicamente o autor utilizou capacitores e resistores não-lineares para representar as parcelas incrementais na capacitância e condutância transversais.

Posteriormente, (MOTOYAMA; AMETANI, 1987) basearam-se no trabalho de K. Lee e apresentaram um modelo linear de efeito corona, o qual pode ser facilmente implementado em programas do tipo EMT. Nesse caso, ao invés de representar a capacitância e a condutância transversal como elementos não-lineares, os autores utilizaram linearização por partes, onde considerou-se suficiente a representação de três ramos de condutâncias e capacitâncias incrementais. Deste modo, o modelo pode ser representado utilizando-se fontes de tensão CC, diodos, resistores e capacitores.

É oportuno ressaltar que apesar das formulações propostas por Umoto e Hara terem sido originalmente desenvolvidas para aplicação em regime estacionário, nos trabalhos de K. Lee e de Ametani e Motoyama estas formulações foram aplicadas para análises em regime transitório (LEE, 1983), (NAGAOKA; MOTOYAMA; AMETANI, 1987), (MOTOYAMA; AMETANI, 1987). Conforme apresentado nos trabalhos citados, os resultados obtidos nas simulações foram comparados com dados de medições em campo, podendo ser observada boa concordância entre eles.

2.6 Experimentos para avaliação da influência do efeito corona na propagação de surtos em linhas de transmissão

Uma grande dificuldade relacionada ao estudo e modelagem do efeito corona em linhas de transmissão se deve à escassez de experimentos nessa área. Apesar de diversos modelos terem sido apresentados ao longo dos anos, poucos pesquisadores realizaram medições em campo a fim de avaliar como este fenômeno afeta a propagação de ondas. Além disso, nem

todos os experimentos realizados encontram-se descritos detalhadamente na literatura, onde muitas vezes não são fornecidos os dados necessários para representação nas simulações computacionais. Além disso, para avaliação de alguns modelos de corona é necessário que existam medições da curva q-v para o condutor utilizado na linha, caso contrário o modelo não pode ser implementado. Consequentemente, tais fatos dificultam a validação e análise do desempenho de modelos existentes, uma vez que a melhor maneira de se realizar tal avaliação é por meio de comparação com dados de medições em campo¹⁹.

De modo geral, pode-se dizer que as medições mais bem relatadas na literatura foram realizadas pela *American Gas and Electric Company*, também conhecido como medições na linha Tidd 500 kV ou experimentos de Wagner. Tais medições foram descritas detalhadamente em uma série de artigos publicados entre os anos de 1947 e 1955, os quais descrevem equipamentos, métodos e procedimentos utilizados, bem como resultados obtidos e principais análises (LANE et al., 1947), (PETERSON et al., 1947), (GROSS; MCCOY; SHEADEL, 1947), (LANE; WYMAN, 1947), (TREMAINE; LIPPERT, 1947), (WAGNER et al., 1947), (WAGNER; GROSS; LLOYD, 1954), (WAGNER; LLOYD, 1955). É oportuno ressaltar que esses experimentos foram realizados em uma linha experimental de 2,3 km, onde pulsos de tensão foram aplicados no terminal emissor e medições da forma de onda foram realizadas ao longo da linha. Posteriormente, em 1978, a companhia *Électricité de France* realizou medições em uma linha real de 220 kV e 65 km (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978). Pelo fato de ser utilizada uma linha de maior comprimento, pode-se avaliar a influência do efeito corona quando os surtos se propagam a distâncias de até 10 km, constituindo uma grande vantagem dessas medições. Descrições mais detalhadas à respeito dos experimentos nas linhas Tidd e EDF são apresentadas nos apêndices A e B, respectivamente.

Em 1983, o CRIEPI (*Central Research Institute of Electric Power Industry* - Japão) realizou medições em uma linha experimental de pouco mais de 1 km (INOUE, 1983), sendo que nos experimentos foram aplicados pulsos de tensão com formas de ondas não-convencionais. Infelizmente não foi possível obter uma descrição mais detalhada a respeito desses experimentos para que estes pudessem ser reproduzidos e utilizados nas simulações computacionais para avaliação do desempenho de modelos de corona.

Mais recentemente, foram realizadas medições na *China UHV AC Test Base* (HE et al., 2015). Nesse caso, avaliou-se a influência do efeito corona em uma linha de 500 kV, mas infelizmente o comprimento analisado na propagação de ondas foi de apenas 200 m. Além

¹⁹ Observa-se que em certos casos existem medições da curva q-v para um determinado condutor, mas não existem medições deste para propagação de ondas. Por outro lado, há casos em que existem medições de propagação de ondas, mas não existem medições da curva q-v para o condutor utilizado na linha.

dos experimentos citados, ao longo dos anos algumas outras medições foram realizadas para avaliação da influência do efeito corona na atenuação e distorção de sobretensões (ZAYIENTS; KOSTENKO; LYAPIN, 1958), (MARTINEZ; GOLDSWORTHY; HORTON, 2014).

Diferentemente das medições para avaliação da influência do fenômeno na propagação de ondas, pode-se encontrar uma grande quantidade de dados na literatura com relação às medições de curvas q-v, as quais foram feitas para diferentes condutores ou feixe de condutores. Dentre as principais, destacam-se as realizados pelo IREQ (MARUVADA; NGUYEN; HAMADANI-ZADEH, 1989) e (MARUVADA; MENEMENLIS; MALEWSKI, 1977), Kansai TLO Co (NODA, 1996), EDF (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978) e *China UHV AC Test Base* (YANG; CHEN; HE, 2013), (HE et al., 2015), (HUANG; ZHANG, 2016).

3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS DE EFEITO CORONA APLICÁVEIS A PROGRAMAS DO TIPO EMT

Conforme descrito no capítulo anterior, ao longo dos anos foram apresentados diversos modelos para representação do efeito corona em linhas de transmissão, onde verifica-se que a grande maioria desses modelos foram desenvolvidos para aplicação em programas do tipo EMT. Isso ocorre pelo fato de que estes programas são altamente versáteis, permitindo a representação de diversos componentes de um sistema elétrico de potência. Contudo, como o efeito corona é um fenômeno extremamente complexo, representá-lo no domínio do tempo requer diversas simplificações e, conseqüentemente, a precisão dos resultados obtidos com cada modelo também pode variar de acordo com as premissas adotadas na sua elaboração.

Nessas circunstâncias, este capítulo apresenta uma avaliação do desempenho de diversos modelos de representação do efeito corona desenvolvidos para aplicação em programas do tipo EMT. Para tal avaliação, os modelos analisados foram implementados no *software* PSCAD, e os resultados obtidos foram comparados com dados de medições em campo. A fim de se produzir uma melhor avaliação, realizaram-se comparações com dados das medições nas linhas Tidd e EDF²⁰, onde buscou-se reproduzir tais experimentos com a maior fidelidade possível. Como esses experimentos possuem características bem diferentes, o autor deste trabalho acredita que esta é uma maneira eficiente de avaliar o desempenho de cada modelo.

É oportuno ressaltar que um procedimento semelhante foi apresentado em (CARNEIRO; MARTI, 1991). Contudo, a avaliação aqui realizada difere do trabalho citado em diversos aspectos, os quais são descritos resumidamente a seguir:

- No presente trabalho avaliou-se o desempenho de um maior número de modelos. Ao todo foram avaliados 5 modelos de efeito corona, dentre os quais tem-se modelos lineares estáticos, não-lineares estáticos e não-lineares dinâmicos.

²⁰ A justificativa para adoção dos experimentos Tidd e EDF como base para avaliação dos modelos se deve basicamente a três fatores: 1) O comprimento das linhas utilizadas nos testes permitem uma melhor avaliação da influência do efeito corona na propagação de ondas, 2) Conforme já discutido anteriormente, alguns modelos de efeito corona somente podem ser aplicados se houver medições da curva q-v para o condutor utilizado na linha. Verifica-se que tal premissa é atendida nesses experimentos, 3) Dentre os experimentos relatados na literatura, esses são os mais estudados.

- Tanto a implementação dos modelos quanto a representação das linhas de transmissão foram realizadas de forma mais bem elaborada. Isso se deve ao fato de que no trabalho de Sandoval e Martí as linhas de transmissão dos experimentos Tidd e EDF foram modeladas como monofásicas, onde representou-se apenas a fase incidente. Neste trabalho as linhas são representadas como trifásicas, de modo a produzir uma representação mais próxima daquela que foi utilizada nos experimentos²¹.
- Neste trabalho realizou-se um maior número de comparações entre as formas de onda medidas e simuladas, avaliando principalmente o desempenho dos modelos nos casos em que os surtos se propagam por maiores distâncias.
- Para representação da linha de transmissão, no trabalho de Sandoval e Martí foi utilizado o modelo de linha dependente da frequência no domínio dos modos (modelo de J. Martí) (MARTI, 1982), enquanto neste trabalho foi utilizado o modelo dependente da frequência no domínio das fases, também conhecido como *Universal Line Model* (MORCHED; GUSTAVSEN; TARTIBI, 1999).

3.1 Implementação computacional e testes iniciais

Nesta seção são apresentados os conceitos preliminares à respeito da implementação dos sistemas utilizados nas simulações, bem como são apresentadas e discutidas algumas análises iniciais.

As Figuras 3.1(a) e 3.1(b) apresentam, respectivamente, os esquemas gerais utilizados para representação dos experimentos Tidd e EDF no *software* PSCAD. Conforme pode ser observado, cada sistema é composto por gerador de impulso (fonte de tensão ideal), linha de transmissão e resistores de terminação, cuja resistência é igual à impedância característica da linha (linha casada na extremidade). Deve-se ressaltar que descrições mais detalhadas à respeito da geometria das linhas, condutores utilizados, resistividade dos solos e outros parâmetros necessários para representação dos sistemas nas simulações são apresentados nos apêndices A e B.

²¹ Conforme será melhor discutido no capítulo 4, no caso da linha Tidd observa-se que os experimentos podem ser reproduzidos nas simulações computacionais representando-se apenas a fase incidente. Contudo, o mesmo não ocorre para o caso da linha EDF, uma vez que as fases adjacentes exercem influência nos resultados obtidos.

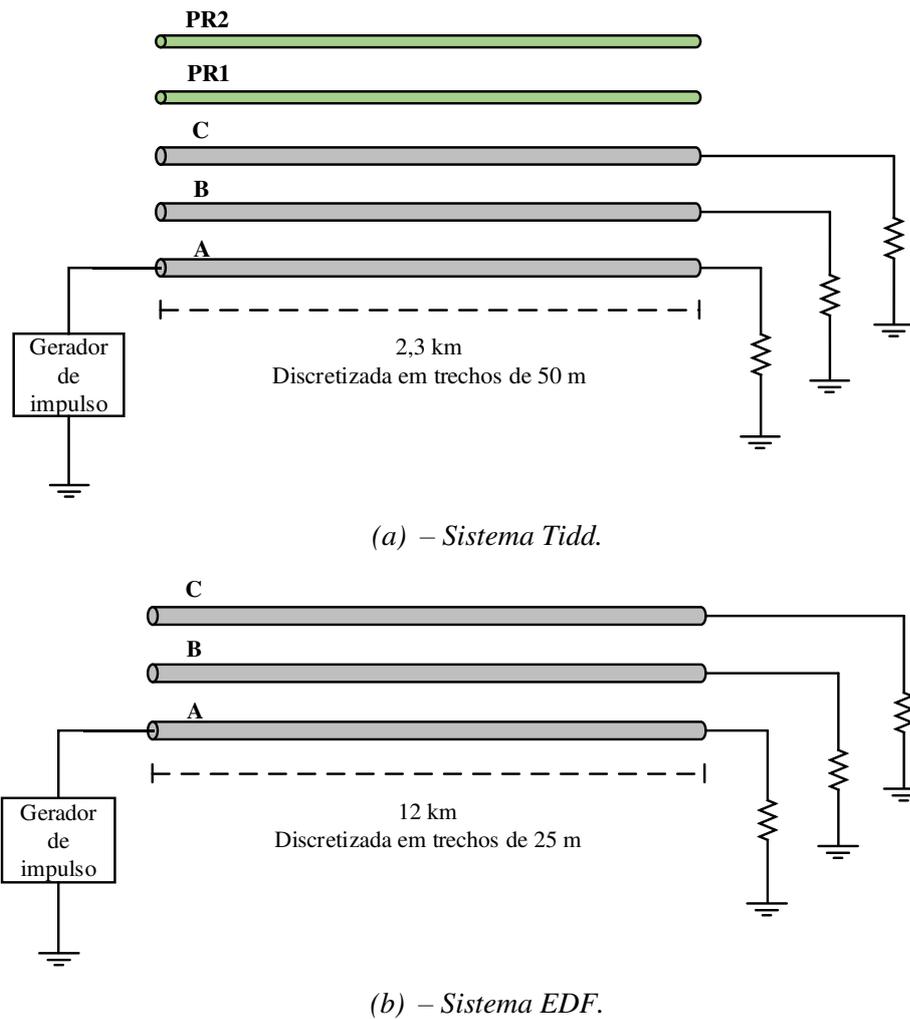


Figura 3.1 – Esquema utilizado para representação dos testes nas simulações computacionais.
(a) Sistema Tidd, (b) Sistema EDF.

Uma importante observação deve ser feita com relação à discretização espacial utilizada em cada caso. Conforme já apresentado anteriormente, o comprimento dos trechos utilizados na discretização espacial depende da frequência do fenômeno analisado. Mais especificamente, quando se realiza a discretização espacial da linha e inserem-se barramentos transversais de corona, está sendo suposto que a tensão ao longo de todo o trecho é aproximadamente a mesma. Contudo, tal aproximação somente é válida se o tempo que um sinal leva para viajar de uma extremidade a outra do trecho for apenas uma fração do período relacionado à máxima frequência do sinal aplicado²². No caso dos experimentos Tidd, o tempo de subida da onda aplicada é de 1 μ s. Nessas circunstâncias, sabendo-se que uma onda viaja de 200 a 300 m a cada microssegundo (CARNEIRO; MARTI, 1991), a linha deve ser discretizada em trechos de 50 m ou menos, a fim de que se possa produzir uma boa represen-

²² Supondo-se que f_{max} corresponde à máxima frequência do sinal aplicado, tem-se que o período relacionado à esta frequência é dado por $1/f_{max} = T_{max}$.

tação. Por outro lado, no caso dos experimentos EDF observa-se que o pulso aplicado possui tempo de subida de aproximadamente $0,29 \mu\text{s}$. Por este motivo, na discretização dessa linha é necessário utilizar trechos menores do que nos experimentos Tidd, sendo que neste trabalho se utilizaram trechos de 25 m. Ao todo, a linha Tidd foi representada por 46 trechos de 50 m, enquanto a linha EDF foi representada por 480 trechos de 25 m cada. O modelo de linha utilizado é o *Universal Line Model*, o qual se encontra disponível na biblioteca do PSCAD.

O passo de integração adotado para ambos os casos é de $\Delta t = 1 \text{ ns}$, sendo este valor padronizado para todas as análises realizadas neste capítulo. A necessidade de se utilizar um passo de integração curto se deve tanto pelo fato de os fenômenos analisados serem transitórios rápidos (descargas atmosféricas), quanto pelo fato de serem utilizados segmentos de linha muito curtos²³.

Conforme apresentado no Apêndice A, os experimentos na linha Tidd foram realizados utilizando-se três tipos de condutores diferentes, a fim de se avaliar a influência de cada tipo de condutor na formação do efeito corona. Contudo, no sistema aqui implementado considerou-se apenas um desses casos, onde todos os condutores de fase são do tipo ACSR com 23,55 mm de diâmetro. O motivo da escolha desse condutor reside no fato de que, conforme já discutido anteriormente, para implementação de alguns modelos de corona são necessárias medições da curva q-v, e infelizmente tais medições só foram realizadas para este condutor (WAGNER; LLOYD, 1955).

A forma de onda do pulso de tensão aplicado nos experimentos Tidd pode ser aproximada por uma dupla exponencial de $1/6,2 \mu\text{s}$ ²⁴ com amplitude máxima de 1650 kV, conforme apresentado na Figura 3.2. Esse pulso de tensão é representado nas simulações através pela equação (3.1). No caso dos experimentos EDF, infelizmente não foram realizadas medições do sinal aplicado no terminal emissor da linha. Contudo, de acordo com os próprios autores das medições (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978), a forma de onda da tensão aplicada corresponde à uma dupla exponencial com oscilações amortecidas, cujo valor de pico é de aproximadamente 1,1 MV, conforme apresentado na Figura 3.3. Esta forma de onda pode ser descrita matematicamente por (3.2)²⁵.

²³ Conforme instruções apresentadas no manual do PSCAD/EMTDC (MANITOBA HYDRO INTERNATIONAL LTD, 2010), o passo de integração adotado nas simulações deve ser, no mínimo, dez vezes menor do que o tempo de propagação τ (ou tempo necessário para um sinal viajar de uma extremidade a outra da linha).

²⁴ Na literatura, é usual representar descargas atmosféricas por pulsos de $1,2/50 \mu\text{s}$. Contudo, nos experimentos realizados na linha Tidd utilizou-se pulsos de $1/6,2 \mu\text{s}$ devido à limitações existentes no gerador de impulso utilizado nos testes.

²⁵ O detalhamento da forma de onda aplicada no terminal emissor da linha é extremamente importante, uma vez que as análises para avaliação da influência do efeito corona consistem em avaliar como tais ondas são distorcidas e atenuadas à medida em que se propagam ao longo da linha.

É oportuno ressaltar que embora as medições nas linhas Tidd e EDF tenham sido feitas aplicando pulsos de tensão de ambas polaridades, as análises realizadas nesse trabalho basearam-se na aplicação de pulsos de polaridade positiva, visto que a influência do efeito corona para esta polaridade é maior.

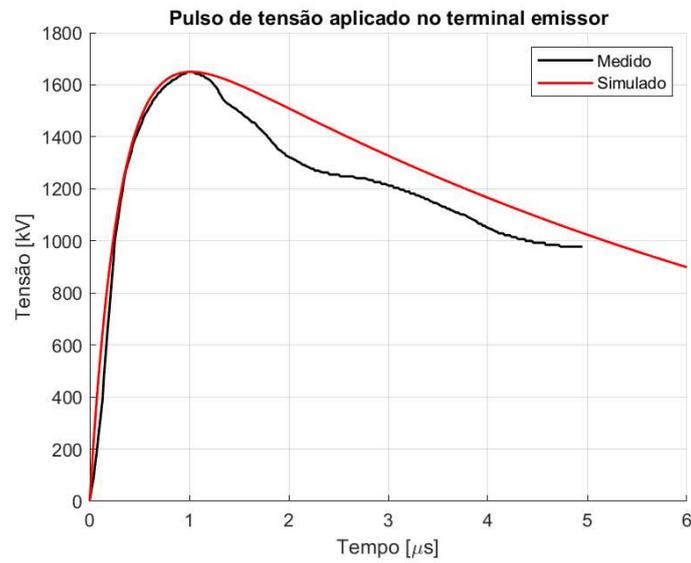


Figura 3.2 – Forma de onda do pulso de tensão aplicada na linha Tidd.

$$v(t) = V_p(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (3.1)$$

Onde:

$$V_p = 1,965 \text{ MV}$$

$$a = 0,13 \cdot 10^6$$

$$b = 3,3 \cdot 10^6$$

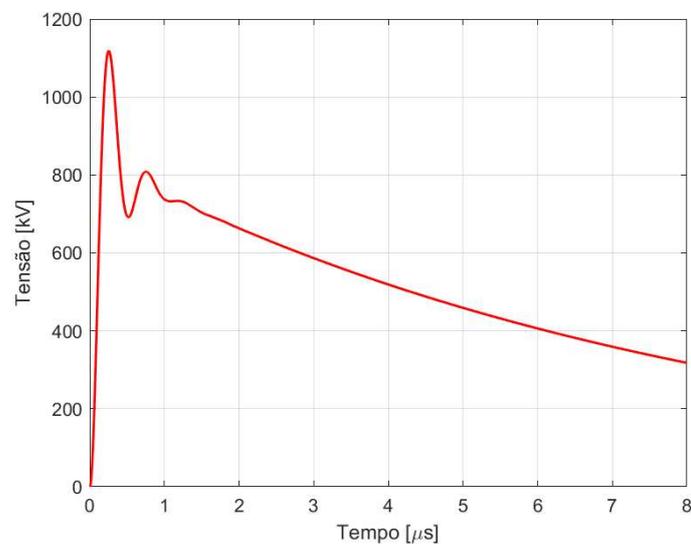


Figura 3.3 – Forma de onda do pulso de tensão aplicado na linha EDF.

$$v(t) = 850 \cdot \left[0,998e^{-0,123t} - 1,051e^{-4,1t} \sin \left(12,3t + \frac{70\pi}{180} \right) \right] \text{ [kV]} \quad (3.2)$$

Para uma análise preliminar foram realizadas simulações sem representação do efeito corona. Desse modo, pode-se avaliar o erro cometido quando este fenômeno é desprezado, visto que nesse caso apenas o efeito da variação dos parâmetros com a frequência é representado. Nessas circunstâncias, as Figuras 3.4 e 3.5 apresentam, respectivamente, a comparação entre as formas de onda medidas e simuladas para as linhas Tidd e EDF. É oportuno ressaltar que as formas de onda provenientes das medições foram obtidas por meio da extração ponto a ponto das figuras publicadas nos artigos originais.

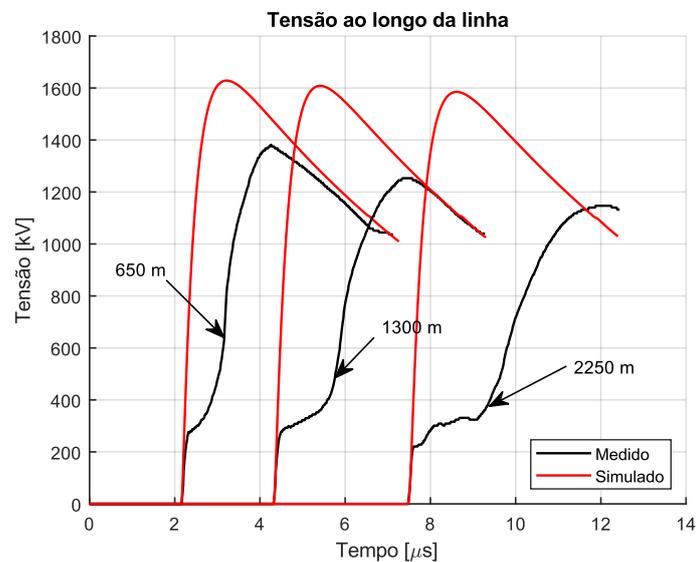


Figura 3.4 – Comparação entre formas de ondas medidas e simuladas (linha Tidd). Efeito corona não representado na simulação.

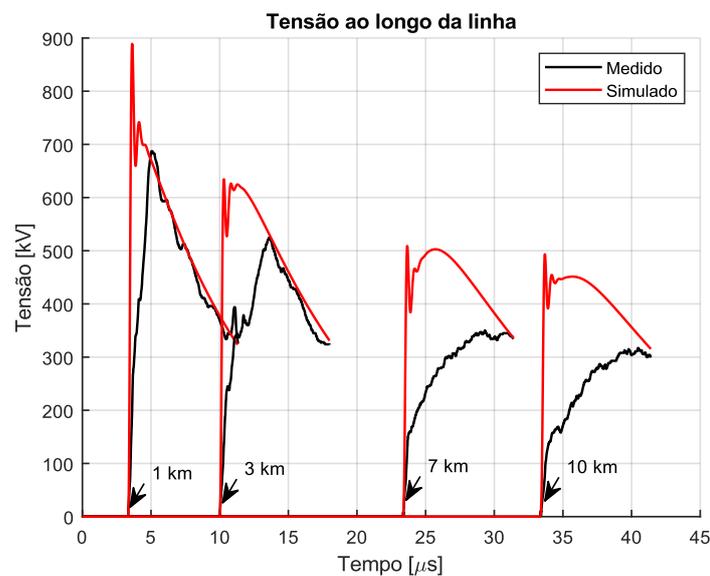
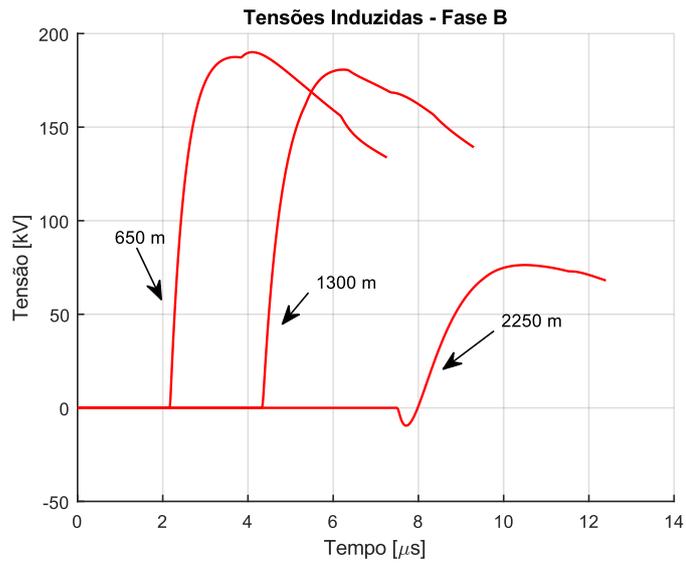


Figura 3.5 – Comparação entre formas de ondas medidas e simuladas (linha EDF). Efeito corona não representado na simulação.

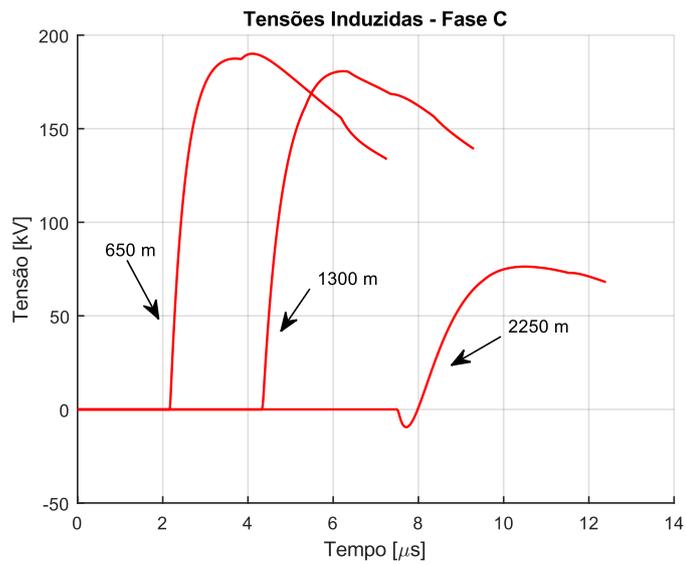
Conforme pode ser observado, mesmo representando-se a linha com parâmetros dependentes da frequência os resultados obtidos por meio das simulações destoam consideravelmente das medições, sendo que as maiores divergências são observadas quando o sinal se propaga por maiores distâncias, já que nesse caso as atenuações e distorções provocadas pelo efeito corona são mais fortemente pronunciadas. Comparando-se as formas de onda medidas e simuladas, observa-se que as simulações apresentaram valores de sobretensões muito maiores do que as medições. Para os piores casos, tem-se que a diferença foi de aproximadamente 38% para a linha Tidd e 29% para a linha EDF. Nessas circunstâncias, é evidente a importância de se representar adequadamente o efeito corona nos estudos de coordenação de isolamento, uma vez que este fenômeno possui um papel predominante na redução das sobretensões.

Prosseguindo as análises, as Figuras 3.6 e 3.7 apresentam, respectivamente, as formas de onda das tensões induzidas nas fases adjacentes das linhas Tidd e EDF²⁶. Deve-se ressaltar que apesar do efeito corona produzir modificações no acoplamento entre fases da linha (HUANG; SEMLYEN, 1987), (CORREIA DE BARROS, 1995), (NODA et al., 1999), neste trabalho as análises são realizadas apenas para a fase incidente (fase A), visto que os modelos de representação analisados não permitem a representação da variação no acoplamento capacitivo entre fases. Conforme apresentado nas figuras, as tensões induzidas nas fases adjacentes são relativamente elevadas, mas não ultrapassam o valor da tensão de início de efeito corona, permitindo concluir que o fenômeno ocorre apenas na fase onde o pulso de tensão é aplicado. Ademais, é oportuno ressaltar que no caso da linha Tidd as tensões induzidas nas fases B e C são praticamente coincidentes para os pontos analisados. Por outro lado, no caso da linha EDF observa-se que existem certas diferenças nas tensões induzidas, que podem ser observadas principalmente nas formas de onda obtidas a 7 km e 10 km do terminal emissor. Tal ocorrência está ligada ao fato de que o pulso de frequência aplicado na linha EDF é de frequência bem mais elevada do que aquele aplicado na linha Tidd, além do fato de que a linha EDF possui comprimento mais elevado do que a linha Tidd.

²⁶ É oportuno ressaltar que as Figuras apresentam apenas as formas de onda obtidas nas simulações, uma vez que os dados apresentados nas medições originais são incompletos e não permitem realizar uma comparação direta entre as formas de onda medidas e simuladas para as fases adjacentes.

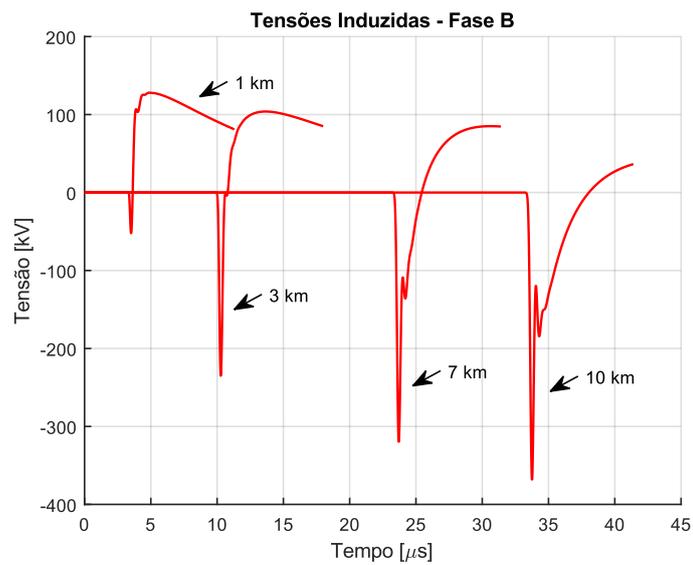


(a) – Fase B.

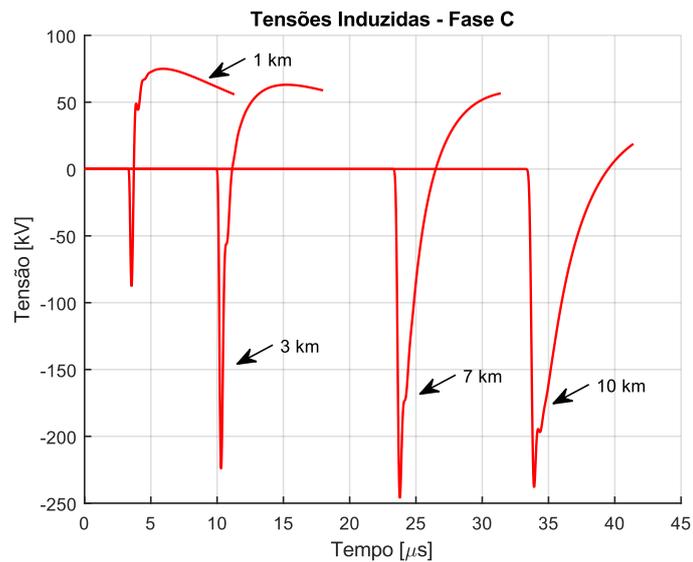


(b) – Fase C

Figura 3.6 – Tensões induzidas nas fases adjacentes (linha Tidd). Efeito corona não representado nas simulações.



(a) – Fase B



(b) – Fase C

Figura 3.7 - Tensões induzidas nas fases adjacentes (linha EDF). Efeito corona não representado nas simulações.

Nas seções seguintes são apresentados os diversos modelos para representação do efeito corona na linha de transmissão. Conforme já discutido anteriormente, todos modelos analisados são representados como elementos concentrados, os quais são dispostos na junção entre cada segmento de linha, conforme apresentado na Figura 3.8. Obviamente, esse sistema representa a variação da capacitância entre a fase e o solo, mas não a variação da capacitância entre fases.

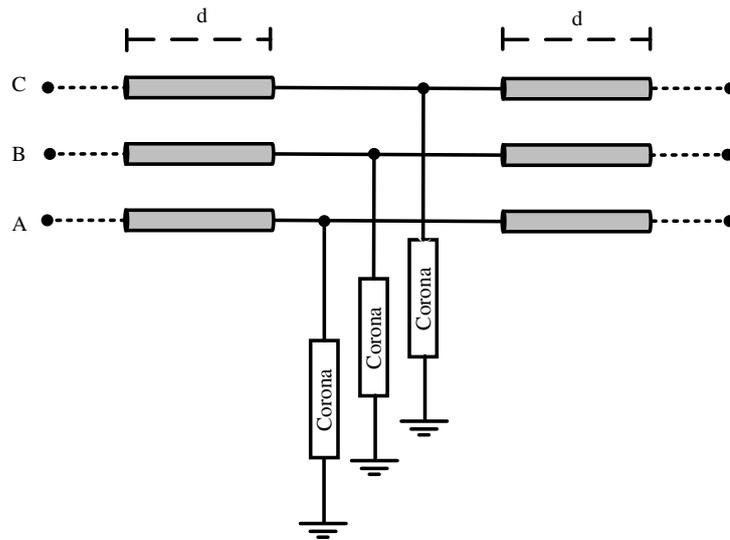


Figura 3.8 –Esquema utilizado para representação do efeito corona nas simulações.

Nas simulações apresentadas, além de se avaliar a precisão de cada modelo para representar as diversas atenuações e distorções causadas pelo efeito corona, avaliou-se também a precisão destes para representação da curva q-v. Como a atenuação e a distorção das formas de onda são decorrentes da variação da carga ao redor do condutor, é fácil perceber que quanto maior a precisão de um determinado modelo para representar a curva q-v, maior será a precisão deste para representação da atenuação e distorção das formas de onda. Contudo, nesse caso não foram feitas comparações diretas entre as curvas medidas e simuladas, visto que tal comparação se mostrou inadequada com os dados disponíveis²⁷. Desse modo, as análises foram feitas apenas com base no formato da curva produzida por cada modelo.

Como os modelos de corona analisados nesse trabalho foram desenvolvidos para aplicações práticas em programas do tipo EMT, o objetivo dos mesmos é representar a variação da capacitância do condutor na linha de transmissão, e não reproduzir a curva q-v diretamente. Contudo, é possível realizar a reconstrução da curva produzida por cada modelo aplicando-se o esquema apresentado a seguir:

- Em um determinado instante t , a carga total $Q(t)$ pode ser obtida pela soma da carga geométrica $Q_0(t) = C_0v(t)$ e da carga de corona $Q_c(t)$, conforme apresentado na Figura 3.9(a).

²⁷ Para efetuar comparações diretas entre as curvas medidas e simuladas seria necessário realizar simulações sob as mesmas condições em que foram feitas as medições. No caso dos experimentos Tidd os autores infelizmente não forneceram informações suficientes que possibilitassem realizar tal comparação. Por outro lado, no caso dos experimentos EDF os autores forneceram essas informações, mas observa-se que as medições das curvas q-v foram feitas tomando-se um número muito pequeno de pontos, o que conseqüentemente compromete o formato da curva obtida. Nessas circunstâncias, optou-se por não realizar comparações diretas.

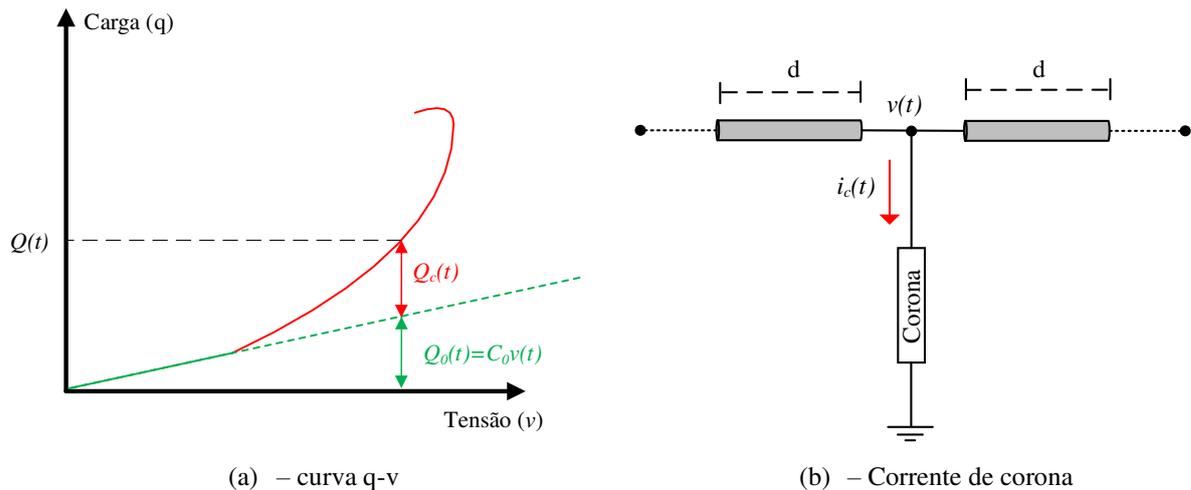


Figura 3.9 - Ilustração do esquema utilizado para reconstituição da curva q-v.

- A carga de corona $Q_c(t)$ pode ser obtida integrando-se a corrente de corona $i_c(t)$ no tempo.
- Finalmente, aplicando-se a regra de integração trapezoidal, tem-se que a carga total $Q(t)$ pode ser obtida conforme apresentado na equação (3.3), onde d representa o comprimento do trecho adotado na discretização espacial da linha²⁸, em metros.

$$Q(t) = C_0 \cdot v(t) + \frac{1}{d} \cdot \left(\frac{[i_c(t) + i_c(t - \Delta t)] \cdot \Delta t}{2} \right) \quad (3.3)$$

3.2 Modelo de Kudyan e Shih

(KUDYAN; H-SHIH, 1981) apresentaram um modelo simplificado para representação do efeito corona em linhas de transmissão, o qual se baseia na curva q-v para obter uma previsão da variação da capacitância e utiliza elementos de circuitos para representação em programas do tipo EMT. De modo geral, este modelo pode ser classificado como linear e estático, uma vez que a variação da capacitância é aproximada por segmentos de reta, e a dependência da frequência não é representada.

Na Figura 3.10 é apresentado o circuito equivalente proposto por Kudyan e Shih para representação do efeito corona em programas do tipo EMT. Segundo os autores, os valores de C_1 e R_1 podem ser estimados através das equações (3.4) e (3.5), respectivamente. A tensão V_1 corresponde à tensão de início do efeito corona (tensão crítica), a qual pode ser obtida por

²⁸ Na representação da curva q-v, a carga normalmente é expressa em Coulombs por unidade de comprimento.

meio das formulações apresentadas na seção 2.2. Neste trabalho, o valor da tensão crítica foi calculado através da fórmula de Peek.

Nessas circunstâncias, os parâmetros do modelo foram calculados para as linhas Tidd e EDF, e são apresentados na Tabela 3.1.

$$C_1 = \frac{3}{4} \cdot C_0 \cdot d \quad (3.4)$$

$$R_1 = 600 \cdot 10^6 \cdot d \quad (3.5)$$

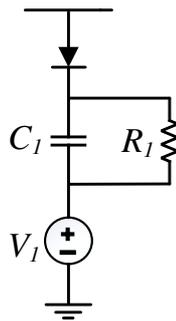


Figura 3.10 - Modelo de Kudyayn e Shih.

Tabela 3.1 - Valores dos parâmetros do modelo de Kudyayn e Shih utilizados nas simulações

	C_1 [pF]	R_1 [GΩ]	V_1 [kV]
Linha Tidd	273,75	30	276
Linha EDF	143,62	15	250

As Figuras 3.11 e 3.12 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos nas simulações para as linhas Tidd e EDF, os quais são plotados juntamente com suas respectivas medições. Adicionalmente, a Figura 3.13 apresenta o formato da curva q-v produzida pelo modelo para o condutor utilizado na linha Tidd.

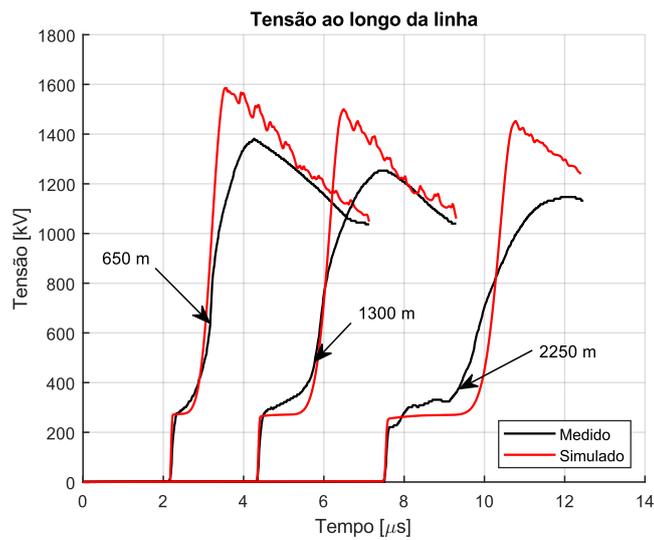


Figura 3.11 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Kudyan e Shih.

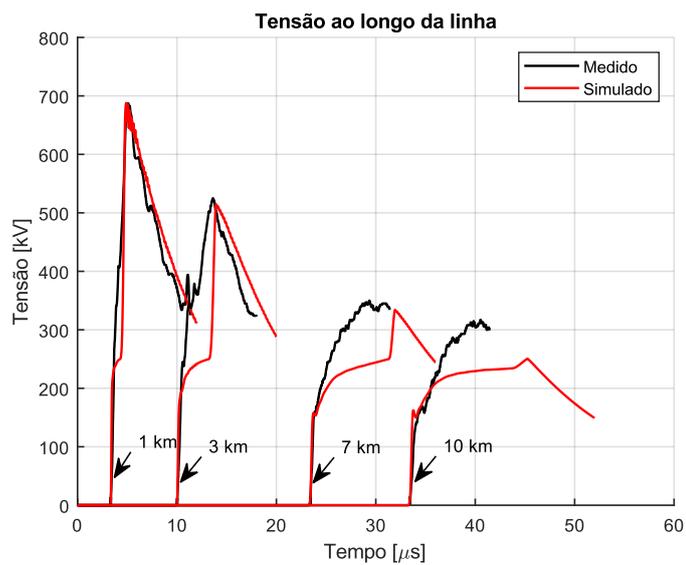


Figura 3.12 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Kudyan e Shih.

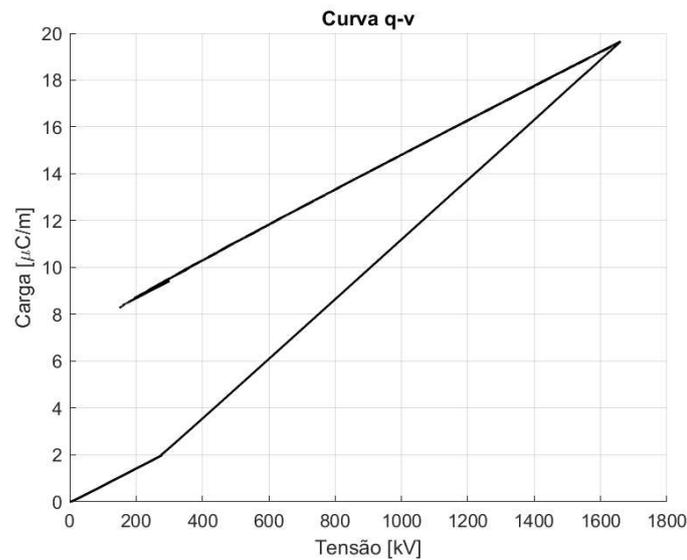


Figura 3.13 – Reconstituição da Curva q-v produzida pelo modelo de Kudyan e Shih para simulação na linha Tidd.

Conforme pode ser observado nas Figuras 3.11 e 3.12, os resultados obtidos mostram que o modelo de Kudyan e Shih representa com pouca precisão as atenuações e distorções das formas de onda. No caso da linha Tidd observa-se que foram obtidos valores maiores de sobretensões do que aqueles obtidos nas medições, sendo que para o pior caso ocorreram divergências de aproximadamente 28%. No caso dos experimentos EDF observa-se exatamente o contrário, uma vez que o modelo apresenta maiores atenuações e distorções para as distâncias de 3 km, 7 km e 10 km do terminal emissor. Nesse caso, a máxima diferença obtida entre as sobretensões medidas e calculadas é de aproximadamente 20%.

O motivo pelo qual este modelo apresenta resultados pouco precisos pode ser mais bem compreendido por meio da Figura 3.14, a qual apresenta a curva q-v produzida pelo modelo. Como pode ser observado, o modelo de Kudyan e Shih é um modelo bastante simplificado, onde a curva q-v é representada de maneira estática e aproximada por três segmentos de reta. Nesse modelo, enquanto a tensão no condutor é menor do que a tensão crítica a carga cresce linearmente com a tensão, e a capacitância do sistema é igual à capacitância geométrica da linha (C_0). Quando a tensão no condutor se torna superior ao valor da tensão crítica, o diodo passa a conduzir e a capacitância C_1 é adicionada ao sistema, fazendo com que a carga passe a crescer mais rapidamente com a tensão. Todavia, tal crescimento é representado de maneira linear, o que não ocorre na prática. Quando a tensão atinge seu valor máximo, esta começa a decrescer e, conseqüentemente, devido à tensão no capacitor, o diodo fica inversamente polarizado, fazendo com que a capacitância C_1 seja desconectada do sistema.

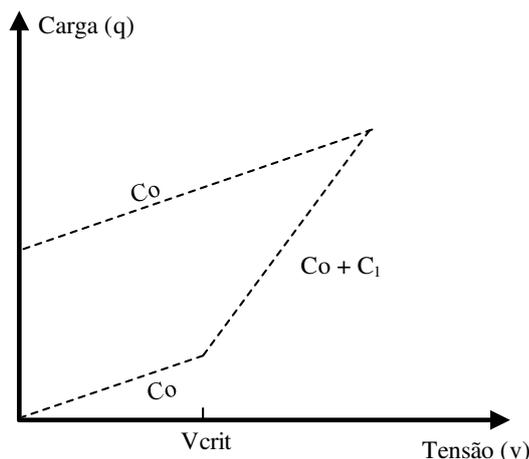


Figura 3.14 – Representação da curva q-v segundo o modelo de Kudyan e Shih.

Um outro problema relacionado ao modelo de Kudyan e Shih se deve às oscilações numéricas produzidas na cauda da onda, conforme se observa na Figura 3.11. Tais oscilações ocorrem devido aos chaveamentos sucessivos dos diodos, quando estes estão sendo reversamente polarizados e, conseqüentemente, desconectam a capacitância C_1 do sistema. Este problema pode ser minimizado reduzindo o comprimento dos trechos utilizados na discretização espacial da linha, conforme ocorre para o caso da linha EDF, onde os trechos utilizados são de 25 m e as oscilações são praticamente imperceptíveis. Contudo, a utilização de trechos de menor comprimento implica em maiores esforços para representação do sistema em programas do tipo EMT, além de elevar o tempo computacional.

Uma importante observação deve ser feita com relação à representação do resistor R_1 , que é disposto em paralelo com o capacitor. Segundo os autores deste modelo (KUDYAN; H-SHIH, 1981), esse resistor é utilizado para representar a dispersão das cargas espaciais, cujos valores são ajustados para obtenção de uma constante de tempo de aproximadamente 3 ms. Contudo, para o caso analisado, em que foi aplicado um pulso de tensão que representa uma descarga atmosférica, os fenômenos envolvidos são da ordem de μ s. Sendo assim, conclui-se que nesse caso a representação da resistência em paralelo é irrelevante, podendo ser desprezada nas simulações sem alterações nos resultados²⁹.

3.3 Modelo de K. Lee

Baseando-se na lei quadrática de Peek e no trabalho de Umoto e Hara (UMOTO; HARA, 1969), (LEE, 1983) apresentou um modelo de efeito corona aplicável a programas do

²⁹ Essas conclusões estão de acordo com as análises apresentadas em (CARNEIRO; MARTI, 1991).

tipo EMT. Este modelo pode ser representado nas simulações utilizando-se capacitores e resistores não-lineares controlados por tensão (Figura 3.15), cujas equações que determinam os valores de tais parâmetros são apresentadas em (3.6) e (3.7). Ademais, como o modelo não representa a dependência da frequência, este pode ser classificado como não-linear estático.

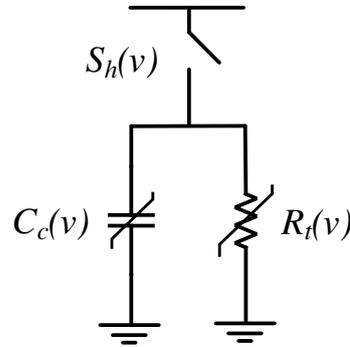


Figura 3.15 - Modelo de K. Lee.

$$C_c(v) = 2K_c \left(1 - \frac{V_{crit}}{v}\right) \cdot d \quad (3.6)$$

$$R_t(v) = \frac{1}{G_t(v)} \quad (3.7)$$

$$G_t(v) = K_g \left(1 - \frac{V_{crit}}{v}\right)^2 \cdot d \quad (3.8)$$

$$K_c = \sigma_c \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} \left[\frac{F}{m}\right] \quad (3.9)$$

$$K_g = \sigma_g \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} \left[\frac{S}{m}\right] \quad (3.10)$$

Nas equações (3.6) - (3.10), tem-se que:

d : Comprimento do trecho adotado na discretização espacial, em m;

$v(t)$: Tensão no condutor, em V;

V_{crit} : Tensão de início de corona (ou tensão crítica), em V;

r e h : Raio e altura do condutor, respectivamente (em m);

σ_c e σ_g : Constantes de perda de corona, em F/m e S/m, respectivamente.

Como pode ser observado na Figura 3.15, diferentemente do modelo de Kudyan e Shih, em que o circuito equivalente do efeito corona é adicionado ao sistema utilizando-se fontes de tensão e diodos, no modelo de K. Lee a capacitância e a condutância transversal são conectadas ao sistema utilizando-se uma chave controlada por tensão, $S_h(v)$. A principal diferença entre esses dois casos reside no fato de que, quando são utilizadas fontes de tensão e diodos, a capacitância incremental é adicionada ao sistema quando a tensão no condutor se torna superior ao valor da tensão de início de corona; e é desconectada quando a tensão no condutor começa a decrescer (já que nesse caso a tensão de carregamento do capacitor é mai-

or do que a tensão da linha, fazendo com que o diodo fique reversamente polarizado). Por outro lado, no caso do modelo de K. Lee a capacitância e a condutância transversal permanecem conectadas ao sistema enquanto a tensão no condutor for superior ao valor da tensão crítica, independentemente se esta tensão é crescente ou decrescente.

Para implementação das equações que descrevem a variação da capacitância e da condutância transversal foi utilizada a ferramenta *Component Wizard*³⁰, que permite a implementação de novos componentes ou algoritmos dentro do ambiente PSCAD. O procedimento adotado para representação do modelo de K. Lee pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1. O circuito equivalente da Figura 3.15 foi disposto na junção entre cada segmento de linha, sendo que a tensão em cada nó de junção é monitorada a cada passo de integração por meio de um comparador.
2. Quando a tensão em um determinado nó de junção torna-se superior à tensão crítica, um algoritmo implementado na ferramenta *component wizard* calcula os respectivos valores de $C_c(v)$ e $R_t(v)$, e simultaneamente emite um sinal para que seja fechada a chave, conectando tais elementos ao sistema.
3. À medida em que o valor da tensão varia em um determinado nó, os valores de $C_c(v)$ e $R_t(v)$ ligados a este nó são recalculados e atualizados na simulação, sendo que este procedimento é realizado a cada passo de integração.
4. Quando a tensão se torna inferior ao valor da tensão crítica é emitido um sinal para que seja realizada a abertura da chave.

A fim de representar o modelo adequadamente, foi necessário acrescentar um resistor de 5Ω ³¹ em série com o capacitor. Esse procedimento se fez necessário para mitigar problemas de instabilidade numérica, visto que ocorre uma variação abrupta da tensão entre os terminais do capacitor no instante em que a chave é fechada.

Como pode ser observado nas equações (3.6) - (3.10), para o cálculo de $C_c(v)$ e $R_t(v)$ é necessário conhecer os valores das constantes de perda de corona (σ_c e σ_g), as quais são obtidas experimentalmente (UMOTO; HARA, 1969). Como tais parâmetros não foram medidos para as linhas Tidd e EDF, em uma primeira impressão tal fato implicaria a impossibilidade de se implementar este modelo para essas linhas. No entanto na referência (MOTOYAMA; AMETANI, 1987) encontram-se tabelados os valores desse parâmetros para alguns tipos de condutores. Dentre os condutores apresentados, o que mais se assemelha aos utilizados nas linhas Tidd e EDF corresponde a um condutor ACSR de 10 mm de raio, onde

³⁰ Ferramenta muito semelhante à MODELS, comumente utilizada no programa ATP.

³¹ É oportuno ressaltar que este valor foi selecionado através de um procedimento de tentativa e erro.

tem-se que $\sigma_c = 20 [F/m]$ e $\sigma_g = 8 \cdot 10^6 [S/m]$. Nessas circunstâncias, foram adotados esses mesmos valores para as simulações em ambas as linhas³², conforme apresentado na Tabela 3.2.

As Figuras 3.16 e 3.17 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos nas simulações com os sistemas Tidd e EDF. A Figura 3.18 apresenta o formato da curva q-v produzida pelo modelo.

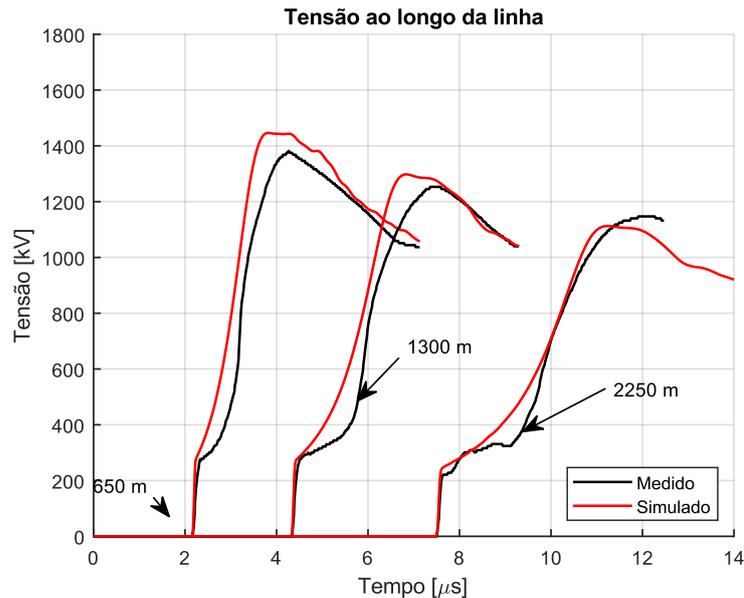


Figura 3.16 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de K. Lee.

³² Evidentemente, a adoção de valores aproximados aos parâmetros σ_c e σ_g pode influenciar negativamente o desempenho do modelo. Contudo, o autor deste trabalho acredita que esta é a maneira mais realística e prática de se obter os valores dessas constantes, visto que caso contrário seria necessário aplicar um procedimento de tentativa e erro. No capítulo 4 são apresentadas maiores discussões a este respeito.

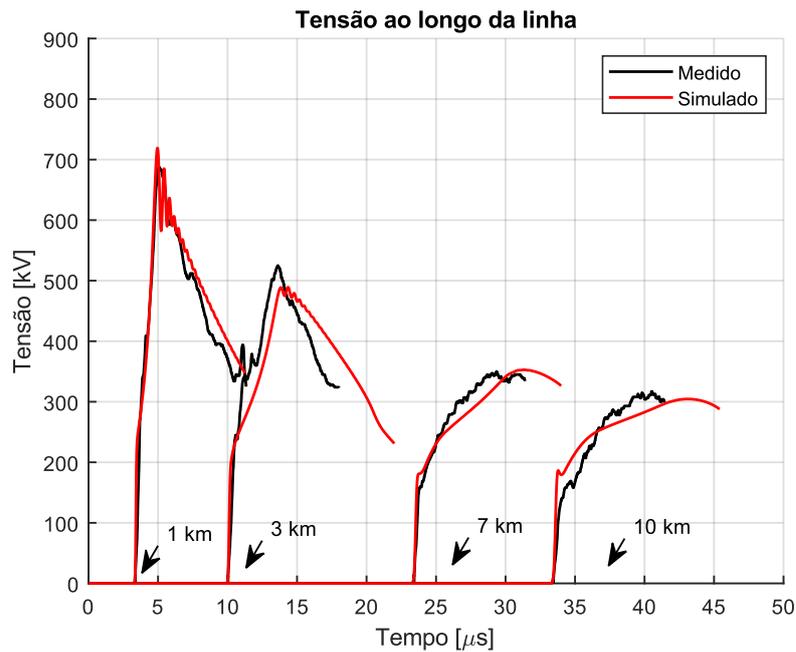


Figura 3.17 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de K Lee.

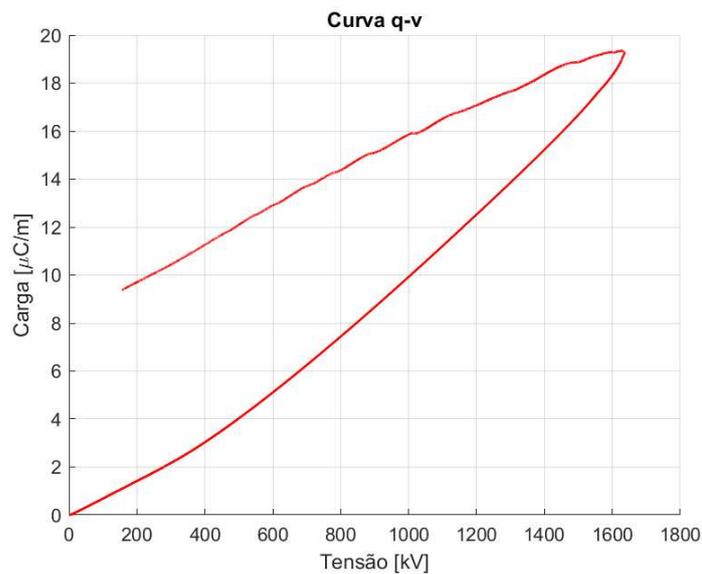


Figura 3.18 – Reconstituição da q-v produzida pelo modelo de K. Lee para simulação na linha Tidd.

Tabela 3.2 – Valores dos parâmetros do modelo de K. Lee utilizados nas simulações

	σ_c [F/m]	σ_g [10^6 S/m]	r [mm]	h [m]	V_{crit} [kV]
Linha Tidd	20	8	11,77	18,89	276
Linha EDF	20	8	13,2	12	250

Analisando-se as Figuras 3.17 e 3.18 pode-se observar que os resultados fornecidos pelo modelo de K. Lee apresentam boa concordância com ambas as medições analisadas, re-

presentando com relativa precisão as atenuações e distorções causadas pelo efeito corona. Nesse caso, a máxima diferença entre as sobretensões medida e calculada foram de aproximadamente 4,5 % para linha Tidd e 7% para a linha EDF (pior caso).

No caso da linha EDF, é possível observar que o modelo produz pequenas oscilações na crista das ondas obtidas à 1 km e 3 km do terminal emissor, o que é decorrente do processo de chaveamento dos capacitores na linha e da própria forma de onda da tensão aplicada. Ademais, com relação à curva q-v produzida pelo modelo, observa-se que esta possui um formato muito semelhante à curva obtida nas medições do projeto Tidd, a qual é apresentada no Apêndice A.

Uma importante observação deve ser realizada com relação ao resistor não-linear disposto em paralelo com a capacitor. Em comparação com o modelo de Kudyan e Shih, onde a resistência é constante e da ordem de $G\Omega$, no modelo de K. Lee a resistência é variável com a tensão, e possui valores que giram em torno de alguns $k\Omega$ para a faixa de tensão analisada. Como consequência, tem-se que o modelo de K. Lee representa com melhor precisão a dispersão das cargas espaciais e, diferentemente do modelo de Kudyan e Shih, este fenômeno não pode ser desprezado nas simulações, visto que sua representação é fundamental para o desempenho do modelo.

3.4 Modelo de Motoyama e Ametani

(MOTOYAMA; AMETANI, 1987) basearam-se no trabalho de (UMOTO; HARA, 1969) e (LEE, 1983) para desenvolverem um modelo de efeito corona linear por partes. Basicamente, ao invés de utilizar capacitores e resistores não-lineares, este modelo representa a variação de tais parâmetros através de uma aproximação linear por partes, onde os autores consideraram suficiente a representação de três ramos de capacitância e condutâncias incrementais, conforme apresentado na Figura 3.19. Além do mais, diferentemente do modelo de K. Lee que utiliza uma chave controlada por tensão para realizar a conexão de tais elementos ao sistema, nesse caso os autores utilizaram diodos e fontes de tensão CC, sendo que a comparação entre estas duas abordagens foram tratadas anteriormente.

As equações utilizadas para cálculo dos parâmetros do circuito são apresentadas em (3.11) - (3.15). Conforme pode ser observado, tais equações são as mesmas utilizadas no modelo de K. Lee, sendo que a única diferença reside no fato de que os valores das capacitâncias e resistências são obtidos em função das tensões V_1 , V_2 e V_3 , que são os pontos onde são feitas as linearizações.

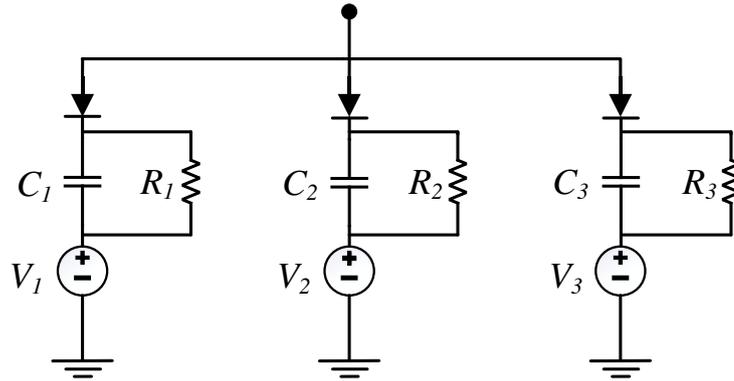


Figura 3.19 - Modelo de Motoyama e Ametani.

$$V_1 = V_{crit}, V_2 = 2V_{crit}, V_3 = 3V_{crit} \quad (3.11)$$

$$C_n = 2K_c \left(1 - \frac{V_{crit}}{V_{crit} + V_n}\right) \cdot d \quad (3.12)$$

$$R_n = \frac{1}{K_g \left(1 - \frac{V_{crit}}{V_{crit} + V_n}\right)^2 \cdot d} \quad (3.13)$$

$$K_c = \sigma_c \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} \left[\frac{F}{m}\right] \quad (3.14)$$

$$K_g = \sigma_g \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} \left[\frac{S}{m}\right] \quad (3.15)$$

Utilizando-se os mesmos valores de σ_c e σ_g adotados para avaliação do modelo de K. Lee, os valores dos parâmetros do modelo de Motoyama e Ametani foram calculados para as linhas Tidd e EDF, e são apresentados na Tabela 3.3. As Figuras 3.20 e 3.21 apresentam, respectivamente, as comparações entre as formas de onda medidas e simuladas. A Figura 3.22 apresenta o formado da curva q-v produzida pelo modelo.

Tabela 3.3 - Valores dos parâmetros do modelo de Motoyama e Ametani utilizados nas simulações

	Linha Tidd	Linha EDF
V_1	276 [kV]	250 [kV]
V_2	552 [kV]	500 [kV]
V_3	828 [kV]	750 [kV]
C_1	0,17 [nF]	0,12 [nF]
C_2	0,23 [nF]	0,15 [nF]
C_3	0,26 [nF]	0,18 [nF]
R_1	56,6 [k Ω]	85,2 [k Ω]
R_2	31,8 [k Ω]	48,0 [k Ω]
R_3	25,2 [k Ω]	37,9 [k Ω]

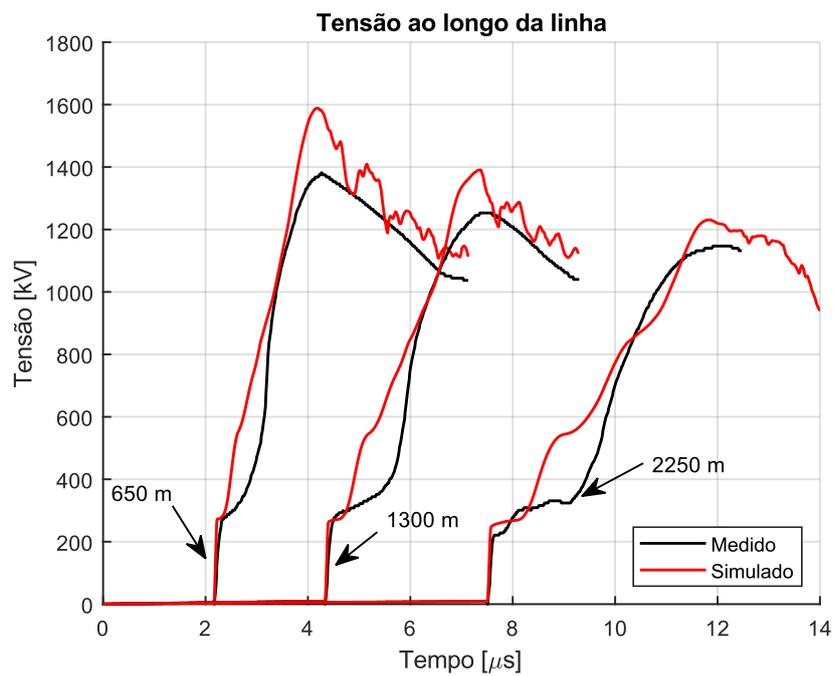


Figura 3.20 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Motoyama e Ametani.

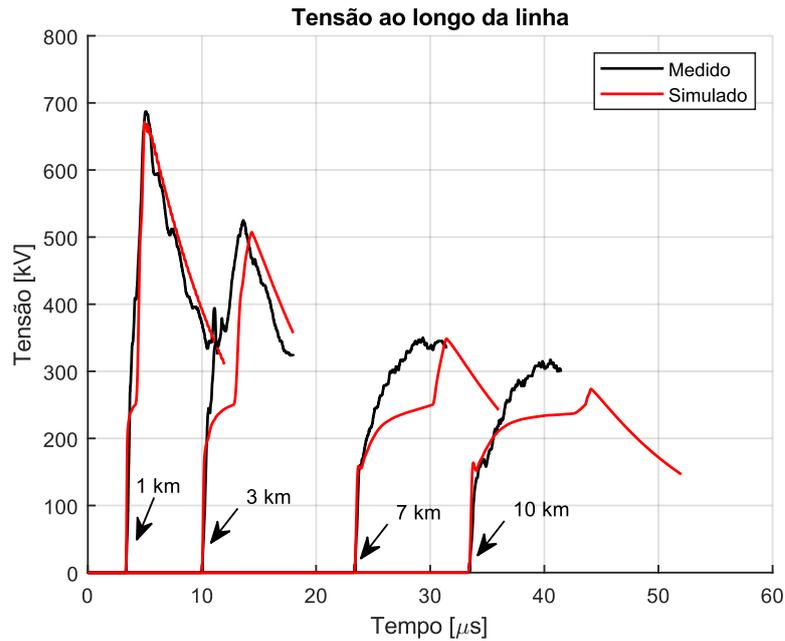


Figura 3.21 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Motoyama e Ametani.

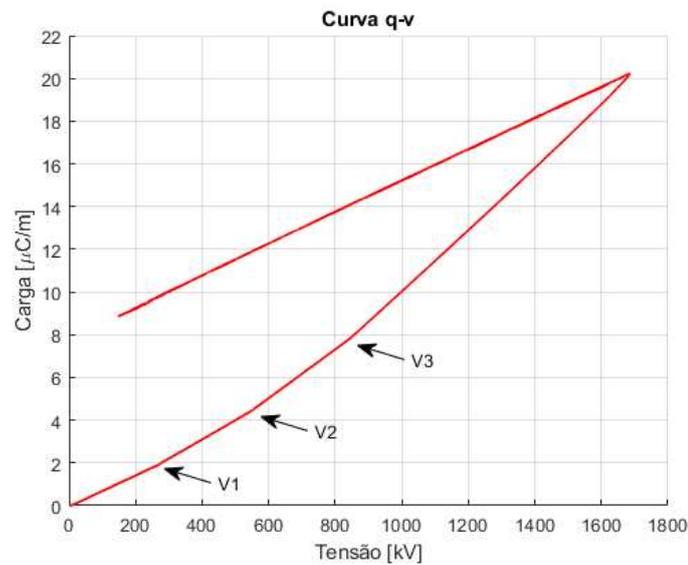


Figura 3.22 - Reconstituição da q-v produzida pelo modelo de Motoyama e Ametani.

Pela análise da Figura 3.20 pode-se perceber que o modelo produz resultados razoáveis para a linha Tidd, já que as formas de onda obtidas apresentam relativa concordância com as medições. Contudo, é possível observar fortes oscilações na cauda da onda, que conforme discutido anteriormente, ocorrem devido ao chaveamento dos diodos quando a tensão na linha começa a decrescer. Para a linha EDF, observa-se que o modelo produz melhores resultados para as formas de ondas obtidas a 1 km e 3 km do terminal emissor, enquanto as formas de onda obtidas a 7 km e 10 km diferem consideravelmente das medições. Em termos

percentuais, a máxima diferença entre as sobretensões medidas e calculadas foram de aproximadamente 14,9% para linha Tidd e 13,8% para a linha EDF (análise para os piores casos).

A reconstrução da curva q-v produzida pelo modelo permite uma melhor compreensão dos resultados obtidos. Como apresentado anteriormente, o modelo de Motoyama e Ametani consiste em uma aproximação linear por partes do modelo de K. Lee, sendo que tal aproximação pode ser visualizada nos pontos onde há variação da inclinação da reta, os quais são indicados pelas setas na Figura 3.22. Como pode ser observado, a variação na inclinação da curva ocorre justamente nos pontos V_1 , V_2 e V_3 , que correspondem aos pontos onde as capacitâncias e condutâncias incrementais são adicionadas no circuito. É oportuno ressaltar que, conforme sugerido no trabalho original (MOTOYAMA; AMETANI, 1987), para as simulações realizadas adotou-se $V_1 = V_{crit}$, $V_2 = 2V_{crit}$ e $V_3 = 3V_{crit}$. Essa aproximação é razoável nos casos em que o pulso de tensão aplicado possui valor de pico cerca de 4 vezes maior do que o valor de V_{crit} . Contudo, no caso dos experimentos na linha Tidd observa-se que tal condição não ocorre, visto que o valor de pico do pulso aplicado é quase 6 vezes maior do que o valor de V_{crit} . Como consequência, observa-se na curva q-v que as variações nas inclinações das retas ocorrem apenas para valores de tensões entre 276 kV e 838 kV, já que não houve variação na inclinação da reta para valores entre 838 kV e 1650 kV.

3.5 Modelo de Gary *et al.*

Baseando-se em medições de diversas curvas q-v e utilizando regressão não-linear, (C.GARY; CRISTESCU; DRAGAN, 1989) apresentaram um conjunto de equações que descrevem aproximadamente a variação da capacitância da linha em função da tensão, conforme apresentado em (3.16). É oportuno ressaltar que, diferentemente dos outros modelos apresentados, essas equações representam a capacitância total do sistema, e não apenas a capacitância incremental decorrente do efeito corona, conforme ocorre nos outros casos. Ademais, assim como os modelos de Kudyan e Shih, K.Lee e Motoyama e Ametani, este é um modelo estático, visto que apesar de a variação da capacitância ser representada de modo não-linear, a tensão de início do efeito corona não depende da frequência do sinal aplicado.

$$C(v) = \begin{cases} C_0, & \text{se } v < V_{crit} \\ C_0 \cdot B \cdot \left(\frac{v}{V_{crit}}\right)^{B-1}, & \text{se } v > V_{crit} \text{ e } \frac{dv}{dt} > 0 \\ C_0, & \text{se } \frac{dv}{dt} < 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Onde:

C_0 : Capacitância geométrica da linha;

B : Coeficiente obtido por relações empíricas, conforme apresentado na Tabela 3.4 (onde r é o raio do condutor simples e n é o raio do feixe de condutores, em cm).

Tabela 3.4 - Fórmulas para obtenção do valor do coeficiente B do modelo de Gary e Dragan.

B	Polaridade	
	positiva	negativa
Condutor simples	$0,22r + 1,2$	$0,07r + 1,12$
feixe	$1,52 - 0,15 \cdot \ln(n)$	$1,28 - 0,08 \cdot \ln(n)$

Originalmente, os autores deste modelo apenas propuseram tais equações, mas não realizaram sua implementação a fim de se verificar sua precisão. Sendo assim, neste trabalho foi realizada uma adaptação para representá-lo em programas do tipo EMT, cujo circuito equivalente utilizado para representação da equação (3.16) é apresentado na Figura 3.23. Conforme pode ser observado, no caso em que a tensão na linha é menor do que a tensão crítica, a fonte de tensão CC faz com que o diodo permaneça inversamente polarizado, e a capacitância do sistema é igual a capacitância geométrica (C_0), que é representada diretamente no modelo de linha de transmissão. Quando a tensão na linha é crescente e ultrapassa o valor da tensão crítica, o diodo se torna diretamente polarizado, e a capacitância $C_{corona}(v)$ é adicionada ao sistema. Por último, no caso em que a tensão na linha decresce ($dv/dt < 0$), o diodo torna-se inversamente polarizado devido à tensão armazenada no capacitor ser superior à tensão na linha, fazendo com que a capacitância seja desconectada do sistema.

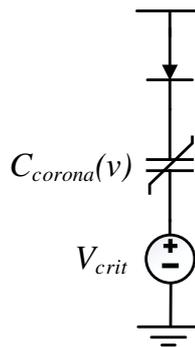


Figura 3.23 - Circuito equivalente utilizado para representação das equações de Gary *et al.*

O valor da capacitância $C_{corona}(v)$ referente a um segmento de linha de comprimento d pode ser obtido por meio da equação (3.17), a qual foi implementada no *software* PSCAD utilizando-se a ferramenta *component Wizard*. Obviamente, para cálculo desta capacitância é necessário monitorar a tensão em cada nó de junção dos trechos de linha.

$$C_{corona}(v) = \left[C_0 \cdot \left(B \cdot \left(\frac{v}{V_{crit}} \right)^{B-1} - 1 \right) \right] \cdot d \quad (3.17)$$

Nessas circunstâncias, o modelo foi aplicado para o cálculo da propagação de onda nas linhas Tidd e EDF, e os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 3.24 e 3.25. Assim como nos casos anteriores, realizou-se também a reconstrução da curva q-v, cujo resultado é apresentado na Figura 3.26. Os valores dos parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Valores dos parâmetros do modelo de Gary *et al* utilizados nas simulações

	Linha Tidd	Linha EDF
B	1,46	1,49
V_{crit} [kV]	276	250
C_0 [pF/m]	7,28	7,66

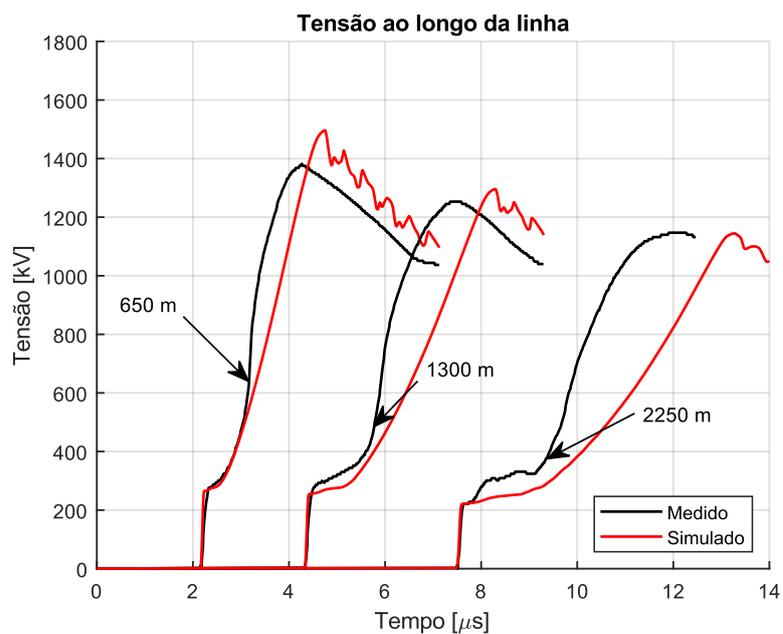


Figura 3.24 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Gary *et al*.

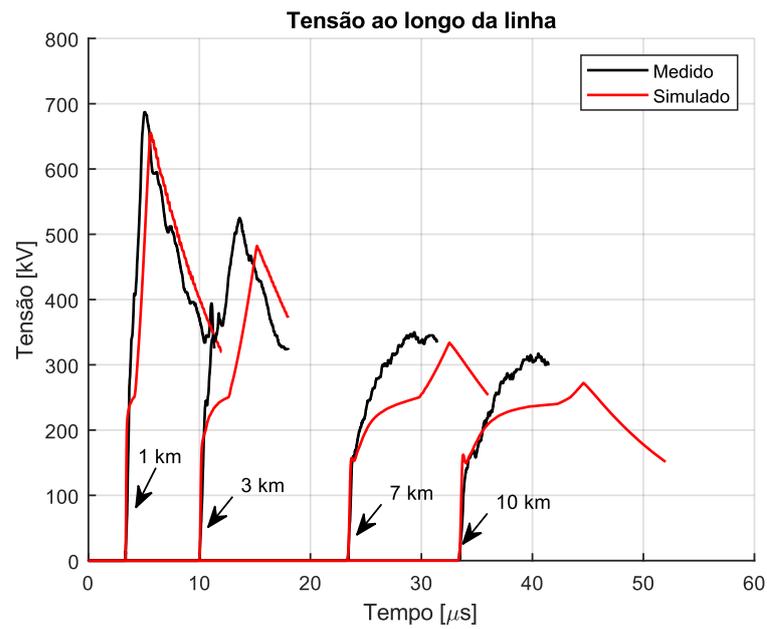


Figura 3.25 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Gary *et al.*

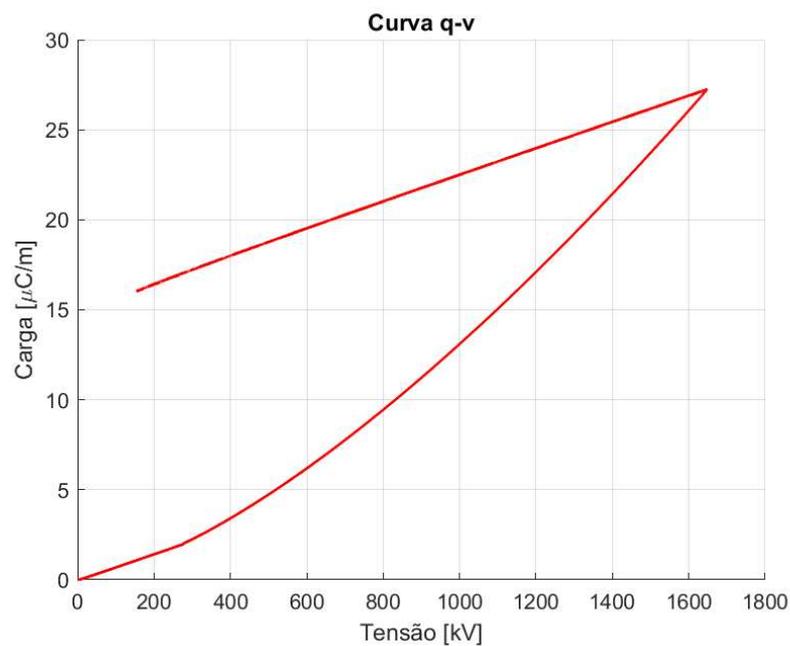


Figura 3.26 - Reconstrução da q-v produzida pelo modelo de Gary *et al.*

Conforme pode ser observado nas Figuras 3.24 e 3.25, o modelo de Gary *et al* produz maiores distorções das formas de onda do que as observadas nas medições. Esta característica é mais fortemente pronunciada nos casos em que as ondas viajam a maiores distâncias do terminal emissor, como pode ser observado nas formas de onda obtidas a 2250 m na linha Tidd e a 10 km na linha EDF. Nesse caso, a máxima diferença entre as sobretensões medidas

e calculadas foi de aproximadamente 9% para linha Tidd e 8% para a linha EDF. Contudo, como pode ser observado nas figuras, a divergência entre os resultados se deve à distorção exagerada das formas de onda, e não devido à atenuação das sobretensões.

Comparando-se a curva q-v produzida pelo modelo de Gary *et al* com as curvas produzidas pelos modelos analisados anteriormente, pode-se constatar que o modelo de Gary produz um crescimento demasiado da carga com relação à tensão. Como exemplo, observando-se a curva q-v produzida pelo modelo de K. Lee (Figura 3.18), tem-se que para a tensão de 1650 kV (tensão de pico) a carga espacial é de aproximadamente 19 $\mu\text{C}/\text{m}$. Por outro lado, para este mesmo valor de tensão o modelo de Gary apresentou valores de carga espacial de aproximadamente 27 $\mu\text{C}/\text{m}$. Nessas circunstâncias, é fácil perceber que o último modelo representa um crescimento exagerado da capacitância incremental do efeito corona, o que justifica o fato dos resultados obtidos apresentarem maiores distorções das formas de onda do que aquelas que ocorrem na prática.

Uma vantagem encontrada na aplicação do modelo de Gary consiste no fato de que para sua implementação são necessárias apenas informação a respeito da capacitância geométrica da linha, raio do condutor e polaridade da tensão aplicada, não sendo necessárias medições da curva q-v ou de outros parâmetros, conforme ocorre na maioria dos modelos de corona.

3.6 Modelo de M. Siliciu e I. Siliciu

O modelo de (MIHĂILESCU-SULICIU; SULICIU, 1981) corresponde ao modelo mais utilizados na literatura para representação do efeito corona em linhas de transmissão (MARUVADA; NGUYEN; HAMADANI-ZADEH, 1989), (CARNEIRO; MARTI, 1991), (CARNEIRO et al., 1994), (BARROS; CARNEIRO; AZEVEDO, 1995), (MIRANDA et al., 1999), (CERVANTES et al., 2018), (HUANG; ZHANG; TAO, 2018). Isso se deve ao fato de que este modelo é capaz de representar o efeito corona como um fenômeno não-linear e dependente da frequência, onde o formato da curva q-v é alterado de acordo com o tempo de subida do pulso de tensão aplicado, conforme apresentado no capítulo 2³³.

Para representação da curva q-v, os autores utilizaram um sistema de equações constitutivas, as quais foram originalmente desenvolvidas em estudos sobre não-linearidades em materiais com viscoplasticidade. Como o comportamento da curva q-v assemelha-se ao de tais materiais, os autores realizaram uma adaptação para que a curva pudesse ser descrita por tais equações. Contudo, conforme será melhor abordado posteriormente, o modelo é muito

³³ É oportuno ressaltar que, dentre os modelos analisados neste trabalho, este é o único capaz de representar o efeito corona como um fenômeno dependente da frequência.

teórico, e os parâmetros necessários para sua implementação somente podem ser estimados se existirem medições da curva q-v para o condutor analisado.

As equações propostas pelos autores são apresentadas em (3.18) - (3.21). Como pode ser observado, diferentemente dos outros casos onde o efeito corona é descrito como uma capacitância dependente da tensão, este modelo descreve a corrente de corona.

$$i_{corona}(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_2 \leq 0 \\ g_2, & \text{se } g_2 > 0 \text{ e } g_1 \leq 0 \\ g_1 + g_2, & \text{se } g_1 > 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

$$g_1 = k_1[(C_1 - C_0)(v(t) - V_1) - q_{corona}] \quad (3.19)$$

$$g_2 = k_2[(C_2 - C_0)(v(t) - V_2) - q_{corona}] \quad (3.20)$$

$$q_{corona} = \int_{t-\Delta t}^t i_{corona}(t) dt \quad (3.21)$$

Nas equações (3.18) - (3.21), tem-se que $C_2 > C_1 > C_0$; $V_1 \geq V_2$; $k_1, k_2 > 0$. A obtenção desses parâmetros é realizada através de um procedimento que utiliza curvas q-v obtidas por medições. Contudo, antes de apresentar tal procedimento, é oportuno realizar uma importante consideração à respeito de tais curvas.

Conforme apresentado na seção 2.5.1, as medições das curvas carga-tensão normalmente são realizadas em gaiolas de testes (MARUVADA; MENEMENLIS; MALEWSKI, 1977), (YANG; CHEN; HE, 2013), as quais também são conhecidas como gaiolas de corona³⁴. Obviamente, a capacitância do condutor na gaiola é diferente da capacitância do condutor na linha de transmissão, e conseqüentemente, as curvas q-v produzidas em cada situação também são distintas. Apesar deste fato, pode-se utilizar os dados obtidos nas medições em gaiolas para obtenção das curvas q-v nos casos em que o condutor encontra-se em uma linha (MARUVADA; NGUYEN; HAMADANI-ZADEH, 1989), (CARNEIRO; MARTI, 1991). Essa aproximação pode ser realizada se for assumido que a carga, antes e depois da atividade de corona, é simétrica ao redor do condutor, e a gaiola de teste não absorve nenhuma carga espacial. Tais hipóteses são razoáveis, visto que a carga não se move mais do que algumas dezenas de centímetros do condutor, e as gaiolas utilizadas nos testes são suficientemente grandes para não absorverem carga espacial.

Com essas hipóteses a tensão v_l sobre o condutor em uma linha aérea, para a mesma carga q , relaciona-se com a tensão v_g sobre o mesmo condutor na gaiola conforme apresentado na equação (3.22):

$$v_l = v_g + P_r \cdot q \quad (3.22)$$

³⁴ Tradução literal da designação em língua inglesa “corona cage”.

$$P_r = \frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_g} \quad (3.23)$$

Onde:

C_0 : Capacitância geométrica do condutor na linha de transmissão;

C_g : Capacitância geométrica do condutor na gaiola.

A Figura 3.27 apresenta as curvas q-v para o condutor ACSR de 26,4 mm de diâmetro utilizado nos experimentos na linha EDF, onde é plotada uma das curvas obtidas por meio de medições em gaiola e sua respectiva correção para o caso em que o condutor se encontra na linha de transmissão. É oportuno ressaltar que, para o caso apresentado na Figura, a capacitância do condutor na gaiola é de $C_g=8,78$ pF/m, e para o condutor na linha EDF é de $C_0=7,66$ pF/m.

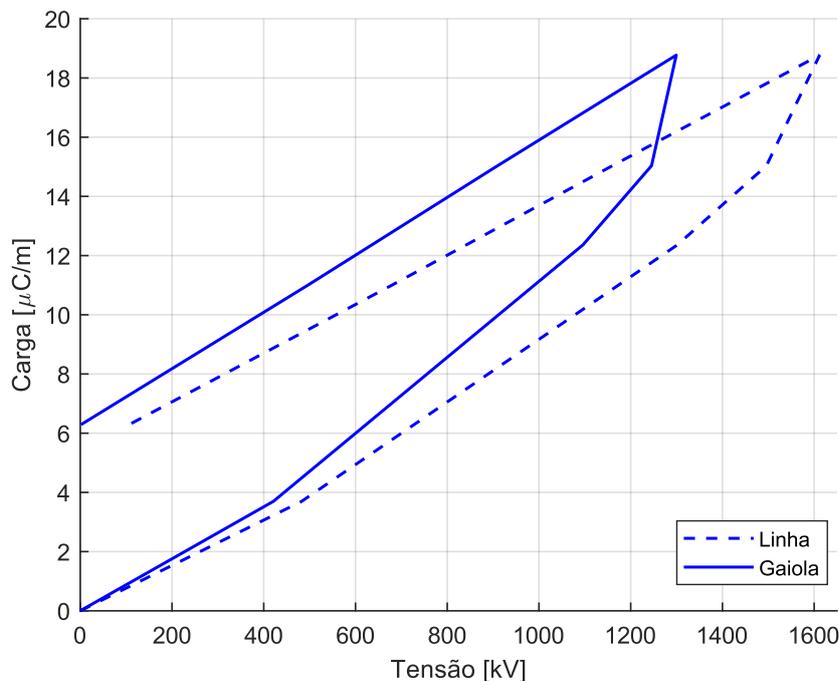


Figura 3.27 - Curvas carga-tensão para o condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro utilizado nos experimentos na linha Tidd.

Com a posse de diversas curvas q-v ajustadas para o condutor na linha de transmissão, os parâmetros C_0 , C_1 , C_2 , V_1 , V_2 podem ser estimados conforme apresentado na Figura 3.28. Como pode ser observado, os parâmetros C_1 e C_2 são obtidos calculando-se a inclinação de retas que são secantes à curva q-v. O parâmetro C_0 corresponde à própria capacitância geométrica do condutor na linha. Abaixo são apresentadas algumas importantes observações à respeito da obtenção dos parâmetros do modelo de Siliciu:

- Não existe um método bem definido para traçar as retas secantes e obter o valor dos parâmetros C_1 e C_2 . Sendo assim, tais retas são traçadas de maneira aproximada.
- No caso apresentado na Figura 3.28, tem-se que $V_1 = V_2$. Contudo, é oportuno destacar que nem sempre tal fato ocorre, visto que em certas ocasiões o valor de V_2 pode ser superior ao valor de V_1 (MIHĂILESCU-SULICIU; SULICIU, 1981).
- Os parâmetros k_1 e k_2 não possuem claramente um significado físico. Contudo, $1/k_1$ e $1/(k_1 + k_2)$ podem ser interpretados como constantes de tempo de variação de carga devido ao corona nos limites $(C_2 - C_0)(v(t) - V_2)$ e $(C_1 - C_0)(v(t) - V_1)$, respectivamente (MARUVADA; NGUYEN; HAMADANI-ZADEH, 1989). Além disto, é oportuno ressaltar que k_1 e k_2 somente podem ser obtidos por um processo de tentativa e erro. Nesse caso, devem-se realizar diversas simulações variando-se o valor desses parâmetros, de modo que a curva produzida pelo modelo seja o mais próximo possível das medições.

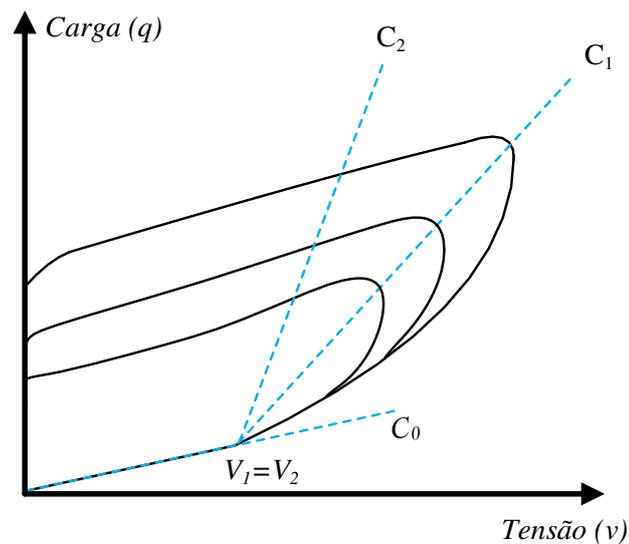


Figura 3.28 - Estimação dos parâmetros do modelo de Siliciu.

Com as informações apresentadas pode-se perceber a dificuldade existente para obtenção e sintonização dos parâmetros do modelo de Siliciu. Esse fato motivou alguns pesquisadores a utilizarem redes neurais para obter tais parâmetros (GOMES et al., 1999). Contudo, mesmo neste caso é preciso ter as medições de diversas curvas q-v. Mais informações à respeito da obtenção dos parâmetros do modelo de Siliciu podem ser obtidas no trabalho original (MIHĂILESCU-SULICIU; SULICIU, 1981).

Finalmente, utilizando-se os procedimentos descritos podem-se obter os parâmetros necessários para representação do modelo nas linhas Tidd e EDF, os quais são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros do modelo de Siliciu.

	Linha Tidd	Linha EDF
C_0 [pF/m]	7,30	7,66
C_1 [pF/m]	17,85	12,33
C_2 [pF/m]	32,80	18,22
V_1 [kV]	310	320
V_2 [kV]	310	270
k_1 [MHz]	5	4,5
k_2 [Hz]	800	1100

Conforme já descrito anteriormente, diferentemente dos outros modelos onde o efeito corona é representado por capacitâncias transversais, o modelo de Siliciu descreve a corrente de corona (equação (3.18)). Nessas circunstâncias, a representação do modelo no *software* PSCAD foi efetuada dispondo-se fontes de correntes controladas por tensão na junção entre cada trecho de linha³⁵, conforme apresentado na Figura 3.29. Para realizar o cálculo do valor da corrente de corona, utilizou-se a ferramenta *Component Wizard*, onde as equações do modelo puderam ser implementadas para interagir com o programa principal. Os resultados obtidos no cálculo da propagação de ondas para as linhas Tidd e EDF são apresentados nas Figuras 3.30 e 3.31, respectivamente. A Figura 3.32 apresenta a reconstituição da curva q-v produzida pelo modelo para as simulações na linha Tidd.

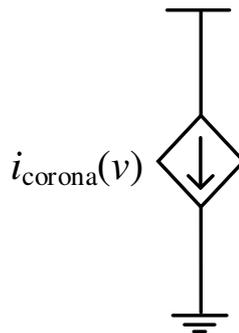


Figura 3.29 - Modelo de Siliciu.

³⁵ Nas equações do modelo, a corrente de corona é descrita em Ampere por unidade de comprimento (A/m). Como no PSCAD o efeito corona é representado como um parâmetro concentrado, deve-se multiplicar valor da corrente de corona pelo comprimento do trecho (d).

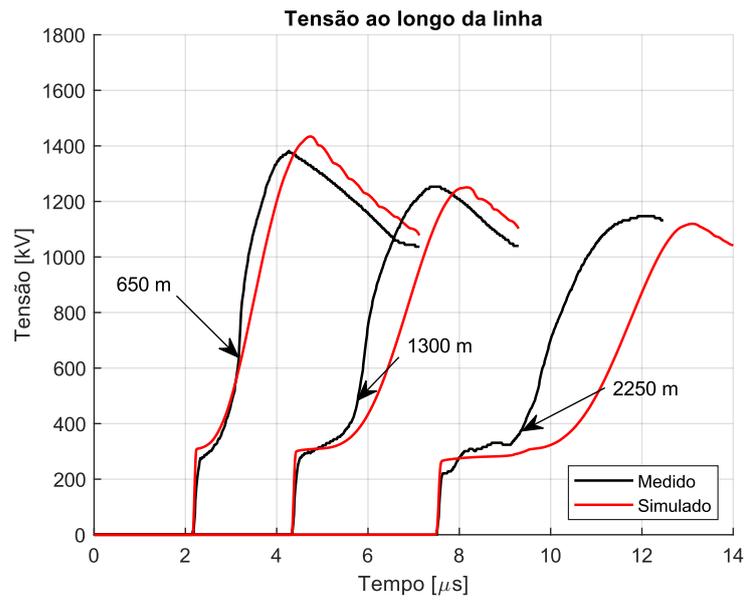


Figura 3.30 - Comparação entre as medições na linha Tidd e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Siliciu.

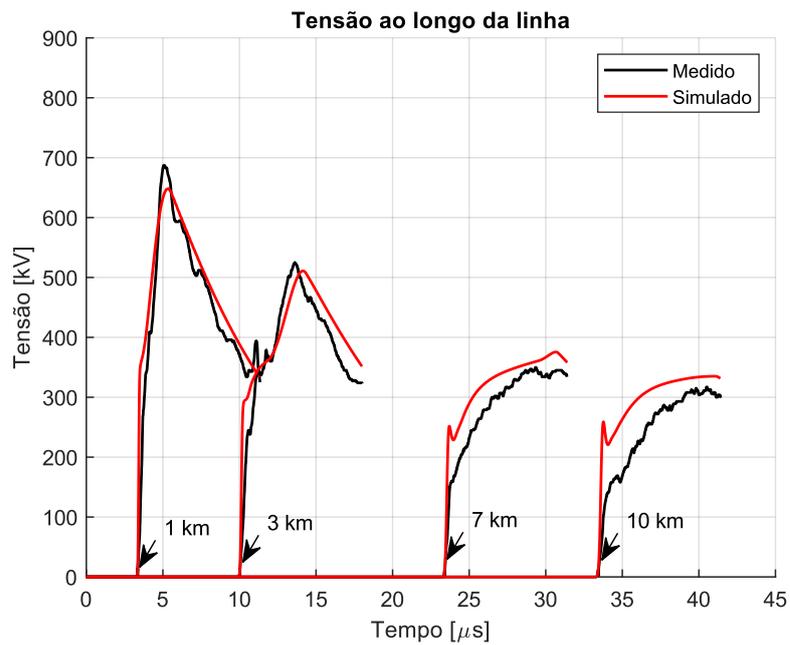


Figura 3.31 - Comparação entre as medições na linha EDF e as simulações digitais. Efeito corona representado pelo modelo de Siliciu.

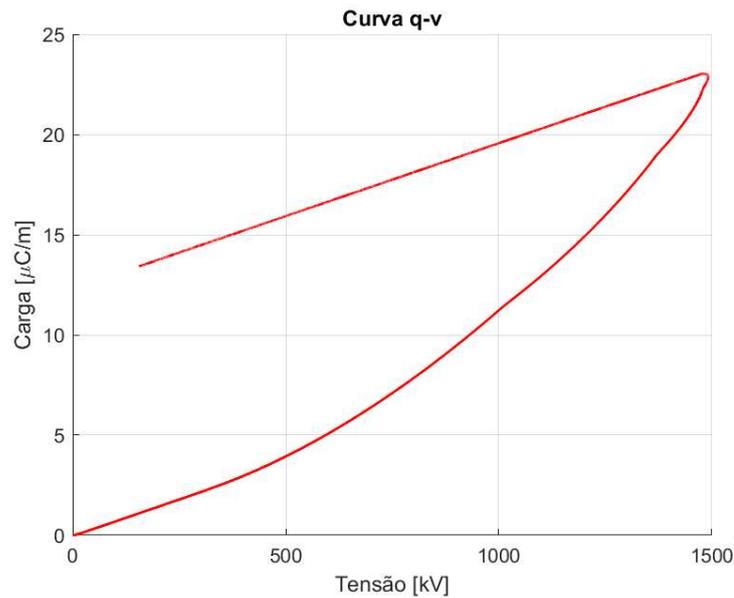


Figura 3.32 - Reconstituição da q-v produzida pelo modelo de Siliciu para simulações na linha Tidd.

Conforme pode ser observado nas Figuras 3.30 e 3.31, a precisão dos resultados obtidos com o modelo de Siliciu varia com relação às medições na linha Tidd ou EDF. Em comparação com as medições na linha Tidd, observa-se que apesar do modelo apresentar valores de máximas sobretensões muito próximos daqueles obtidos nas medições, é evidente a diferença entre as formas de onda medidas e simuladas, o que ocorre pelo fato do modelo produzir maiores distorções do que aquelas observadas nas medições. Por outro lado, no caso da linha EDF é possível observar que o modelo apresenta melhores resultados do que os obtidos na linha Tidd, já que as formas de onda medidas e simuladas são relativamente próximas em todos os pontos analisados.

Uma vez que o modelo de Siliciu é capaz de representar a curva q-v de maneira precisa, é fácil perceber que este modelo também pode produzir resultados muito precisos, já que todo processo de atenuação e distorção de surtos que se propagam ao longo da linha está diretamente relacionado ao formato e a área enlaçada pela curva q-v. Contudo, conforme apresentado anteriormente, a maior dificuldade nesse caso é obter os parâmetros de maneira precisa, a fim de que a curva produzida pelo modelo nas simulações seja verdadeiramente próxima da obtida nas medições. Sendo assim, conclui-se que a imprecisão dos resultados fornecidos por este modelo se deve mais a problemas relacionados ao ajuste dos parâmetros do que à incapacidade do modelo de representar o fenômeno.

Nessas circunstâncias, se os parâmetros foram corretamente ajustados para ambas as linhas, por que no caso das simulações na linha Tidd os resultados obtidos não apresentam boa concordância com as medições? Isso decorre do fato de que as medições do projeto Tidd

foram realizadas na década de 50, sendo que nessa época ainda não se utilizavam gaiolas de corona para medições da curva q-v. Na verdade, o esquema utilizado consistia em dispor uma chapa condutora próxima ao condutor analisado, e por meio da capacitância entre a chapa e o solo era possível obter o valor da carga (WAGNER; LLOYD, 1955). Contudo, ocorre que a presença dessa chapa altera a distribuição do campo elétrico produzido pelo condutor, e consequentemente provoca erros de medições da curva q-v (NODA, 1996). Desse modo, existe a possibilidade de que as curvas q-v medidas para o condutor usado na linha Tidd não sejam muito precisas. Uma vez que o ajuste dos parâmetros é feito por meio das curvas obtidas nas medições, conclui-se que nesse caso em específico o problema pode estar relacionado diretamente com as medições, e sendo assim, os resultados obtidos no cálculo da propagação de onda serão imprecisos, já que o problema está nas medições da curva e não no ajuste dos parâmetros.

Um outro aspecto importante a ser relatado reside no fato de que, conforme já apresentado no capítulo 2, o efeito corona é um fenômeno fortemente influenciado pelas condições climáticas, como velocidade do vento, umidade do ar, pressão, temperatura entre outros. Sendo assim, uma representação acurada da curva q-v indiscutivelmente é necessária para obtenção de bons resultados no cálculo de propagação de ondas. Contudo, não necessariamente tal fato garantirá a obtenção de resultados altamente precisos, já que existem outros fatores envolvidos neste fenômeno que, infelizmente, não podem ser facilmente controlados ou representados nas simulações.

3.7 Síntese do capítulo

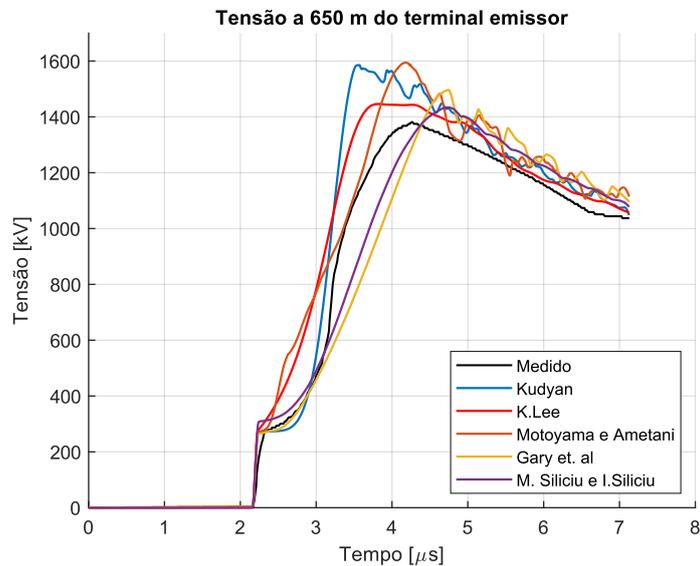
Nesta seção são apresentadas as principais conclusões à respeito da análise do desempenho dos modelos de efeito corona avaliados neste capítulo.

A Figura 3.33 apresenta uma comparação entre as medições na linha Tidd e os resultados obtidos nas simulações com todos os modelos avaliados neste trabalho. A fim de facilitar a visualização, neste caso plotou-se separadamente as formas de onda obtidas a 650 m, 1300 m e 2250 m do terminal emissor.

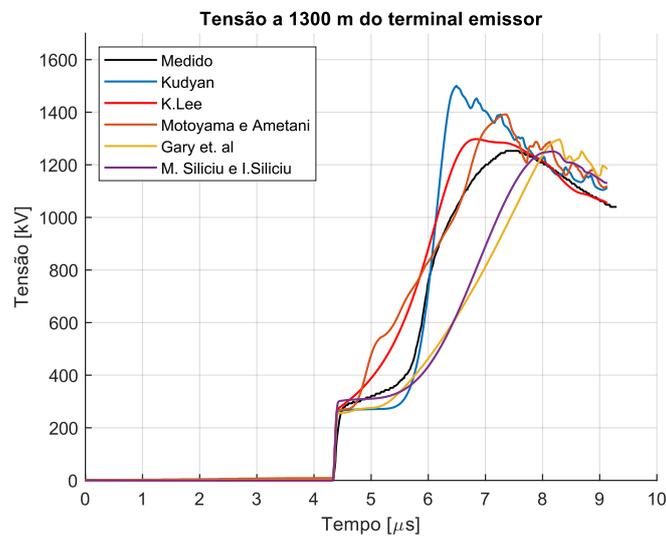
De um modelo geral, observa-se que o modelo de K. Lee é o que apresenta os melhores resultados, visto que tanto as máximas sobretensões quanto as formas de onda produzidas pelo modelo possuem boa concordância com as medições em todos os pontos analisados. Por outro lado, os piores resultados foram obtidos pelo modelo de Kudyan e Shih, já que as máximas sobretensões calculadas através deste modelo são muito superiores às obtidas nas

medições. Tal divergência nos resultados pode ser explicada pelo fato de que, dentre os modelos analisados neste trabalho, o de Kudyan e Shih é o mais simplificado.

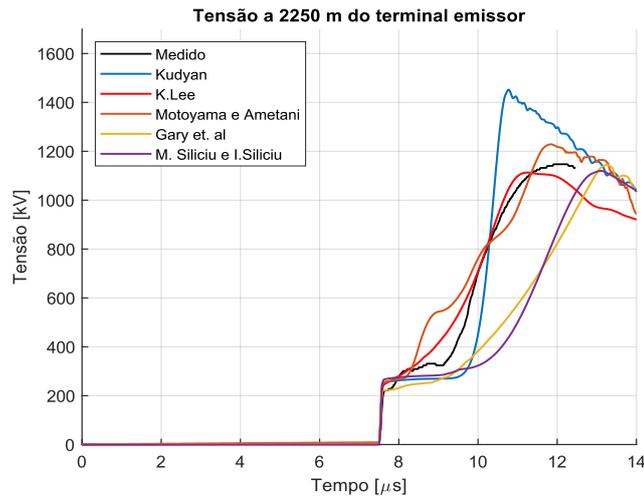
Com relação aos demais modelos, o nível de precisão dos resultados varia de acordo com o ponto analisado. No caso do modelo de Motoyama e Ametani, observa-se que este apresenta boa concordância para a forma de onda a 2250 m do terminal emissor, porém, o mesmo não ocorre para as formas de onda obtidas a 650 m e 1300 m, onde os valores máximos de sobretensões produzidos pelo modelo são muito superiores aos observados nas medições. No caso dos modelos de Gary e Siliciu, observa-se que a precisão dos resultados diminui à medida em que o sinal se propaga ao longo da linha. Isso ocorre pelo fato de que, ao menos para a situação analisada, tais modelos produzem maiores distorções nas formas de onda do que aquelas observadas nas medições.



(a) – 650 m



(b) - 1300 m

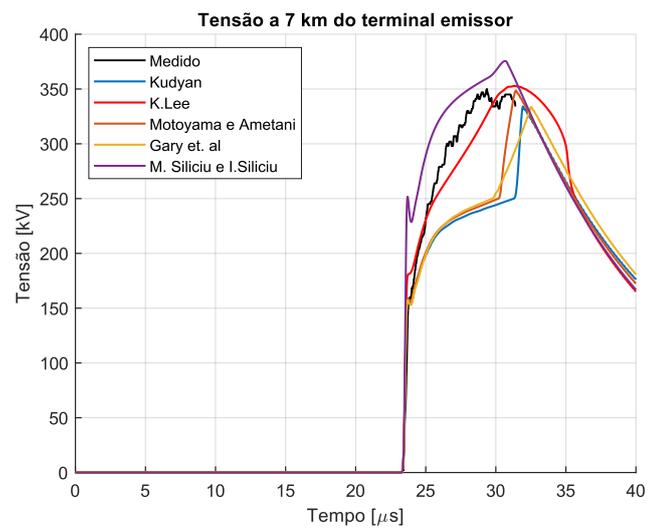
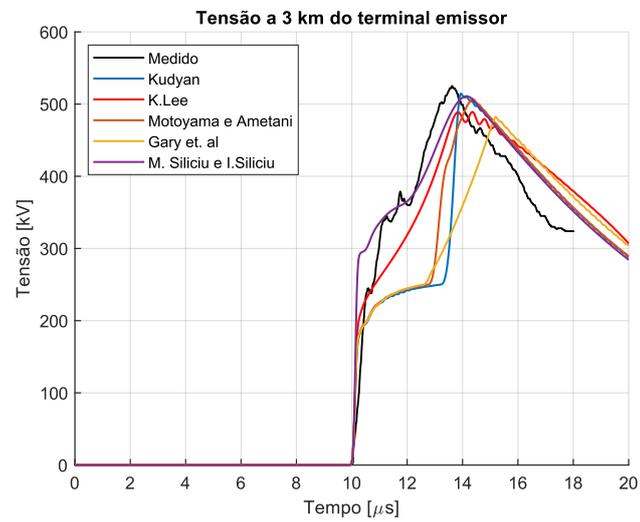
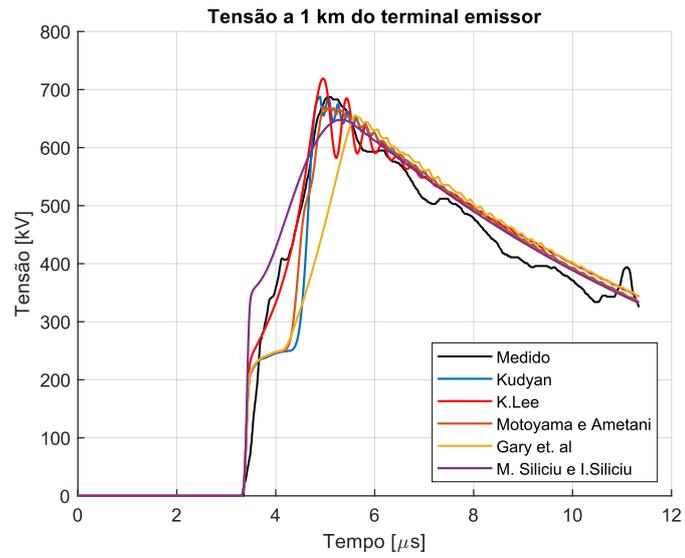


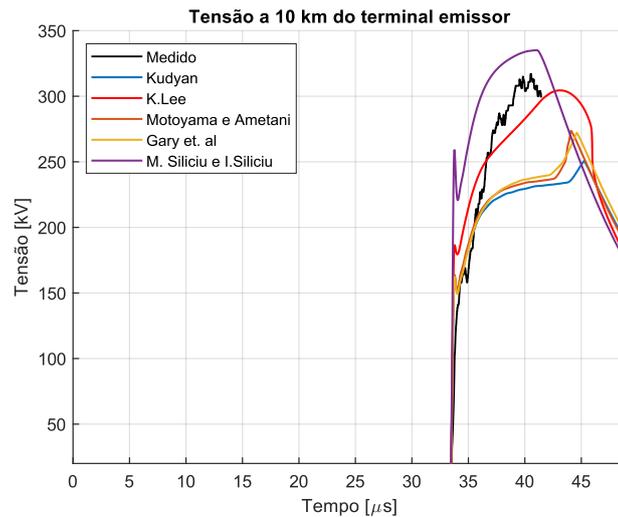
(c) – 2250 m

Figura 3.33 - Comparação entre as formas de onda obtidas nas simulações e as medições da linha Tidd.

A Figura 3.34 apresenta a comparação entre as medições na linha EDF e os resultados obtidos nas simulações com os modelos avaliados, e assim como no caso anterior, os resultados foram plotados separadamente para cada ponto de medição. Pela análise das figuras pode-se perceber que neste caso os melhores resultados foram produzidos pelos modelos de Siliciu e de K. Lee, sendo que a precisão de cada um deles depende do ponto analisado. Para as formas de onda obtidas a 1 km e 3 km do terminal emissor, observa-se que o modelo de Siliciu apresentou melhor concordância com as medições, enquanto para as formas de onda obtidas a 7 km e 10 km os melhores resultados foram obtidos com o modelo de K. Lee.

Com relação aos demais modelos analisados, percebe-se que a precisão dos resultados obtidos tende a diminuir à medida em que o sinal se propaga ao longo da linha. Esse fato indica que estes modelos podem não ser adequados para serem utilizados nos casos onde o sinal viaja por longas distâncias. Ademais, é oportuno frisar que assim como no caso da linha Tidd, o modelo de Gary *et al.* produz maiores distorções nas formas de onda para todos os pontos analisados.





(d) – 10 km

Figura 3.34 - Comparação entre as formas de onda obtidas nas simulações e as medições na linha EDF.

A partir das análises realizadas neste capítulo é fácil perceber que, de um modo geral, o modelo de K. Lee apresenta o melhor desempenho dentre os modelos analisados. Como pode ser observado, em comparação com as medições este modelo foi capaz de produzir resultados no mínimo satisfatórios, representando com relativa precisão a atenuação e distorção das formas de onda provocadas pelo efeito corona. É oportuno frisar que esta é uma importante constatação, visto que apesar do bom desempenho, este modelo ainda é pouco utilizado na literatura, se comparado ao modelo de Siliciu. Além disso, conforme descrito no capítulo 2, diferentemente da grande maioria dos modelos de corona que baseiam-se na curva q-v ou em abordagens mais complexas para obter uma previsão da variação da capacitância, o modelo de K. Lee é baseado nas relações empíricas propostas por (UMOTO; HARA, 1969), as quais foram apresentadas há cerca de meio século.

Com relação ao desempenho do modelo de Siliciu, os resultados obtidos não permitem definir se sua utilização é realmente vantajosa. Por um lado, é evidente sua capacidade de representar a dependência da frequência da curva q-v, sendo que dentre os modelos analisados este é o único que possui tal características. Por outro lado, o modelo é extremamente matemático, e a dificuldade na obtenção dos parâmetros constitui uma forte desvantagem à sua aplicação. Ademais, é oportuno ressaltar que, conforme apresentado anteriormente, no caso dos experimentos Tidd o desempenho deste modelo pode ter sido afetado por conta de medições imprecisas da curva q-v, o que conseqüentemente compromete a obtenção dos parâmetros e a precisão dos resultados obtidos. Nessas circunstâncias, para uma melhor avaliação seria necessário a comparação com mais dados de medições em campo, o que também permitiria investigar se a representação dinâmica da curva q-v realmente é impactante no cálculo de

propagação de ondas. Contudo, para tal avaliação seria necessário a existência de mais dados experimentais nessa área.

Um ponto negativo com relação à utilização dos modelos de K. Lee e de Siliciu reside no fato de que, para aplicação destes se faz necessário o conhecimento dos parâmetros que, infelizmente, só podem ser obtidos através de medições. O mesmo não ocorre nos modelos de Gary e de Kudyan e Shih, os quais podem ser aplicados conhecendo-se apenas o raio do condutor e a capacitância geométrica da linha. Contudo, conforme pode ser observado nos resultados, tais modelos não apresentam bom desempenho, principalmente nos casos em que a onda viaja por distâncias maiores.

4 UMA NOVA METODOLOGIA PARA REPRESENTAÇÃO DO EFEITO CORONA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste capítulo é apresentada uma nova técnica para representação do efeito corona em linhas de transmissão. Baseando-se no modelo Bergeron e no esquema apresentado por Dommel para representação de linhas por parâmetros distribuídos em programas do tipo EMT (DOMMEL, 1969), foi desenvolvido um modelo de linha cujos parâmetros são dependentes do valor da tensão aplicada ao condutor. Esse modelo, denominado de VDLM (*Voltage-Dependent Line Model*), foi implementado no *software* Matlab, e os resultados obtidos nas simulações foram validados por meio de comparações com dados de medições em campo.

De forma a melhor situar o leitor, este capítulo está dividido em 4 seções. Na seção 4.1 é realizada uma revisão a respeito do modelo Bergeron e do esquema utilizado por Dommel para representação de linhas de transmissão no programa EMTP. Em seguida, na seção 4.2, apresenta-se a modelagem matemática do VDLM. Na seção 4.3 é proposta uma técnica de solução simplificada que permite a resolução das equações nodais do sistema sem a necessidade de utilizar métodos iterativos. Ao final, na seção 4.4, são realizados testes para validação do modelo proposto, onde os resultados obtidos nas simulações são comparados com os dados de medições em campo.

4.1 Representação do modelo Bergeron em programas do tipo EMT

O primeiro esquema para representação de linhas de transmissão por parâmetros distribuídos nos programas do tipo EMT foi apresentado em (DOMMEL, 1969). Nesta seção é feita uma breve descrição a respeito deste modelo, o qual serviu de base para o desenvolvimento do VDLM.

Inicialmente, considere uma linha de transmissão monofásica sem perdas e com parâmetros invariantes com a frequência, cujo comportamento é descrito pelas equações diferenciais apresentadas em (4.1) e (4.2). Nessas equações, $v(x, t)$ e $i(x, t)$ correspondem, respectivamente, à tensão e à corrente no instante t a uma distância x de um determinado termi-

nal da linha; L_0 e C_0 correspondem, respectivamente, à indutância e à capacitância geométrica da linha por unidade de comprimento.

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = C_0 \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (4.2)$$

A solução geral deste par de equações diferenciais foi proposta inicialmente por d'Alembert em 1747, e é apresentada em (4.3) e (4.4):

$$i(x, t) = f_1(x - v_{prop} \cdot t) + f_2(x + v_{prop} \cdot t) \quad (4.3)$$

$$v(x, t) = Z_0 \cdot f_1(x - v_{prop} \cdot t) - Z_0 \cdot f_2(x + v_{prop} \cdot t) \quad (4.4)$$

Nas equações acima, Z_0 e v_{prop} correspondem, respectivamente, à impedância característica e à velocidade de propagação, que podem ser obtidas através da capacitância e da indutância geométrica da linha, conforme apresentado em (4.5) e (4.6). Ademais, $f_1(x - v_{prop} \cdot t)$ e $f_2(x + v_{prop} \cdot t)$ são funções arbitrárias de $(x - v_{prop} \cdot t)$ e $(x + v_{prop} \cdot t)$, e descrevem ondas que se propagam em sentidos contrários. Nesse caso, $f_1(x - v_{prop} \cdot t)$ pode ser interpretada como uma onda que viaja no sentido positivo de x com velocidade v_{prop} , enquanto $f_2(x + v_{prop} \cdot t)$ corresponde a uma onda que viaja com a mesma velocidade, porém no sentido negativo de x .

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (4.5)$$

$$v_{prop} = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} \quad (4.6)$$

Pelo método de Bergeron, a solução das equações (4.3) e (4.4) pode ser obtida multiplicando-se a equação (4.3) por Z_0 , em seguida adiciona-se e subtrai-se este produto à equação (4.4), obtendo-se assim as equações (4.7) e (4.8):

$$v(x, t) + Z_0 \cdot i(x, t) = 2Z_0 \cdot f_1(x - v_{prop} \cdot t) \quad (4.7)$$

$$v(x, t) - Z_0 \cdot i(x, t) = -2Z_0 \cdot f_2(x + v_{prop} \cdot t) \quad (4.8)$$

Nas equações (4.7) e (4.8), tem-se que as parcelas $v(x, t) + Z_0 \cdot i(x, t)$ e $v(x, t) - Z_0 \cdot i(x, t)$ são constantes enquanto $(x - v_{prop} \cdot t)$ e $(x + v_{prop} \cdot t)$ forem constantes, respectivamente. O significado dessas equações pode ser compreendido da seguinte maneira: considere um observador fictício que viaja no sentido positivo ao longo de toda linha com uma velocidade v_{prop} . Consequentemente, para este observador as funções $(x - v_{prop} \cdot t)$ e $v(x, t) + Z \cdot i(x, t)$ são constantes. Considerando que a linha possui um comprimento l e conecta os

terminais k e m (Figura 4.2), o tempo τ_0 que este observador leva para viajar de um terminal ao outro pode ser calculado conforme apresentado em (4.9):

$$\tau_0 = \frac{l}{v_{prop}} = \sqrt{L_0 C_0} \cdot l \quad (4.9)$$

Deste modo, é fácil perceber que a expressão $v(x, t) + Z_0 \cdot i(x, t)$ encontrada pelo observador quando este deixa o terminal m no instante $(t - \tau_0)$ é a mesma de quando ele chega no terminal k no instante t . Este conceito também é válido para o caso em que observador viaja no sentido negativo ao longo da linha, e a generalização dos casos é apresentada nas equações (4.10) e (4.11). Basicamente, essas equações descrevem que um sinal que parte de um terminal da linha ideal chega ao terminal oposto com a mesma amplitude (sem perdas), e o tempo necessário para esta viagem é igual ao tempo de propagação (τ_0). Esse conceito é apresentado graficamente na Figura 4.1.

$$v_k(t) + Z_0 \cdot (-i_{k,m}(t)) = v_m(t - \tau_0) + Z_0 \cdot i_{m,k}(t - \tau_0) \quad (4.10)$$

$$v_m(t) + Z_0 \cdot (-i_{m,k}(t)) = v_k(t - \tau_0) + Z_0 \cdot i_{k,m}(t - \tau_0) \quad (4.11)$$

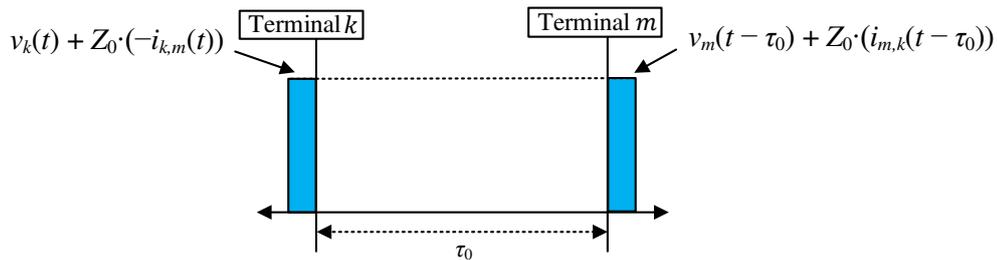


Figura 4.1 – Representação gráfica das equações que descrevem a propagação de sinais em uma linha de transmissão sem perdas.

A partir de (4.10) e (4.11) obtém-se as equações que descrevem as correntes nos terminais da linha, conforme apresentado em (4.12) e (4.13). Essas equações também podem ser representadas por meio de uma rede de impedância equivalente, a qual é composta por resistores (Z_0) e fontes de correntes históricas ($I_k(t - \tau_0)$ e $I_m(t - \tau_0)$), conforme apresentado na Figura 4.3.

$$i_{k,m}(t) = \frac{v_k(t)}{Z_0} + I_k(t - \tau_0) \quad (4.12)$$

$$i_{m,k}(t) = \frac{v_m(t)}{Z_0} + I_m(t - \tau_0) \quad (4.13)$$

Onde:

$$I_k(t - \tau_0) = -\frac{v_m(t - \tau_0)}{Z_0} - i_{m,k}(t - \tau_0) \quad (4.14)$$

$$I_m(t - \tau_0) = -\frac{v_k(t - \tau_0)}{Z_0} - i_{k,m}(t - \tau_0) \tag{4.15}$$

Essa metodologia é bastante simples, e pode ser utilizada para representação de uma linha monofásica ou um dos modos de uma linha polifásica (DOMMEL, 1969). Pela Figura 4.3, observa-se que topologicamente os terminais da linha não estão conectados. Porém, a relação existente entre eles é representada indiretamente por meio dos termos históricos.

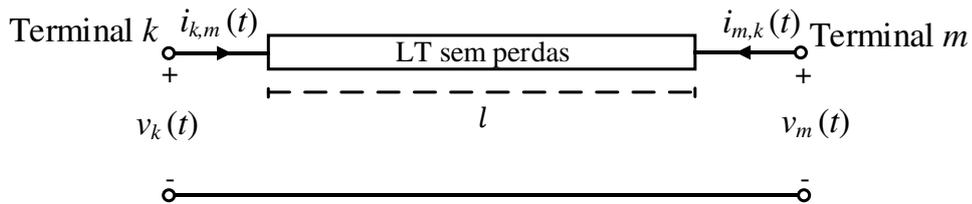


Figura 4.2 - Linha de transmissão sem perdas.

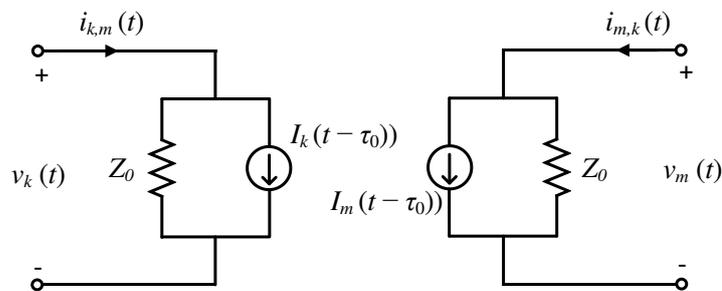


Figura 4.3 - Rede de impedância equivalente usada para representação de uma linha de transmissão sem perdas.

As perdas longitudinais podem ser representadas por meio de parâmetros concentrados, onde a linha é dividida em dois segmentos de mesmo comprimento e são inseridos resistores nas extremidades e no meio da linha, conforme apresentado na Figura 4.4. Nessa Figura, R corresponde à resistência total, obtida pelo produto entre a resistência por unidade de comprimento (R_0) e o comprimento total da linha (l).

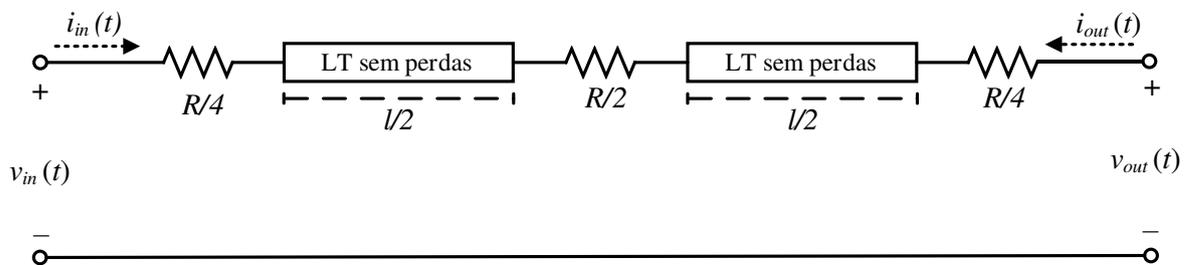


Figura 4.4 – Representação das perdas longitudinais no modelo de Bergeron.

O esquema apresentado na Figura 4.4 pode ser simplificado por meio das Leis de Kirchhoff, onde obtém-se a rede de impedância equivalente apresentada na Figura 4.5. Nesse

caso, as equações que descrevem as correntes nos terminais da linha são apresentadas em (4.16) e (4.17)³⁶.

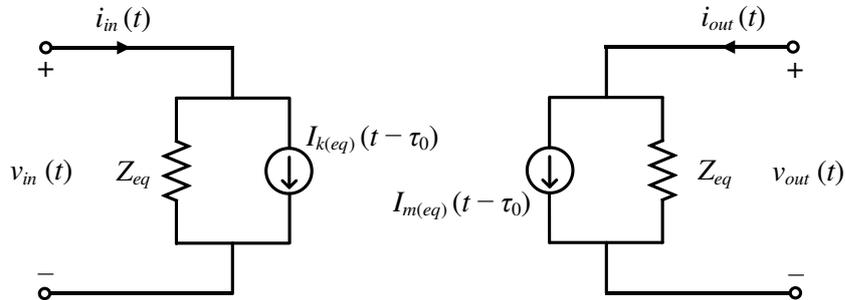


Figura 4.5 – Rede de impedância equivalente para uma linha de transmissão com representação das perdas longitudinais.

$$i_{in}(t) = \frac{1}{Z_{eq}} \left\{ v_{in}(t) + Z_0 \cdot I_{k(eq)}(t - \tau_0) + \frac{R}{4} \cdot I_{m(eq)}(t - \tau_0) \right\} \quad (4.16)$$

$$i_{out}(t) = \frac{1}{Z_{eq}} \left\{ v_{out}(t) + Z_0 \cdot I_{m(eq)}(t - \tau_0) + \frac{R}{4} \cdot I_{k(eq)}(t - \tau_0) \right\} \quad (4.17)$$

$$I_{k(eq)}(t - \tau_0) = -\frac{1}{Z_{eq}} v_{out}(t - \tau_0) - \frac{Z_0 - \frac{R}{4}}{Z_{eq}} \cdot i_{out}(t - \tau_0) \quad (4.18)$$

$$I_{m(eq)}(t - \tau_0) = -\frac{1}{Z_{eq}} v_{in}(t - \tau_0) - \frac{Z_0 - \frac{R}{4}}{Z_{eq}} \cdot i_{in}(t - \tau_0) \quad (4.19)$$

$$Z_{eq} = Z_0 + \frac{R}{4} \quad (4.20)$$

Como pode ser observado nas equações (4.16) e (4.17), para realizar o cálculo das correntes $i_{in}(t)$ e $i_{out}(t)$ é necessário conhecer as tensões instantâneas nos terminais $v_{in}(t)$ e $v_{out}(t)$. Conforme esquema descrito em (DOMMEL, 1969), essas tensões podem ser facilmente calculadas pelas equações nodais do sistema, conforme apresentado em (4.21):

$$[\mathbf{Y}] \cdot [\mathbf{v}(t)] = [\mathbf{i}(t)] - [\mathbf{I}] \quad (4.21)$$

Nessa equação, tem-se que:

$[\mathbf{Y}]$ - Matriz condutância nodal, a qual pode ser construída conhecendo-se a impedância equivalente dos componentes e a topologia do circuito.

$[\mathbf{v}(t)]$ – Vetor coluna contendo as tensões em todos os nós do sistema no instante t . Neste vetor podem existir alguns elementos conhecidos (como fontes de tensão conectadas entre a referência e determinados nós), e os demais são desconhecidos.

³⁶ É oportuno ressaltar que, conforme descrito em (CONTI, 2006) e também verificado pelo autor deste trabalho, as equações apresentadas no artigo original de H. Dommel (DOMMEL, 1969) estão incorretas.

$[\mathbf{i}(t)]$ – Vetor coluna contendo as possíveis fontes de correntes conectadas aos nós do sistema no instante t . Todos os elementos deste vetor são conhecidos.

$[\mathbf{I}]$ – Vetor coluna contendo as fontes de correntes históricas.

Como $[\mathbf{Y}]$, $[\mathbf{i}(t)]$ e $[\mathbf{I}]$ são termos conhecidos na equação (4.21), o cálculo das tensões nodais consiste na resolução de um sistema de equações lineares. O procedimento utilizado para resolução desse sistema é bem difundido na literatura e não será explicado nesta seção. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em (BRANIN, 1967).

É oportuno lembrar que hoje em dia já existem diversos modelos de linha mais bem elaborados, capazes de representar a variação dos parâmetros longitudinais da linha com a frequência (MARTI, 1982), (NODA; NAGAOKA; AMETANI, 1996), (MORCHED; GUSTAVSEN; TARTIBI, 1999). De qualquer forma, a estrutura utilizada por esses modelos para representação da linha em programas do tipo EMT é muito semelhante à apresentada acima, que basicamente consiste em representar a linha por meio de um circuito equivalente.

4.2 Um modelo de linha com parâmetros dependentes da tensão (VDLM)

Na seção anterior foi apresentado o esquema básico utilizado para representação de linhas de transmissão em programas do tipo EMT, bem como o método utilizado para resolução do circuito (equações nodais). Nesta seção é apresentada a modelagem matemática do VDLM, que corresponde a um caso mais geral do modelo de Bergeron e permite a representação da capacitância e condutância transversal como parâmetros dependentes da tensão.

4.2.1 Representação da capacitância dinâmica

Considere uma linha de transmissão monofásica sem perdas e com parâmetros constantes na frequência, conforme apresentado na Figura 4.2. Para representação da capacitância dinâmica no modelo de Bergeron, deve-se considerar que a impedância característica e o tempo de propagação são funções da tensão, conforme apresentado em (4.22) e (4.23):

$$Z(v(t)) = \sqrt{\frac{L_0}{C(v(t))}} \quad (4.22)$$

$$\tau(v(t)) = \sqrt{L_0 \cdot C(v(t))} \cdot l \quad (4.23)$$

Para tensões inferiores à tensão crítica, a impedância característica e tempo de propagação permanecem estáticos, e podem ser calculados por meio da indutância e da capacitância

geométricas da linha. Quando a tensão na linha ultrapassa o limite de corona (V_{crit}) ocorre a ionização do ar ao redor condutor e, portanto, o valor da capacitância passa a ser função da tensão. Verifica-se pela análise das equações (4.22) e (4.23) que o efeito corona gera, simultaneamente, aumento no tempo de propagação e redução da impedância característica.

Com as modificações realizadas na impedância característica e no tempo de propagação, as equações (4.10) e (4.11) podem ser reescritas conforme apresentado em (4.24) e (4.25), cujo significado físico é apresentado na Figura 4.6. Como pode ser visto, essas equações descrevem que um sinal que parte de um determinado terminal da linha atinge o terminal oposto com a mesma amplitude (sem perdas). No entanto, a diferença com relação às equações (4.10) e (4.11) é que, neste caso, a amplitude do sinal e o tempo de propagação são funções da tensão e podem ser modificados a cada passo de integração, de acordo com o valor de $v(t)$. Basicamente, tem-se que quanto maior o valor da capacitância do sistema, menor a amplitude do sinal (devido à redução da impedância característica) e maior o tempo de propagação (devido à redução da velocidade de propagação).

$$v_k(t) + Z(v(t)) \cdot (-i_{k,m}(t)) = v_m(t - \tau(v(t))) + Z(v(t)) \cdot i_{m,k}(t - \tau(v(t))) \quad (4.24)$$

$$v_m(t) + Z(v(t)) \cdot (-i_{m,k}(t)) = v_k(t - \tau(v(t))) + Z(v(t)) \cdot i_{k,m}(t - \tau(v(t))) \quad (4.25)$$

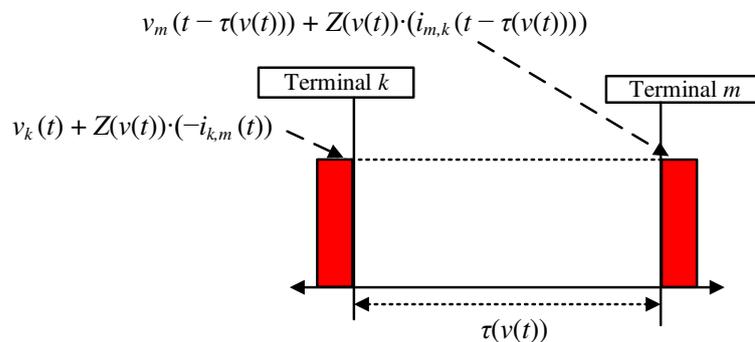


Figura 4.6 – Interpretação gráfica das equações de linha com representação da capacitância dinâmica.

Isolando-se $i_{k,m}(t)$ e $i_{m,k}(t)$ em (4.24) e (4.25), obtém-se as equações (4.26) e (4.27), respectivamente. Essas equações descrevem as correntes nos terminais de uma linha de transmissão cuja capacitância é dependente da tensão, e também podem ser representadas por meio de uma rede de impedância equivalente, conforme apresentado na Figura 4.7. Como poder ser visto na figura, a rede de impedância equivalente é composta por resistores não-lineares e fontes de correntes controladas pela tensão.

$$i_{k,m}(t) = \frac{v_k(t)}{Z(v(t))} + I_k(t - \tau(v(t))) \quad (4.26)$$

$$i_{m,k}(t) = \frac{v_m(t)}{Z(v(t))} + I_m(t - \tau(v(t))) \quad (4.27)$$

Onde:

$$I_k(t - \tau(v(t))) = -\frac{v_m(t - \tau(v(t)))}{Z(v(t))} - i_{m,k}(t - \tau(v(t))) \quad (4.28)$$

$$I_m(t - \tau(v(t))) = -\frac{v_k(t - \tau(v(t)))}{Z(v(t))} - i_{k,m}(t - \tau(v(t))) \quad (4.29)$$

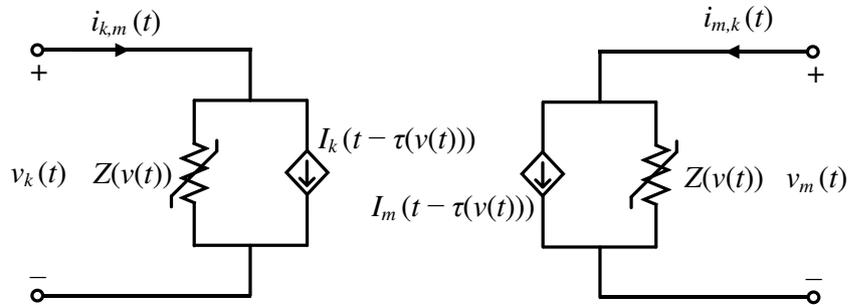


Figura 4.7 Rede de impedância equivalente para uma linha de transmissão sem perdas e com representação da capacitância dinâmica.

4.2.2 Representação da resistência longitudinal e das perdas por efeito corona

Conforme discutido no capítulo 2, o processo de ionização do ar produz simultaneamente elevação da capacitância da linha e aumentos das perdas, sendo que este último ocorre principalmente devido ao transporte de íons. Como visto na seção anterior, a elevação no valor da capacitância provoca a redução da impedância característica, e conseqüentemente leva à redução da amplitude dos sinais que se propagam entre os terminais da linha. Contudo, verificou-se analiticamente que a atenuação dos sinais devido ao efeito corona é muito maior do que aquela produzida apenas pela redução no valor da impedância característica, já que a variação da capacitância pode representar o aumento da região de condução, mas não é capaz de representar as perdas causadas pelo transporte de íons. Nessas circunstâncias, deu-se a necessidade de incluir elementos que promovessem uma representação mais acurada das perdas por efeito corona, e verificou-se que a maneira mais prática de se realizar tal representação seria por meio de resistores em derivação dispostos nos terminais da linha³⁷.

Uma importante consideração deve ser feita com relação à representação da resistência longitudinal. Como visto anteriormente, para o caso de linhas longas o procedimento adotado consiste basicamente em tomar a linha de transmissão sem perdas e dividi-la em dois segmen-

³⁷ Não é demais lembrar que o processo de transporte de íons constitui um fenômeno complexo, cuja representação matemática exige abordagens estocásticas e muitas vezes mostra-se inviável para aplicações práticas. Desse modo, a representação das perdas por efeito corona por meio de resistores em derivação apenas visa produzir no sistema os mesmos efeitos do fenômeno de transporte de íons, que consiste no aumento das perdas.

tos de mesmo comprimento, sendo que deste modo a resistência longitudinal total é dividida entre os terminais e o meio da linha. Todavia, como no modelo de Bergeron se conhece apenas as tensões nos terminais, surge a necessidade de realizar a discretização espacial para representação do efeito corona, sendo que para o estudo de descargas atmosféricas o comprimento dos trechos é da ordem de algumas dezenas de metros. Nessas circunstâncias, uma vez que a linha é representada por trechos curtos, a resistência longitudinal e a condutância em derivação podem ser representadas por meio de resistores dispostos apenas nos terminais da linha de transmissão sem perdas, conforme apresentado na Figura 4.8, sem a necessidade de subdividir a linha em dois trechos.

A condutância em derivação é representada através de resistores não-lineares controlados por tensão, os quais assumem altos valores de resistividade quando a linha não está sob efeito corona (comportam-se como uma chave aberta). Como pode ser observado na Figura 4.8, a resistência longitudinal total do trecho é dividida entre os terminais da linha, assim como a resistência em derivação. Contudo, vale ressaltar que como a resistência em derivação é disposta em paralelo, esta deve ser multiplicada por 2 e não dividida por 2, como realizado para a resistência longitudinal.

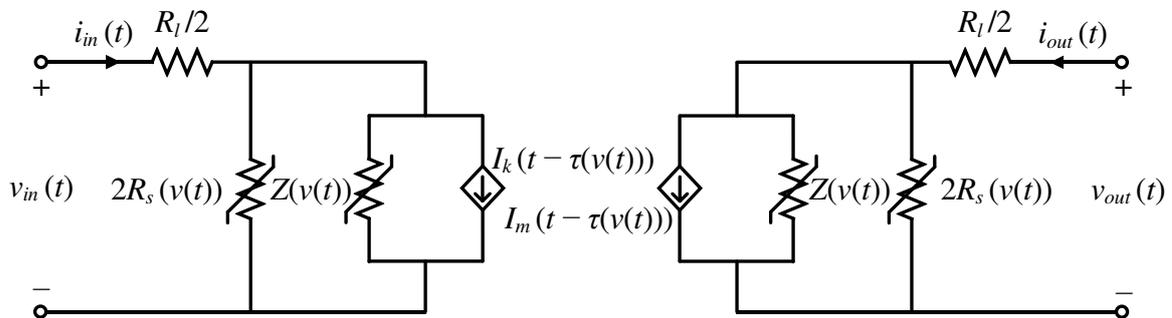


Figura 4.8 - Representação das perdas longitudinais e da condutância transversal.

O circuito da Figura 4.8 pode ser simplificado pela aplicação das Leis de Kirchhoff, onde finalmente obtém-se a rede de impedância equivalente do VDLM, a qual é apresentada na Figura 4.9. Nesse circuito, as correntes nos terminais da linha são descritas pelas equações (4.30) e (4.31).

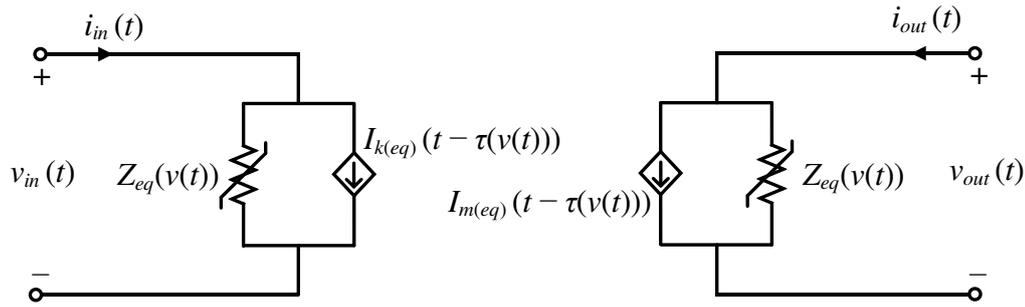


Figura 4.9 - Rede de impedância equivalente do VDLM.

$$i_{in}(t) = \frac{v_{in}(t)}{Z_{eq}(v(t))} + I_{k(eq)}(t - \tau(v(t))) \quad (4.30)$$

$$i_{out}(t) = \frac{v_{out}(t)}{Z_{eq}(v(t))} + I_{m(eq)}(t - \tau(v(t))) \quad (4.31)$$

Onde:

$$I_{k(eq)}(t - \tau(v(t))) = - \frac{1}{Z_{eq}(v(t))} \cdot \left[v_{out}(t - \tau(v(t))) + \left(Z_s(v(t)) - \frac{R_l}{2} \right) \cdot i_{out}(t - \tau(v(t))) \right] \quad (4.32)$$

$$I_{m(eq)}(t - \tau(v(t))) = - \frac{1}{Z_{eq}(v(t))} \cdot \left[v_{in}(t - \tau(v(t))) + \left(Z_s(v(t)) - \frac{R_l}{2} \right) \cdot i_{in}(t - \tau(v(t))) \right] \quad (4.33)$$

$$Z_s(v(t)) = \frac{2R_s(v(t)) \cdot Z(v(t))}{2R_s(v(t)) + Z(v(t))} \quad (4.34)$$

$$Z_{eq}(v(t)) = Z_s(v(t)) + \frac{R_l}{2} \quad (4.35)$$

Algumas importantes considerações devem ser feitas com relação ao conjunto de equações (4.30) - (4.35):

- Pode-se observar que essas equações representam um caso mais geral do modelo clássico de Bergeron. Tal constatação pode ser obtida calculando-se o limite quando $R_s(v(t)) \rightarrow \infty$, $R_l \rightarrow 0$, $Z_{eq}(v(t)) \rightarrow Z_0$, $\tau(v(t)) \rightarrow \tau_0$, onde obtém-se como resultado as equações (4.12) - (4.15), as quais descrevem as correntes nos terminais de uma linha de transmissão sem perdas. Sendo assim, o VDLM pode ser utilizado de modo genérico, tanto para casos onde há ocorrência de efeito corona quanto para casos onde não há a ocorrência do fenômeno.
- Variações no valor da capacitância do sistema são representadas na impedância equivalente ($Z_{eq}(v(t))$) e no tempo de propagação ($\tau(v(t))$). Os valores desses parâmetros podem ser atualizados a cada passo de integração, todavia a variação deve ser suave e

sem descontinuidades, caso contrário podem ocorrer problemas relacionados a oscilações numéricas³⁸.

- Como o tempo de propagação $\tau(v(t))$ varia de acordo com o valor da tensão, este geralmente não será um múltiplo inteiro do passo de integração Δt adotado na simulação. Este problema pode ser contornado aplicando-se interpolação linear aos termos históricos $I_{k(eq)}$ e $I_{m(eq)}$ (MORCHED; GUSTAVSEN; TARTIBI, 1999).

A grande vantagem do modelo apresentado consiste no fato de que o efeito corona pode ser representado diretamente no modelo de linha, e não como um componente externo, conforme realizado nos métodos convencionais descritos no capítulo 3. Além disso, o modelo pode ser representado por meio de uma simples rede de impedância equivalente (Figura 4.9), o que o torna adequado para implementação em programas do tipo EMT, permitindo que este seja facilmente combinado com outros componentes de um sistema elétrico de potência. Pelo conhecimento do autor, este é o primeiro modelo de linha de transmissão desenvolvido para aplicação em programas do tipo EMT capaz de representar o efeito corona diretamente nas equações de linha³⁹, uma vez que nos demais casos o modelo é representado como um parâmetro externo.

4.2.3 Modelo de corona

Nas seções anteriores foi desenvolvido um modelo de linha capaz de representar a impedância característica e o tempo de propagação como parâmetros dependentes da tensão (VDLM), o qual se mostrou adequado para representação do efeito corona em linhas de transmissão. Contudo, para que este modelo possa ser aplicado, obviamente se faz necessário utilizar equações que descrevam como a capacitância e a condutância em derivação variam na linha quando esta se encontra sob efeito corona. Em outras palavras, é necessário adotar algum modelo que descreva o fenômeno, conforme apresentado no Capítulo 3.

Teoricamente, pode-se dizer que qualquer modelo que descreva a variação da capacitância de maneira suave e sem pontos de descontinuidade pode ser aplicado ao VDLM. Contudo verifica-se que infelizmente a grande maioria dos modelos de efeito corona descrevem a variação da capacitância de modo descontínuo. Isso ocorre pelo fato de que, conforme apre-

³⁸ Conforme será melhor discutido posteriormente, tal fato infelizmente implica uma limitação para escolha do modelo de corona, visto que alguns modelos (como o de Gary *et al*) representam a variação da capacitância de maneira descontínua.

³⁹ É oportuno ressaltar que um procedimento semelhante foi apresentado por (VISACRO; CONTI, 2005), (CONTI, 2006). Contudo, no trabalho citado a linha de transmissão é utilizada para modelagem de um canal de descarga, onde a capacitância e a resistência longitudinal são representadas como parâmetros variáveis no tempo e no espaço, mas não como parâmetros dependentes da tensão.

sentado no Capítulo 2, o efeito corona é um fenômeno desencadeado por um processo de avalanche, que se desenvolve em um período muito curto (da ordem de alguns μs). Desse modo, alguns modelos consideram que o processo de formação de cargas ao redor do condutor ocorre imediatamente após ultrapassado o valor da tensão crítica, provocando variação abrupta no valor da capacitância (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978), (KUDYAN; H-SHIH, 1981), (C.GARY; CRISTESCU; DRAGAN, 1989). Além disso, também há modelos que representam descontinuidades quando a tensão atinge seu valor máximo e começa decrescer, fazendo com que a capacitância do sistema se torne imediatamente igual à capacitância geométrica da linha⁴⁰. Infelizmente, esses modelos não podem ser aplicados ao VDLM (ao menos no atual estágio da pesquisa), visto que os testes realizados mostraram que variações abruptas no valor da capacitância levam à ocorrência de instabilidade numérica.

Perante as circunstâncias apresentadas e baseando-se em diversos testes⁴¹, pode-se concluir que as equações baseadas na Lei Quadrática de Peek (ou simplesmente equações de Skilling-Umoto) são as mais adequadas para calcular a variação da capacitância e da condutância em derivação no VDLM. A razão para escolha deste modelo reside no fato de que, além de tais equações descreverem a variação da capacitância da linha de maneira suave, também apresentaram o melhor desempenho dentre os modelos analisados no capítulo anterior⁴².

As principais características, vantagens e desvantagens existentes na aplicação das equações de Skilling-Umoto já foram discutidas no capítulo anterior, e por este motivo não serão abordadas novamente. As equações do modelo (já rearranjadas para aplicação direta no VDLM) são apresentadas em (4.36) - (4.40). É oportuno ressaltar que no caso em que a linha não está sob efeito corona a resistência em derivação $R_s(v(t))$ assume valores muito elevados, comportando-se como uma chave aberta.

$$C(v(t)) = \begin{cases} C_0, & \text{se } v(t) < V_{crit} \\ C_0 + K_c \left(1 - \frac{V_{crit}}{v(t)}\right)^2, & \text{se } v(t) \geq V_{crit} \end{cases} \quad (4.36)$$

$$G(v(t)) = \begin{cases} 0, & \text{se } v(t) < V_{crit} \\ K_g \left(1 - \frac{V_{crit}}{v(t)}\right)^2, & \text{se } v(t) \geq V_{crit} \end{cases} \quad (4.37)$$

$$R_s(v(t)) = \frac{1}{G(v(t)) \cdot d} \quad (4.38)$$

⁴⁰ Tais características podem ser melhor visualizadas observando-se as curvas q-v produzidas pelos modelos de representação do efeito corona, as quais são apresentadas no Capítulo 3.

⁴¹ Foram realizados testes utilizando-se as equações propostas por Gary *et al*, M. Siliciu e I. Siliciu e Skilling-Umoto.

⁴² É oportuno lembrar que o modelo de K. Lee foi desenvolvido com base na Lei Quadrática de Peek.

$$K_c = \sigma_c \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} \left[\frac{F}{m} \right] \quad (4.39)$$

$$K_g = \sigma_g \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (4.40)$$

Nas equações acima, tem-se que $v(t)$ corresponde à tensão no condutor, V_{crit} é a tensão de início de corona (ou tensão crítica), r e h são, respectivamente, o raio do condutor e sua altura com relação ao solo, σ_c e σ_g são constantes de perda de corona; que conforme já discutido, são obtidas experimentalmente.

Nessas circunstâncias, para aplicação do VDLM combinam-se as equações que descrevem a propagação de ondas na linha de transmissão - (4.30) - (4.35) - com as equações que descrevem a variação da capacitância e da condutância em derivação em função da tensão - (4.36) e (4.38), respectivamente. Com o intuito de avaliar o desempenho deste modelo, posteriormente serão realizados testes de validação, onde os resultados fornecidos pelo VDLM são comparados com dados de medição em campo.

4.3 Técnica de solução

Nesta seção é apresentada a técnica de solução utilizada para resolução de um sistema cuja linha de transmissão é representada pelo VDLM.

Como pode ser observado nas equações (4.30) e (4.31), para calcular as correntes $i_{in}(t)$ e $i_{out}(t)$ é necessário conhecer as tensões instantâneas nos terminais, $v_{in}(t)$ e $v_{out}(t)$. Conforme descrito na seção 4.1, os programas do tipo EMT utilizam as equações nodais da rede, onde o valor das tensões em todos os nós do circuito podem ser obtidos através da resolução de um sistema de equações lineares. Contudo, como pode ser visto na Figura 4.9, no caso do VDLM tem-se que tanto a impedância equivalente quanto as fontes de correntes históricas são funções da tensão. Uma vez que matriz de admitância nodal e o vetor de correntes históricas são construídos com base nesses elementos, é fácil perceber que eles também passam a ser função da tensão, conforme apresentado (4.41). Evidentemente, este é um sistema de equações não-lineares, cuja solução somente pode ser obtida através de métodos iterativos.

$$[Y([v(t)])] \cdot [v(t)] = [i(t)] - [I([v(t)])] \quad (4.41)$$

Sabendo que para representação do efeito corona é necessário discretizar a linha em um grande número de segmentos, é fácil perceber que a utilização de método iterativos exige um considerável esforço computacional, já que existem diversas equações envolvidas nesse processo.

A fim de contornar este problema, neste trabalho é proposto um método simplificado, o qual permite a resolução do sistema de equações (4.41) sem a necessidade de se utilizar método iterativos. Basicamente, nesse método as tensões nodais atuais $[\mathbf{v}(t)]$ são calculadas utilizando-se a matriz de condutância nodal e o vetor de correntes históricas obtidos no passo de integração anterior, conforme apresentado em (4.42):

$$[\mathbf{Y}([\mathbf{v}(t - \Delta t)])] \cdot [\mathbf{v}(t)] = [\mathbf{i}(t)] - [\mathbf{I}(\mathbf{v}(t - \Delta t))] \quad (4.42)$$

Como $[\mathbf{Y}([\mathbf{v}(t - \Delta t)])]$, $[\mathbf{i}(t)]$ e $[\mathbf{I}(\mathbf{v}(t - \Delta t))]$ são termos conhecidos para o instante t na equação (4.42), o cálculo das tensões nodais resume-se à resolução de um sistema de equações lineares, assim como realizado no método clássico apresentado na seção 4.1. Evidentemente, o método apresentado baseia-se em uma aproximação, onde considera-se que a matriz de condutância nodal e o vetor de correntes históricas variam pouco de um passo de integração para outro, e por isso pode-se utilizar tais parâmetros definidos com base na tensão do passo de integração anterior. É oportuno ressaltar que esta aproximação é adequada quando se utiliza um passo de integração suficientemente curto, como ocorre no caso de simulações de descargas atmosféricas, onde o passo de integração é da ordem de alguns ns. Para casos em que se utilizar um passo de integração mais elevado, a hipótese adotada pode não ser mais verdadeira, visto que tais parâmetros podem variar consideravelmente de um passo de integração para outro, implicando maiores erros no cálculo das tensões nodais.

Na seção seguinte são apresentados testes que avaliam o desempenho desta técnica de solução, cujo desempenho será melhor discutido posteriormente.

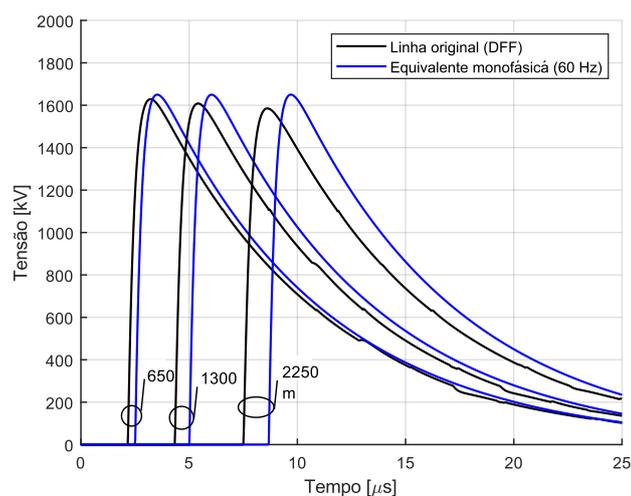
4.4 Implementação computacional e testes de validação

Com o intuito de avaliar o desempenho do VDLM, bem como da técnica de solução proposta, nesta seção são apresentados teste de validação, onde os resultados fornecidos pelo modelo desenvolvido são comparados com dados de medições em campo a fim de avaliar sua eficiência e precisão.

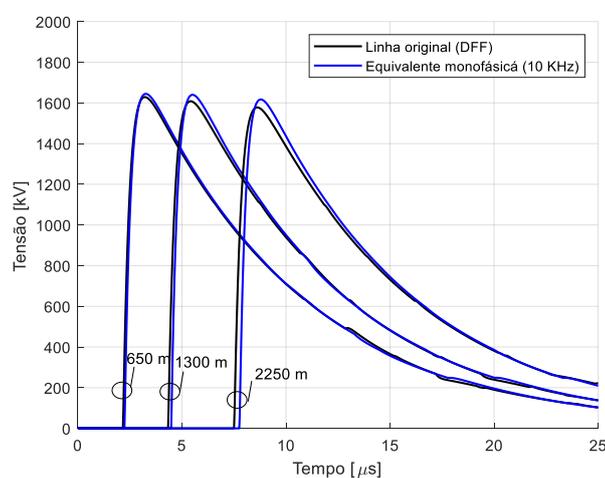
Antes de iniciar os testes de validação, é oportuno lembrar que, conforme descrito no capítulo 3, os experimentos efetuados nas linhas Tidd e EDF consistiram na aplicação de um pulso de tensão em uma das fases de uma linha trifásica, deixando as demais fases desenergizadas. Conforme apresentado seção 4.2, no atual estágio da pesquisa o VDLM é capaz de representar apenas linhas monofásicas e com parâmetros constantes na frequência. Nessas circunstâncias, uma vez que os dados de medições disponíveis foram obtidos através de testes em linhas de transmissão trifásicas, deve-se primeiramente verificar se a linha pode ser representada apenas pela fase incidente (equivalente monofásico). Além do mais, como os pulsos

de tensão aplicados nos experimentos representam descargas atmosféricas (alta frequência), deve-se verificar se a representação da linha por meio de parâmetros constantes com a frequência não irá afetar consideravelmente os resultados obtidos.

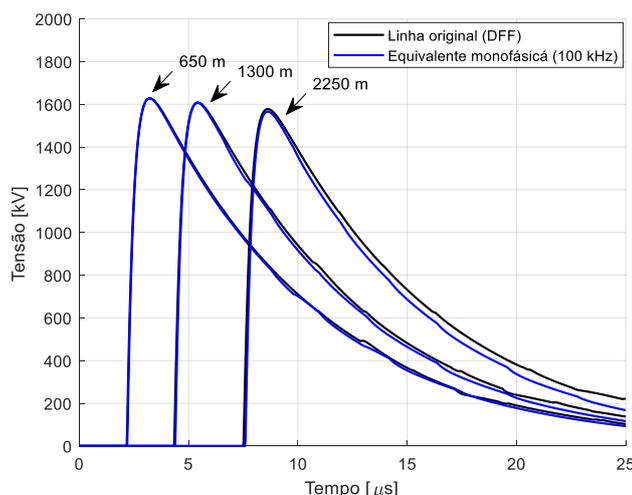
Perante o exposto, em uma primeira análise avaliou-se o impacto de representar a linha Tidd apenas pela fase onde o surto de tensão foi injetado (denominada de fase incidente) e com parâmetros constantes. Para tal avaliação utilizou-se o *software* PSCAD, onde foram implementadas tanto a linha original (representando as três fases e os cabos PR, sendo a linha modelada através do modelo *Universal Line Model* – que considera a dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência), quanto a equivalente monofásica, onde representou-se apenas a fase incidente e com parâmetros constantes (Bergeron). Foram realizadas simulações com o intuito de comparar as formas de onda da tensão nos pontos de interesse, cujos principais resultados são apresentados na Figura 4.10. Nestes casos não foi considerado o efeito corona.



(a) - Parâmetros da linha monofásica calculados para a frequência de 60 Hz.



(b) - Parâmetros da linha monofásica calculados para a frequência de 10 kHz.



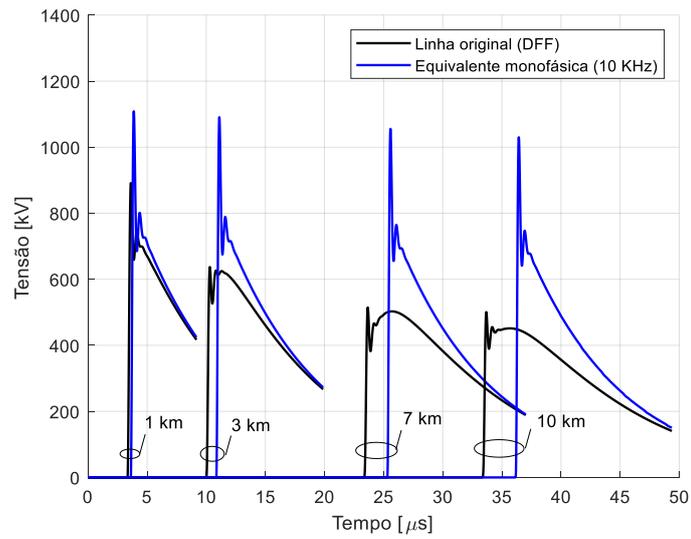
(c) - Parâmetros da linha monofásica calculados para a frequência de 100 kHz.

Figura 4.10 – Comparação entre os modelos para representação da linha Tidd através de linhas monofásicas simuladas com parâmetros longitudinais constantes calculados para as frequências de (a) 60 Hz, (b) 10 kHz, (c) 100 kHz.

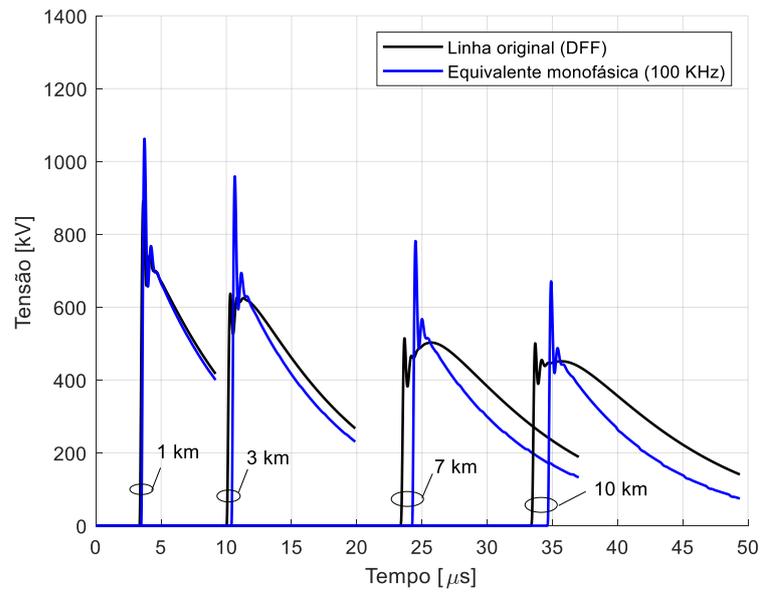
Conforme apresentado na Figura 4.10(a), a representação da linha monofásica utilizando-se parâmetros constantes calculados para a frequência de 60 Hz produz resultados bastante distintos dos obtidos na linha original trifásica. Pode-se observar, inclusive, a diferença entre os tempos de propagação dos sinais nos dois casos, visto que quando é feita a representação com parâmetros dependentes da frequência o sinal viaja de maneira mais rápida devido à modificação nos parâmetros da linha, que afeta a velocidade de propagação.

As Figura 4.10(b) e Figura 4.10(c) apresentam os resultados obtidos nos casos em que os parâmetros da linha foram calculados para as frequências de 10 kHz e 100 kHz, respectivamente. Como pode ser observado, melhores resultados foram obtidos quando os parâmetros da equivalente monofásica foram calculados para a frequência de 100 kHz, onde observam-se apenas diferenças sutis na cauda da onda. Nessas circunstâncias, conclui-se que o VDLM pode ser validado utilizando-se os experimentos da linha Tidd, onde os parâmetros da linha monofásica devem ser calculados para a frequência de 100 kHz.

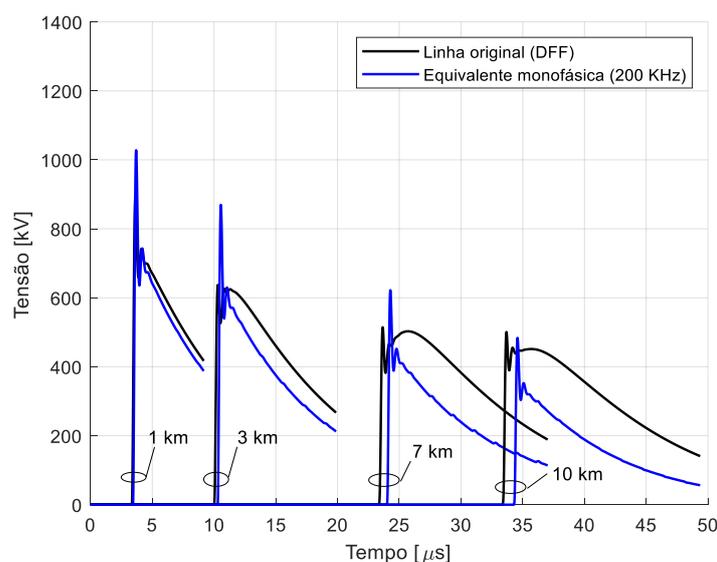
Com o intuito de comparar o desempenho do VDLM também com relação às medições na linha EDF, efetuou-se um procedimento semelhante ao apresentado anteriormente, onde simulações foram realizadas considerando-se a linha original (representando as três fases e com parâmetros dependentes da frequência), e a representação da linha monofásica (onde representou-se apenas a fase incidente com parâmetros constantes na frequência). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.11. Nestes casos novamente não foi considerado o efeito corona.



(a) - Parâmetros da linha monofásica calculados para a frequência de 10 kHz.



(b) - Parâmetros da linha monofásica calculados para a frequência de 100 kHz.



(c) - Parâmetros da linha monofásica calculados para a frequência de 200 kHz.

Figura 4.11 - Comparação entre os modelos para representação da linha EDF através de linhas monofásicas simuladas com parâmetros longitudinais constantes calculados para as frequências de (a) 10 kHz, (b) 100 kHz, (c) 200 kHz.

Conforme pode ser observado nas Figura 4.11(a) – (c), em nenhum dos casos analisados a forma de onda obtida representando-se a linha trifásica apenas pela linha monofásica com parâmetros constantes assemelha-se ao caso original. Isto ocorre porque a onda de tensão injetada apresenta componentes de diversas frequências, e ao se calcular os parâmetros da linha monofásica para uma única frequência não se atenua o sinal como esperado (caso de 10 kHz) ou se atenua em demasia (caso de 200 kHz). Nessas circunstâncias, como uma análise adicional avaliou-se o caso em que a linha é representada apenas pela linha monofásica (fase incidente), porém com parâmetros dependentes da frequência. O resultado obtido é apresentado na Figura 4.12, e como pode ser observado, com exceção da forma de onda obtida a 10 km do terminal emissor, as demais apresentam relativa concordância com o caso original.

Os resultados apresentados permitem concluir que isso ocorre pelo fato de que nos experimentos na linha EDF o pulso de tensão aplicado possui um tempo de subida muito curto ($0,29 \mu\text{s}$), fazendo com que a distorção da forma de onda devido à dependência da frequência assumam um papel bem mais relevante do que aquele observado na linha Tidd, onde o tempo de subida do pulso aplicado é de aproximadamente $1 \mu\text{s}$. Além disso, pode-se observar que a influência das fases adjacentes é mais fortemente pronunciada do que na linha Tidd, pelo fato de que a linha EDF possui maior comprimento, e a distância entre os condutores das fases é menor, o que provoca aumento no acoplamento entre as fases.

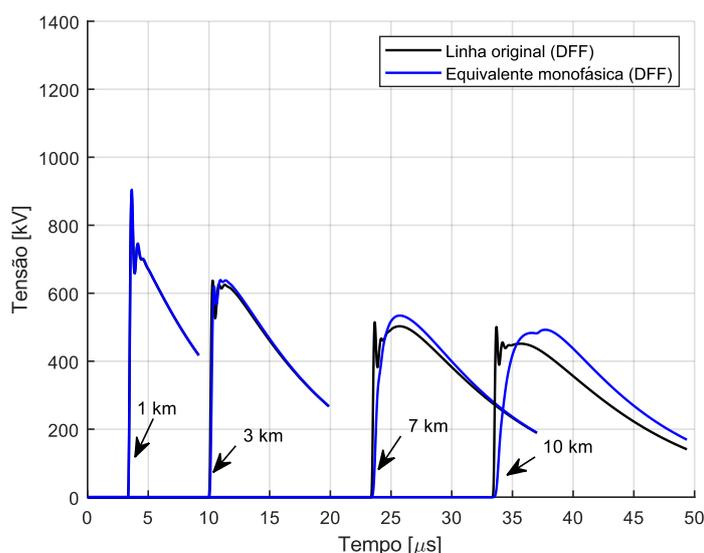


Figura 4.12 - Comparação entre a representação completa da linha EDF e a equivalente monofásica. Ambas com parâmetros dependentes da frequência.

Perante o exposto, pode-se concluir que o VDLM não pode ser validado utilizando-se as medições EDF, já que possíveis diferenças entre as formas de onda medidas e simuladas podem ocorrer não devido à representação do efeito corona, mas sim pela representação da dependência dos parâmetros longitudinais da linha com a frequência e da influência de fases adjacentes. Uma vez que tais características não podem ser representadas pelo modelo (no atual estágio da pesquisa⁴³), destaca-se que o VDLM será validado utilizando-se apenas as medições na linha Tidd.

A Figura 4.13 apresenta o esquema utilizado para representação da linha Tidd nas simulações computacionais. Conforme apresentado, o sistema é composto por um gerador de impulso (ideal), um condutor horizontal disposto a uma altura média de 18,89 m acima do solo e um resistor de terminação, cuja resistência é igual à impedância características da linha na ausência de efeito corona (Z_0).

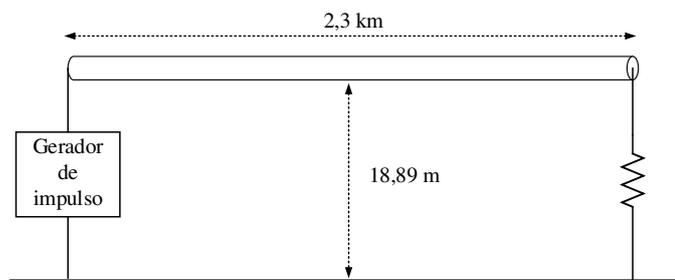


Figura 4.13 - Sistema utilizado para representação dos experimentos Tidd nas simulações computacionais.

⁴³ A expansão do modelo para permitir a representação de linhas multifásicas e a dependência da frequência é uma das propostas de continuidade deste trabalho.

O sistema apresentado na Figura 4.13 foi implementado no *software* Matlab, o qual foi utilizado por ser extremamente versátil e de fácil programação. A Figura 4.15 apresenta o fluxograma representativo do algoritmo implementado, onde empregou-se a técnica de solução apresentada na seção 4.3, além de um esquema que realiza a discretização espacial da linha de maneira automática. Abaixo são apresentadas importantes considerações a respeito desse algoritmo:

- A linha de transmissão é discretizada em n trechos de comprimento d , sendo que cada trecho de linha é representado pela rede de impedância equivalente do VDLM (Figura 4.9). A impedância equivalente e o tempo de propagação de cada trecho são calculados com base na tensão do terminal receptor, conforme apresentado na Figura 4.14⁴⁴.

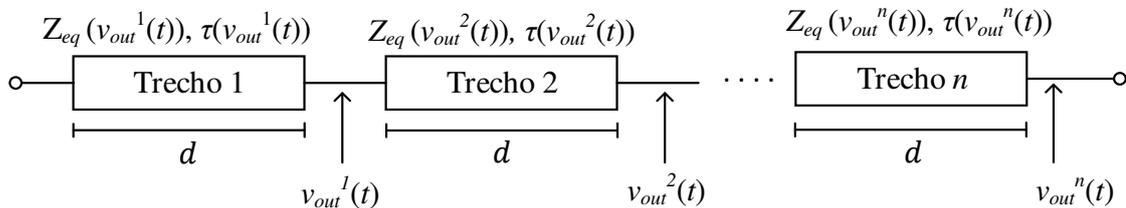


Figura 4.14 - Discretização espacial da linha.

- A discretização automática pode ser facilmente realizada pelo fato de que na rede de impedância equivalente existe apenas um resistor conectado à cada terminal da linha, sendo que tais resistores conectam os respectivos terminais à referência (solo), conforme apresentado na Figura 4.9. Desse modo, todos os trechos da linha de transmissão são representados apenas por elementos diagonais na matriz de condutância nodal \mathbf{Y} (DOMMEL, 1969).
- Para o primeiro passo de integração, considera-se que nenhum trecho da linha está sob efeito corona. Desse modo, tem-se que $Z_{eq}(v_{out}^k(t_0)) = Z_0$ e $\tau(v_{out}^k(t_0)) = \tau_0$, onde $k = 1, 2, 3, \dots, n$. Sendo conhecido tais parâmetros, a matriz de condutância nodal \mathbf{Y} e o vetor de correntes históricas \mathbf{I} podem ser construídos. Para os próximos passos de integração, tais parâmetros são atualizados baseando-se no valor da tensão calculada no passo de integração anterior, conforme descrito na Seção 4.3.

⁴⁴ Conforme já discutido no capítulo 3, o comprimento do trecho utilizado na discretização espacial da linha deve ser tal que a tensão ao longo de todo o trecho possa ser considerada praticamente a mesma. Sendo assim, uma vez que a linha tenha sido corretamente discretizada, a impedância equivalente e o tempo de propagação podem ser calculados tanto com base na tensão do terminal emissor ($v_{in}^n(t)$) quanto na tensão do terminal receptor ($v_{out}^n(t)$), visto que o valor da tensão é praticamente o mesmo em ambos os terminais. É oportuno ressaltar que foram realizados testes empregando-se ambos os casos, e não foram observadas diferenças entre eles.

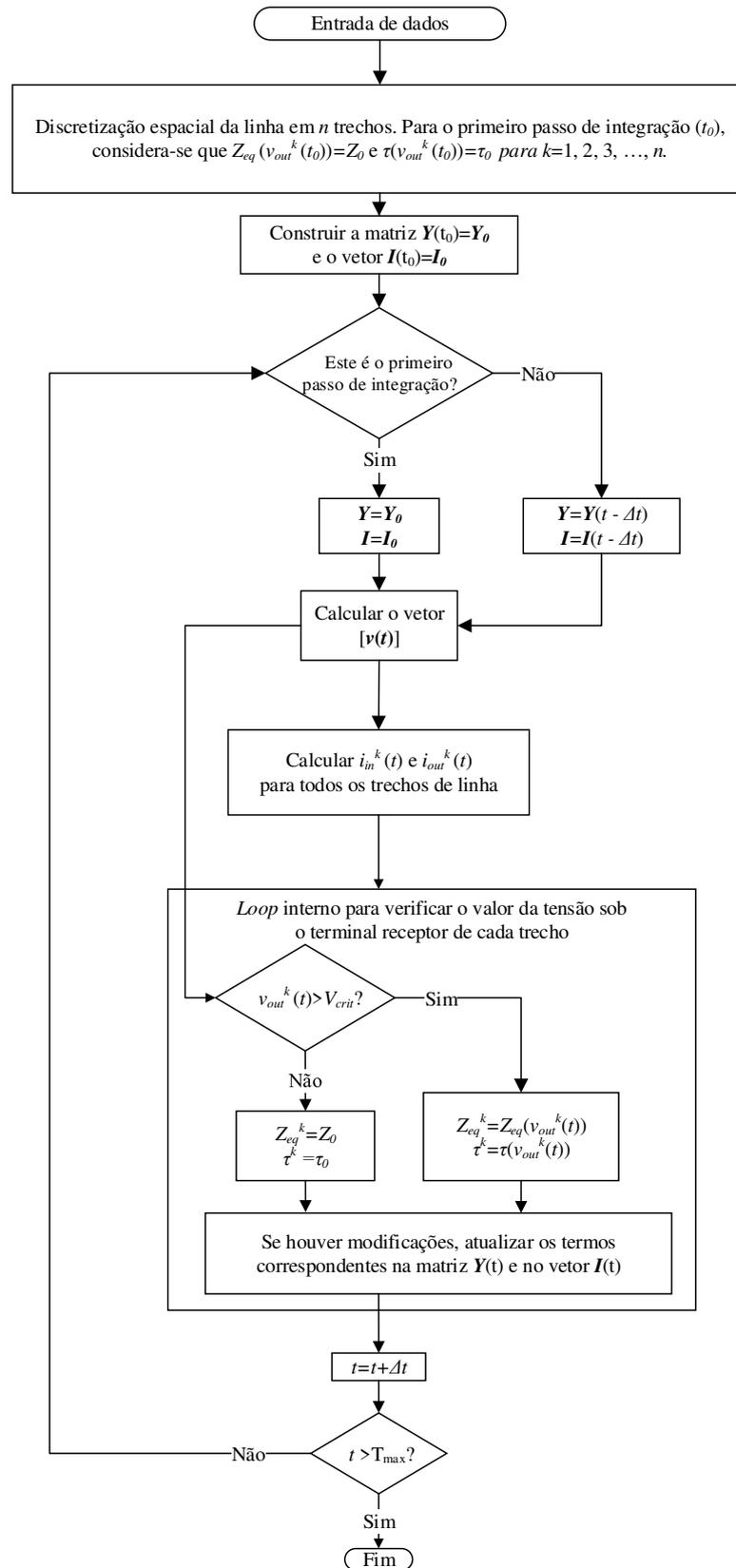


Figura 4.15 - Fluxograma representativo do algoritmo implementado no *software* Matlab.

- Na ausência de efeito corona na linha de transmissão, a matriz de condutância nodal e o vetor de correntes históricas não sofrem modificações. Quando a tensão em qualquer

trecho de linha se torna superior à tensão crítica ($v_{out}^k(t) > V_{crit}$), a impedância equivalente e o tempo de propagação referentes a este trecho são recalculados com base no valor de $v_{out}^k(t)$, e os termos correspondentes são atualizados na matriz de condutância nodal e no vetor de correntes históricas.

Com base no esquema apresentado pode-se finalmente realizar os testes para avaliação do desempenho do modelo. Na Tabela 4.1 são apresentados os valores dos parâmetros da linha, os quais foram calculados para a frequência de 100 kHz e considerando que o condutor da linha é o ACSR de 23,55 mm de diâmetro⁴⁵. A Tabela 4.2 apresenta os valores dos parâmetros do modelo de corona. Contudo, é oportuno realizar uma importante observação com relação aos valores adotados para os parâmetros σ_C e σ_G , necessários para aplicação das equações de Skilling-Umoto e que determinam a sensibilidade da variação da capacitância e da condutância transversal com relação à tensão.

Conforme descrito no Capítulo 3, a obtenção dos valores desses parâmetros é realizada através de um procedimento de tentativa e erro, tendo sido realizadas diversas simulações variando os seus valores e os resultados obtidos foram comparados com os dados de medições em campo, buscando obter o maior nível de concordância entre as formas de onda medidas e simuladas. Ademais, é válido lembrar que os modelos (LEE, 1983) e de (MOTOYAMA; AMETANI, 1987) também são baseados nas equações de Skilling-Umoto, e conseqüentemente se faz necessário determinar o valor dos parâmetros σ_C e σ_G para aplicação desses modelos. Verifica-se, contudo, que no caso da VDLM os valores ideais para esses parâmetros são diferentes daqueles adotados para os modelos de K. Lee e de Motoyama e Ametani. Isso ocorre pelo fato de que a estrutura do circuito equivalente utilizado para representação do efeito corona em cada caso é diferente, e conseqüentemente os valores dos parâmetros desses circuitos também devem ser diferentes. Apesar deste fato, é importante ressaltar que tal característica não invalida a coerência física desses modelos, já que os parâmetros σ_C e σ_G correspondem apenas a valores numéricos, não possuindo um significado físico direto.

Por último, é válido destacar que, assim como realizado no capítulo 3, a forma de onda do pulso de tensão aplicada pelo gerador de impulso é representada por uma dupla exponencial de 1/6,2 μ s com amplitude máxima de 1650 kV, conforme apresentado na Figura 4.16.

⁴⁵ Posteriormente, também serão apresentadas análises para casos em que a linha é representada com os demais condutores utilizados nos experimentos Tidd, conforme descrito no Apêndice A.

Tabela 4.1 – Parâmetros da linha Tidd (100 kHz). Caso em que linha está equipada com um condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro.

R_0 [Ω/m]	L_0 [$\mu H/m$]	C_0 [pF/m]	Z_0 [Ω]
0,02	1,65	6,89	490,02

Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo de corona. Caso em que linha está equipada com um condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro.

h [m]	r [mm]	σ_g [S/m]	σ_c [F/m]	V_{crit} [kV]
18,89	11,78	$30 \cdot 10^9$	27	276

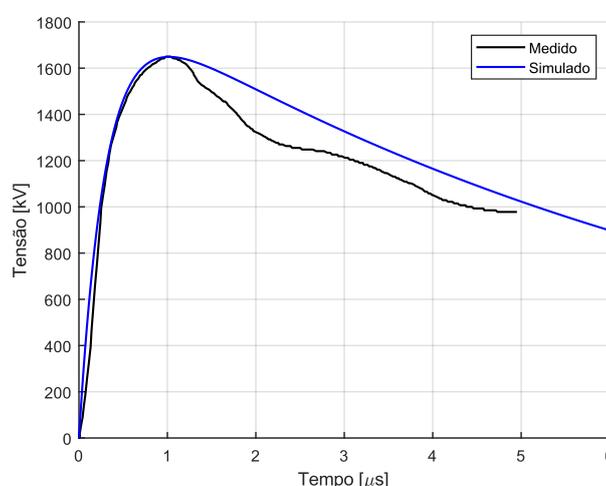
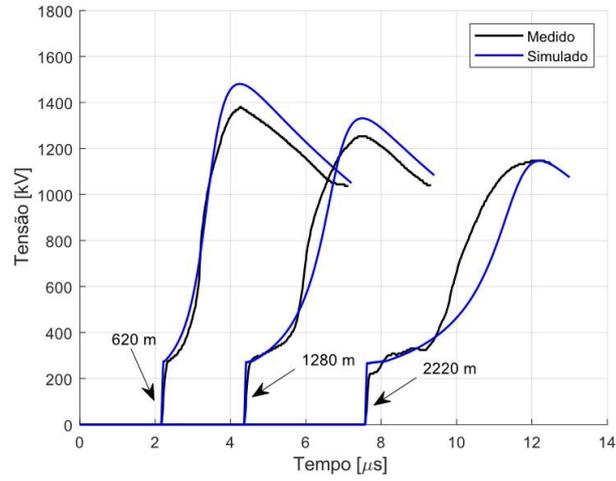


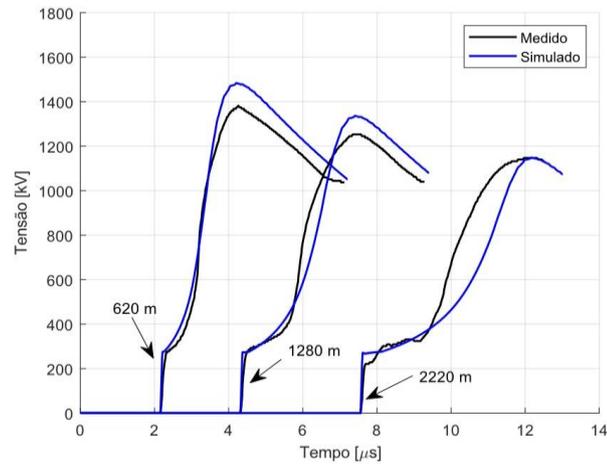
Figura 4.16 – Forma de onda da tensão aplicada pelo gerador de impulso.

Para uma análise inicial avaliou-se a sensibilidade do modelo com relação ao comprimento utilizado na discretização espacial da linha. Para tal avaliação, adotou-se um passo de integração igual à 1 ns, e as simulações foram realizadas considerando-se a linha discretizada em trechos de 10 m, 20 m, 40 m e 50 m. Os resultados obtidos são apresentados nas Figura 4.17 (a) – (c). É oportuno lembrar que devido à discretização espacial os pontos onde são realizadas comparações entre as formas de onda medidas e simuladas podem variar em cada caso, visto que nas simulações a forma de onda da tensão somente pode ser obtida nos pontos de junções entre trechos⁴⁶. Sendo assim, em todos os casos tomou-se o ponto mais próximo possível daquele em que a medição foi realizada.

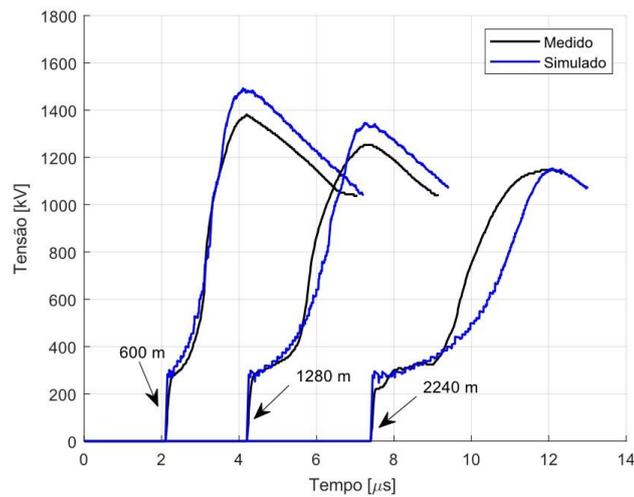
⁴⁶ Os pontos onde pode-se obter a forma de onda tensão são múltiplos inteiros do comprimento utilizado na discretização espacial da linha.



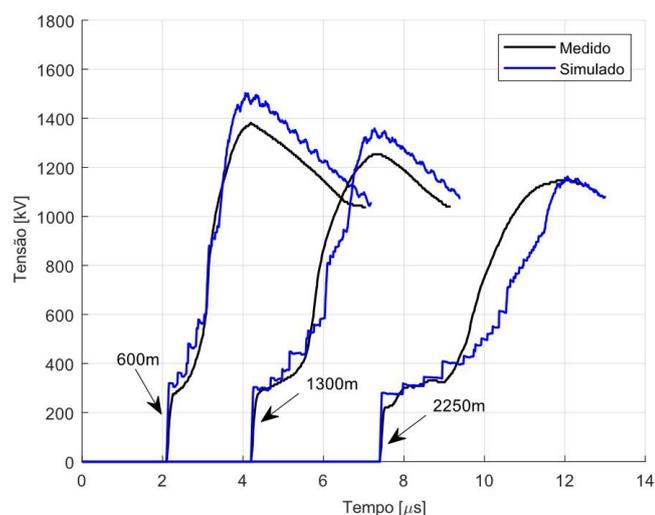
(a) - Linha discretizada em trechos de 10 m.



(b) - Linha Discretizada em trechos de 20 m.



(c) - Linha discretizada em trechos de 40 m.



(d) - Linha discretizada em trechos de 50 m.

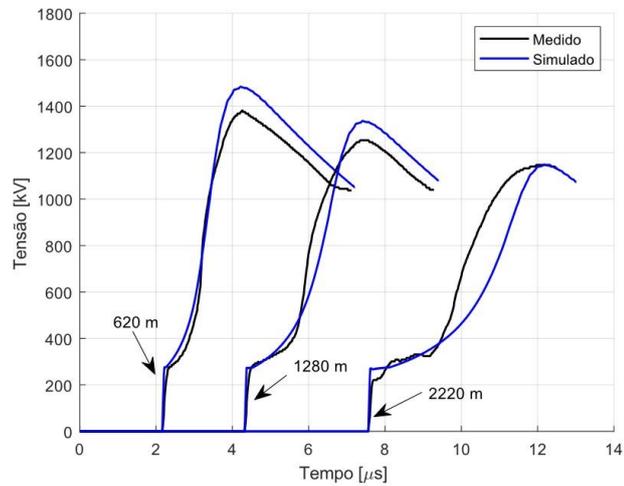
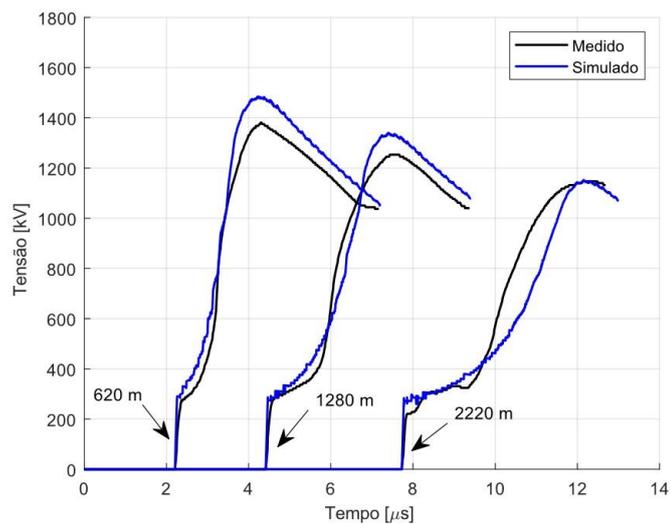
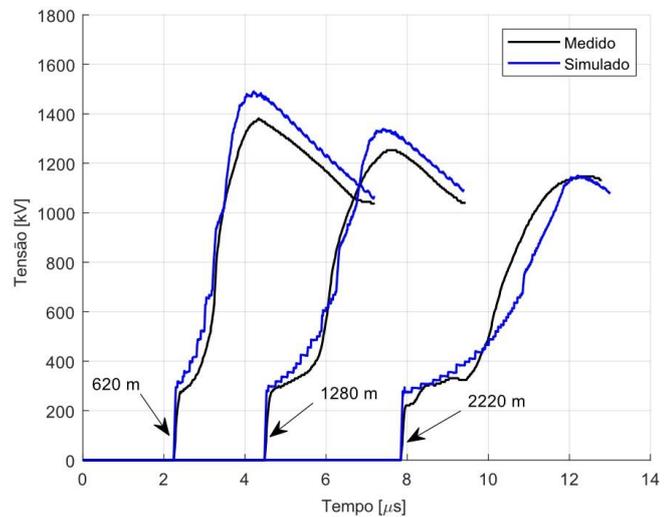
Figura 4.17 – Comparação entre os resultados obtidos com o VDLM e as medições na linha Tidd. Nas figuras apresentadas variou-se o comprimento utilizado na discretização espacial da linha, sendo utilizados trechos de (a) - 10 m, (b) - 20 m, (c) - 40 m., (d) - 50 m.

Analisando-se os resultados exibidos nas Figura 4.17 (a) – (d) pode-se observar que o VDLM é bastante sensível ao comprimento utilizado na discretização espacial da linha. Conforme apresentado na Figura 4.17 (d) (onde a linha é discretizada em trechos de 50 m), na região em que ocorre crescimento no valor da tensão observa-se que a forma de onda assemelha-se à uma escada, onde o aumento no valor da tensão é representado em degraus. Um comportamento semelhante, porém em menores proporções, também pode ser observado no caso em que a linha é discretizada em trechos de 40 m.

Por outro lado, no caso em que a linha é discretizada em trechos de 10 ou 20 m, observa-se que a forma de onda obtida é bastante suave, e basicamente não existem diferenças entre as formas de onda obtidas nesses dois casos. Sendo assim, em todas as análises seguintes será adotado um valor padrão para o comprimento utilizado na discretização da linha, especificamente $d = 20$ m.

Em uma segunda análise, manteve-se o comprimento utilizado na discretização espacial constante, e variou-se o passo de integração Δt utilizado na simulação, a fim de avaliar a sensibilidade do modelo com relação a este parâmetro. A importância de se realizar tal análise reside no fato de que, conforme descrito anteriormente, a técnica de solução adotada no algoritmo permite realizar o cálculo das tensões nodais sem a necessidade de utilizar métodos iterativos, uma vez que a tensão no instante atual (t) é calculada com base na matriz de admitância nodal e no vetor de correntes históricas do passo de integração anterior $\mathbf{Y}(t - \Delta t)$ e $\mathbf{I}(t - \Delta t)$, respectivamente. Contudo, apesar de tal técnica promover aumento na eficiência do algoritmo, ela faz com que os resultados obtidos sejam influenciados pelo valor do passo de

integração utilizado. Nessas circunstâncias, as Figuras 4.18 (a) – (d) apresentam os resultados obtidos nos casos em que foram utilizados passos de integração iguais a 1 ns, 3 ns, 5 ns e 10 ns, respectivamente.

(a) - $\Delta t=1$ ns.(b) - $\Delta t=3$ ns.(c) - $\Delta t=5$ ns.

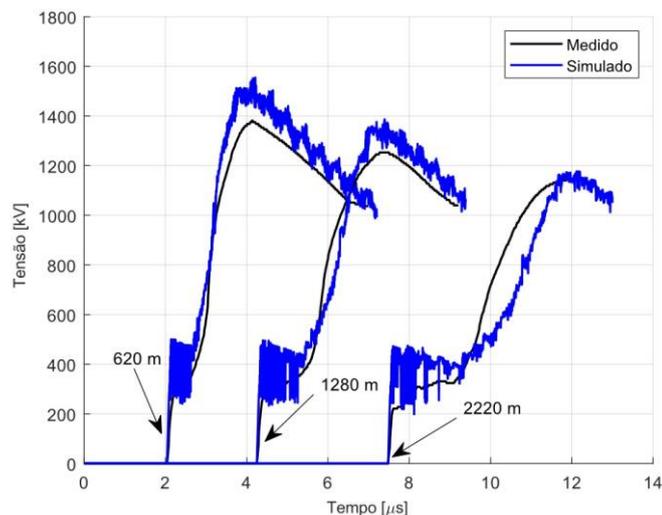
(d) – $\Delta t=10$ ns.

Figura 4.18 - Comparação entre os resultados obtidos com o VDLM e as medições na linha Tidd. Nas figuras apresentadas variou-se o passo de integração utilizado nas simulações, sendo adotados valores de (a) 1 ns, (b) 3 ns, (c) 5 ns, (d) 10 ns.

O primeiro ponto que deve ser ressaltado diz respeito ao tempo de cálculo em cada caso analisado. Conforme descrito anteriormente, a linha de transmissão, cujo comprimento é de 2,3 km, foi discretizada em trechos de 20 m, fazendo com que o sistema completo (apresentado na Figura 4.14) seja representado por cerca de 116 trechos de linha. O tempo máximo de simulação ($T_{m\acute{a}x}$) adotado em todos os casos foi de 20 μ s. A Tabela 4.3 apresenta aproximadamente o tempo de cálculo necessário para cada simulação realizada, onde variou-se o passo de integração adotado. Destaca-se que todas as simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas em um computador Dell XPS 8930, o qual possui processor Intel Core i7 de oitava geração e 16 GB de memória RAM.

Tabela 4.3 - Tempo de cálculo necessário nos casos onde variou-se o passo de integração.

Passo de integração adotado (Δt)	1 ns	3 ns	5 ns	10 ns
Tempo de cálculo	30 s	10 s	6 s	3 s

Analisando-se a Tabela 4.3, pode-se perceber que mesmo para o caso onde o passo de integração adotado é igual à 1 ns o algoritmo é capaz de realizar os cálculos em cerca de 30 s, o que corresponde a um tempo relativamente curto, levando-se em consideração a grande quantidade de nós do circuito. Por outro lado, pela análise das Figuras 4.18(a) – (d), observa-se que o algoritmo implementado é bastante sensível com relação ao passo de integração adotado nas simulações, o que ocorre justamente devido ao método de solução utilizado para resolução das equações nodais. Como pode ser observado, no caso em que se adotou um passo de integração de 1 ns, a forma de onda obtida é bastante suave. Por outro lado, no caso em

que se adotou um passo de integração de 10 ns, observa-se a ocorrência de fortes oscilações numéricas, principalmente quando a tensão na linha se torna superior ao valor da tensão crítica. Desta forma o passo de integração adotado nos próximos estudos é o de 1 ns.

O motivo da ocorrência dessas oscilações numéricas reside no fato de que, conforme descrito na Seção 4.2.2, uma condição indispensável para aplicação do VDLM é que a capacitância varie de modo suave quando o sistema encontra-se sob efeito corona. Contudo, no caso em que se utiliza um passo de integração de 10 ns a tensão varia consideravelmente de um passo de integração para o outro, fazendo com que a capacitância, que é função da tensão, também sofra maiores variações entre os passos de integração, levando o sistema à instabilidade numérica. Esses fatos permitem concluir que a técnica de solução utilizada pode ser inapropriada em casos onde utiliza-se um passo de integração mais elevado, ou em casos onde há grande variação da tensão de um passo de integração para o outro, sendo adequado somente para estudo de descargas atmosféricas, quando, devido à própria natureza do fenômeno, já é necessário o uso de um passo de integração pequeno.

Uma importante observação também deve ser feita com relação ao comprimento adotado na discretização espacial da linha e ao passo de integração adotado nas simulações. De um modo geral, os programas do tipo EMT recomendam a utilização de um passo de integração Δt cujo valor seja, no mínimo, dez vezes menor do que o tempo de propagação τ_0 , ou seja, $(\tau_0/\Delta t) \geq 10$. Contudo, por meio das análises realizadas anteriormente, foi possível constatar que o VDLM apresenta bom desempenho em casos onde se tem $25 \leq (\tau_0/\Delta t) \leq 80$ ⁴⁷, sendo que para valores fora desse intervalo podem ocorrer deformações nas formas de onda ou até mesmo oscilações numéricas.

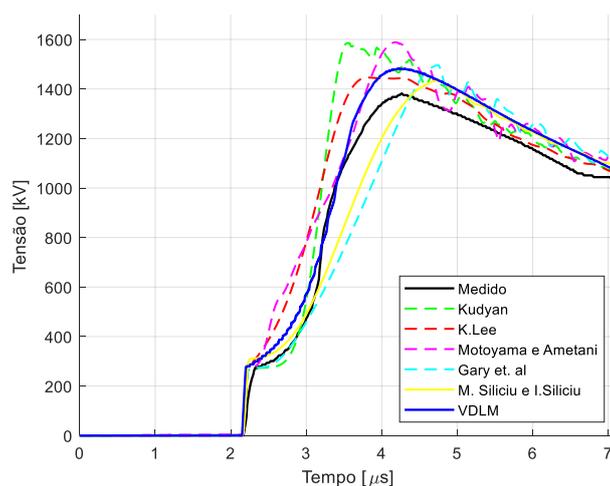
4.5 Análises complementares

Conforme apresentado no capítulo anterior, na seção 3.7 foi realizada uma comparação entre os diversos modelos de efeito corona analisados neste trabalho. De forma similar, as Figuras 4.19 (a) – (c) apresentam uma comparação entre os resultados com os diversos modelos analisados (implementados no PSCAD) e os resultados obtidos com o VDLM, onde também são apresentadas as medições na linha Tidd. É oportuno lembrar, contudo, que no caso dos modelos implementados no PSCAD a linha de transmissão foi representada com parâmetros dependentes da frequência, além do fato de que a linha foi discretizada em trechos de

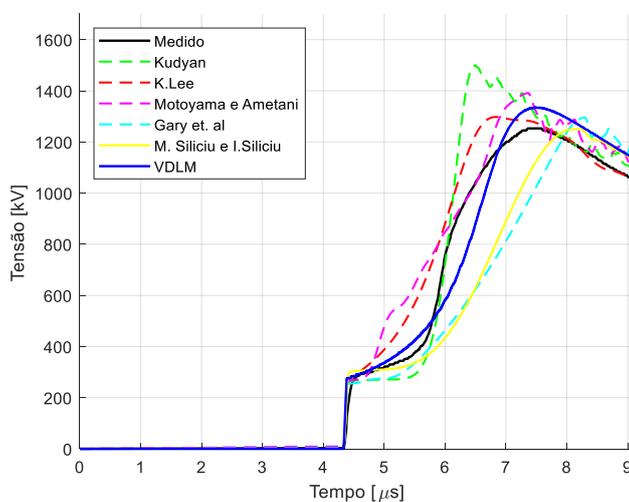
⁴⁷ Obviamente, no caso do VDLM tem-se que o tempo de propagação é função da tensão e pode variar consideravelmente quando o sistema está sob efeito corona. Contudo, os valores apresentados neste intervalo correspondem ao caso em que o sistema não está sob efeito corona (τ_0).

50 m. Por outro lado, o VDLM representa a linha com parâmetros constantes na frequência, e a discretização espacial adotada foi de 20 m.

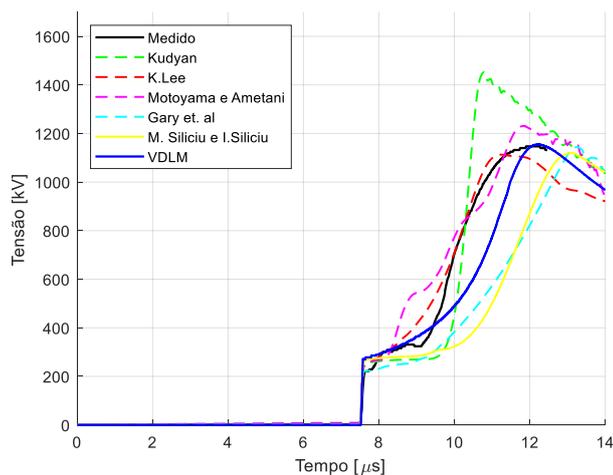
Não é demais lembrar que o VDLM não corresponde a um modelo de efeito corona, mas sim, em um método de representação do fenômeno em linhas de transmissão, sendo que para sua aplicação sempre é necessário combiná-lo com algum modelo. Neste trabalho, utilizaram-se as equações de Skilling-Umoto, as quais também são utilizadas pelo modelo de K. Lee, conforme já discutido anteriormente. Analisando-se as Figuras 4.19 (a) – (c) é possível observar que o método de representação produz resultados diferentes. Tal constatação decorre do fato de que, apesar de terem sido utilizados os mesmos valores para os parâmetros σ_C e σ_G no modelo de K. Lee no VDLM, observa-se que os resultados obtidos possuem certas diferenças, onde o VDLM apresenta maiores distorções das formas de onda do que o modelo de K. Lee. De qualquer forma, observa-se que o VDLM foi capaz de representar com boa precisão as atenuações e distorções provocadas pelo efeito corona



(a) – 650 m



(b) – 1300 m



(c) – 2250 m

Figura 4.19 - Comparação entre os resultados obtidos com os diversos modelos de efeito corona analisados no capítulo anterior (implementados no PSCAD) e os resultados obtidos com o VDLM.

Os experimentos na linha Tidd foram feitos utilizando-se três tipos de condutores diferentes, cujo objetivo era avaliar a influência do efeito corona em cada tipo de condutor, uma vez que o condutor utilizado influencia em diversos aspectos na ocorrência do fenômeno. Apesar deste fato, nas análises realizadas no Capítulo 3 foi possível avaliar o desempenho dos modelos apenas para o condutor de ACSR de 23,55 mm de diâmetro, visto que as medições da curva q-v foram realizadas apenas para este condutor, e para aplicação de alguns modelos de corona (como o de Siliciu) é necessário que existam medições da curva q-v. Contudo, para o presente caso tal situação não ocorre, já que o modelo de corona utilizado baseia-se nas equações de Skilling-Umoto, não sendo necessário que existam medições da curva q-v. Por outro lado, conforme já discutido anteriormente, uma desvantagem com relação à utilização das equações de Skilling-Umoto consiste no fato de que, para aplicação de tais equações, se faz necessário conhecer os parâmetros σ_c e σ_g , os quais só podem ser obtidos experimentalmente e variam de acordo com a configuração da linha de transmissão. Infelizmente, esses parâmetros não foram medidos para a linha Tidd, e diferentes procedimentos foram adotados para determiná-los em cada caso.

Basicamente, no caso em que a linha estava equipada com condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro utilizaram-se os mesmos valores adotados para as simulações realizadas no capítulo 3 (Seção 3.3), cujo procedimento utilizado para determinação dos valores desses parâmetros também são descritos nesta Seção. No caso em que a linha é equipada com condutores HH de 41,9 mm ou ACSR de 50,8 mm de diâmetro, os valores dos parâmetros σ_c e σ_g foram determinados através de um procedimento de tentativa e erro. Este procedimento consistiu em realizar diversas simulações variando-se os valores de tais parâmetros, e as for-

mas de onda obtidas nas simulações foram comparadas com as das medições, visando determinar os valores ideais.

Nas Tabelas 4.4 e 4.5 são apresentados, respectivamente, os valores dos parâmetros do modelo de corona e dos parâmetros da linha nos casos em que a LT está equipada com condutores HH de 41,9 mm ou ACSR de 50,8 mm de diâmetro. Deve-se ressaltar que os parâmetros da linha foram calculados para a frequência de 100 kHz.

Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo de corona.

Condutor	h [m]	r [mm]	σ_g [S/m]	σ_c [F/m]	V_{crit} [kV]
HH de 41,9 mm de diâmetro	18,89	20,95	$28 \cdot 10^9$	26	500
ACSR de 50,8 mm de diâmetro	18,89	25,40	$33 \cdot 10^9$	28	470

Tabela 4.5 – Parâmetros da linha Tidd (calculados para a frequência de 100 kHz)

Condutor	R_0 [Ω /m]	L_0 [μ H/m]	C_0 [pF/m]	Z_0 [Ω]
HH de 41,9 mm de diâmetro	0,02	1,54	7,42	455
ACSR de 50,8 mm de diâmetro	0,02	1,49	7,62	443

Assim como nas análises realizadas anteriormente, o pulso de tensão aplicado no terminal emissor pode ser aproximado por uma dupla exponencial, conforme apresentado nas Figuras 4.20 e 4.21, as quais apresentam uma comparação entre a forma de onda aplicada nos experimentos Tidd e forma de onda utilizada para reprodução nas simulações. Destaca-se que em ambos os casos a linha de transmissão foi discretizada em trechos de 20 m, e utilizou-se um passo de integração de 1 ns. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 4.22 e 4.23.

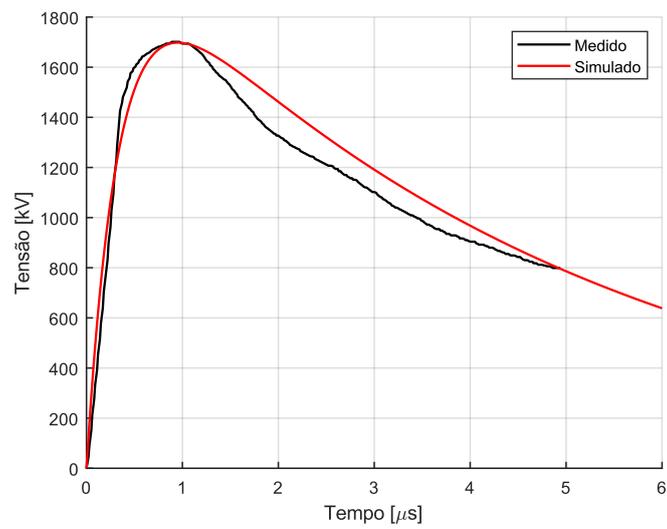


Figura 4.20 - Pulso de tensão aplicado no terminal emissor (caso em que a linha está equipada com condutor HH de 41,9 mm de diâmetro).

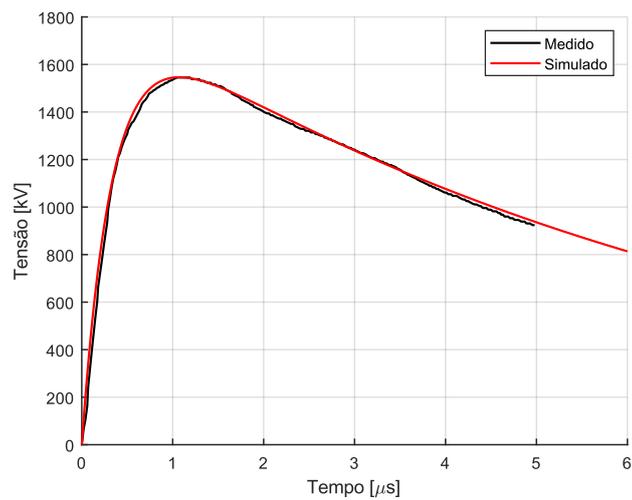


Figura 4.21 - Pulso de tensão aplicado no terminal emissor (caso em que a linha está equipada com condutor ACSR de 50,8 mm de diâmetro).

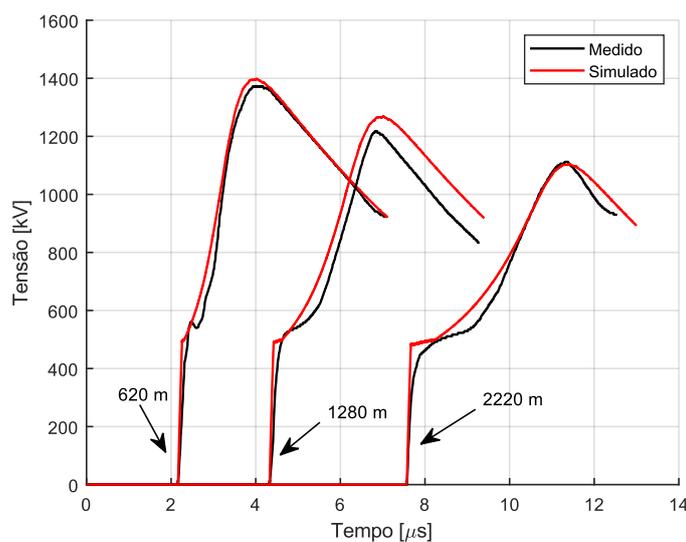


Figura 4.22 - Comparação entre os resultados obtidos com o VDLM e as medições na linha Tidd. Caso em que a linha está equipada com condutor HH de 41,9 mm de diâmetro.

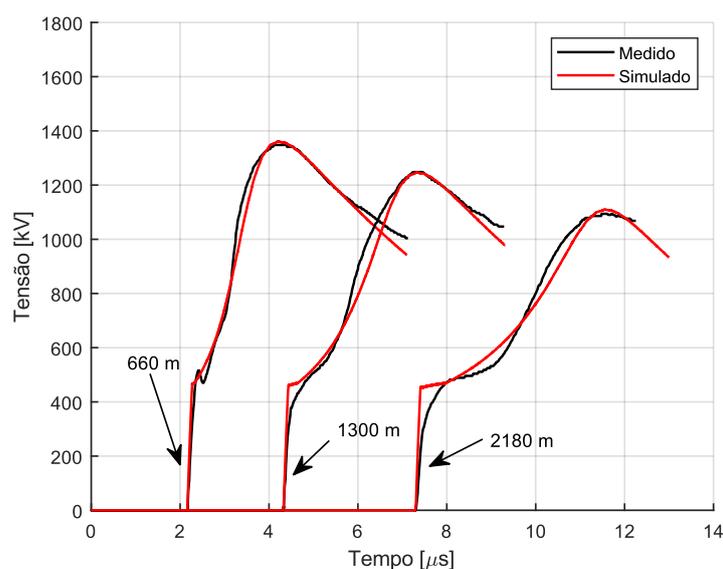


Figura 4.23 - Comparação entre os resultados obtidos com o VDLM e as medições na linha Tidd. Caso em que a linha está equipada com condutor ACSR de 50,8 mm de diâmetro.

Conforme pode ser observado nas Figuras 4.22 e 4.23, as simulações utilizando-se o VDLM apresentaram bons resultados também para os casos onde a linha de transmissão estava equipada com condutores HH de 41,9 mm e ACSR 50,8 mm de diâmetro, sendo que os resultados obtidos nesses casos foram até melhores do que aqueles obtidos para o condutor ACSR de 23,55 mm, por apresentarem maior aderência entre as formas de onda medidas e simuladas.

É oportuno destacar que, apesar de não terem sido apresentados, também foram feitos testes onde foram utilizadas as equações propostas por (C.GARY; CRISTESCU; DRAGAN, 1989) e (MIHĂILESCU-SULICIU; SULICIU, 1981) para representação da variação da capacitância quando o sistema se encontra sob efeito corona. Contudo, em ambos os casos os resultados obtidos apresentaram problemas relacionados à instabilidade numérica, porque tais modelos representam a variação da capacitância da linha de modo abrupto em determinadas circunstâncias, podendo também haver pontos de descontinuidade. Conforme já discutido, o VDLM é muito sensível às variações no valor da capacitância, fazendo com que mudanças abruptas deste parâmetro levem à ocorrência de oscilações numéricas.

Apesar dos bons resultados obtidos, o autor deste trabalho reconhece que diversas melhorias ainda podem ser feitas para consolidação do VDLM. Dentre elas destaca-se a resolução dos problemas relacionados à instabilidade numérica, os quais podem ser controlados aplicando-se diferentes técnicas e procedimentos numéricos (MARTI; LIN, 1989), (FERREIRA et al., 2015). Ademais, o modelo também deve ser estendido para permitir a representação de linhas polifásicas, e para representar a variação dos parâmetros da linha com a frequência, já que para todas as análises realizadas neste trabalho utilizou-se parâmetros constantes com a frequência. Tais melhorias fazem parte das propostas de continuidade deste trabalho.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e discussões geradas durante o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, sendo que ao final também são apresentadas algumas propostas de continuidade de pesquisa.

No capítulo 2 foram apresentados os principais conceitos relacionados ao efeito corona em linhas de transmissão, onde foi descrita a física do fenômeno, bem como os métodos empregados para modelagem da capacitância dinâmica e para sua inclusão no cálculo de propagação ondas em linhas de transmissão. Com base nas informações apresentadas neste capítulo pode-se afirmar que:

- O efeito corona é um fenômeno normalmente observado durante a ocorrência de sobretensões, onde o campo elétrico produzido pela tensão no condutor da linha é elevado o suficiente para provocar a ionização do ar ao seu redor. Em linhas gerais, pode-se dizer que este é o fenômeno mais complexo que pode ocorrer em uma linha de transmissão, visto que possui características distribuídas, não-lineares, histeréticas e dependentes da frequência.
- Na literatura diferentes procedimentos foram adotados para modelar o efeito corona em linhas de transmissão. Basicamente, os modelos existentes baseiam-se na Lei Quadrática de Peek (equações de Skilling-Umoto) ou na curva q-v, donde é possível obter uma previsão da variação da capacitância e das perdas por efeito corona.
- A representação do efeito corona no cálculo de propagação de ondas em linhas de transmissão pode ser feita por duas maneiras distintas: 1) diretamente nas equações diferenciais que descrevem o comportamento da tensão e corrente ao longo da linha (modelos físicos); 2) Por meio da subdivisão da linha em pequenos trechos lineares, onde na junção entre os trechos são dispostos barramentos em derivação que representam o efeito corona de forma discreta.
- Uma das principais dificuldades existentes no desenvolvimento de modelos de efeito corona se deve à escassez de dados experimentais. Conforme foi apresentado, existem poucos trabalhos na literatura que foram voltados para o de-

envolvimento de medições que visam caracterizar o fenômeno na propagação de ondas em linhas de transmissão.

No capítulo 3 foi realizada uma avaliação de diversos modelos do efeito corona aplicáveis a programas do tipo EMT (modelos discretos), os quais foram implementados no *software* PSCAD. Nesta análise avaliou-se o desempenho dos modelos de Kudyan e Shih, K. Lee, Motoyama e Ametani, Gary *et al* e Siliciu. Para todos os modelos os resultados obtidos nas simulações foram comparados tanto com as medições na linha Tidd quanto com as medições na linha EDF, a fim de promover uma melhor avaliação. As principais conclusões obtidas nesta etapa foram:

- Para representação do efeito corona nos estudos de descargas atmosféricas em programas do tipo EMT é necessário realizar a discretização espacial da linha em um grande número de trechos, cujo comprimento a ser adotado depende da frequência do sinal aplicado.
- Dentre todos os modelos analisados o de Kudyan e Shih é o mais simplificado, visto que este representa o efeito corona como um fenômeno estático e linear. Por este motivo, o modelo é de fácil implementação e exige pouco esforço computacional. Todavia, comparando-se os resultados obtidos nas simulações com as medições realizadas nos experimentos Tidd e EDF, pode-se constatar que o mesmo não é capaz de produzir bons resultados, já que tanto as máximas sobretensões calculadas quanto as formas de ondas obtidas foram muito distintas das obtidas nas medições.
- O modelo de Gary *et al*, que corresponde a um modelo estático e não-linear, também é de fácil implementação, uma vez que para a sua aplicação é necessário conhecer apenas a geometria da linha e o raio do condutor (não são necessárias medições de curvas q-v ou dados experimentais). Apesar deste fato, os resultados mostraram que o modelo possui baixa precisão, visto que as formas de ondas obtidas apresentam distorções muito maiores do que aquelas observadas nas medições.
- O modelo de Siliciu, o qual é, dentre todos os modelos analisado, o único capaz de representar o efeito corona como um fenômeno dependente da frequência, apresentou bons resultados em comparação com as medições EDF. Contudo, para as medições na linha Tidd o modelo apresentou maiores atenuações e distorções do que as que ocorrem nas medições. Este modelo é extremamente

matemático e de difícil implementação, uma vez que a sintonização de seus parâmetros somente pode ser realizada a partir de curvas q-v obtidas por medições.

- O modelo de K. Lee, o qual é um modelo estático e não-linear, baseia-se na Lei quadrática de Peek e nas equações propostas por Skilling-Umoto para representação da variação da capacitância e do aumento das perdas. Verificou-se pelas análises que o modelo possui o melhor desempenho dentre todos os modelos analisados, fornecendo resultados que apresentaram boa concordância com as medições nas linhas Tidd e EDF. Uma desvantagem com relação à utilização deste modelo reside no fato de que, para a sua aplicação é necessário conhecer os parâmetros σ_C e σ_G , os quais somente podem ser obtidos experimentalmente.
- Em comparação com as medições na linha Tidd, o modelo de Motoyama e Ametani, o qual corresponde a uma linearização por partes do modelo de K. Lee, apresentou resultados com relativa precisão, apesar de existirem fortes oscilações na cauda da onda devido ao chaveamento sucessivo dos diodos. Contudo, em comparações com as medições na linha EDF, o modelo não foi capaz de produzir bons resultados, principalmente nos casos em que o sinal viaja por maiores distâncias ao longo da linha.

Perante as informações apresentadas somos levados a questionar se a representação da dependência da frequência do efeito corona é realmente importante para o cálculo de propagação de ondas, uma vez que o modelo de K. Lee não representa tal dependência, e foi capaz de fornecer melhores resultados que o modelo de Siliciu. Contudo, para obter resultados concretos a este respeito seria necessário realizar um maior número de comparações com dados de medições em campo.

No capítulo 4 foi apresentada uma nova metodologia para representação do efeito corona em linhas de transmissão. O modelo desenvolvido é baseado no método das características e no esquema proposto por Dommel para representação de linhas de transmissão a parâmetros distribuídos em programas do tipo EMT. Por meio de algumas modificações foi possível representar a capacitância da linha como um parâmetro dependente da tensão. Em seguida as perdas por efeito corona foram representadas por meio de condutâncias em derivação, que também são dependentes da tensão. As principais informações apresentadas neste capítulo foram:

- Por se tratar de um caso mais geral do modelo Bergeron, o modelo proposto pode ser utilizado de maneira genérica, tanto para casos em que há ocorrência do efeito corona, quanto para casos onde a tensão crítica não é excedida. Ademais, este também pode ser representado por uma simples rede de impedância equivalente, o que o torna adequado para implementação em programas do tipo EMT e permite fácil combinação com outros componentes de um sistema elétrico.
- Foi apresentada uma técnica de solução que permite realizar o cálculo das tensões nodais sem a necessidade de utilizar métodos iterativos, permitindo que os cálculos sejam realizados com baixo custo computacional. A técnica se mostrou adequada para casos que utilizam um passo de integração menores, como por exemplo em simulações de descargas atmosféricas.
- Para validação do modelo inicialmente foram realizados testes que avaliaram a possibilidade de se representar os experimentos realizados nas linhas Tidd e EDF somente pela fase incidente (linha monofásica) e com parâmetros constantes na frequência. Pode-se constatar que quando o surto de tensão é composto por componentes harmônicas numa faixa de frequência estreita, a linha pode ser representada por meio de parâmetros constantes com a frequência, desde que os valores de tais parâmetros sejam calculados para a frequência predominante do fenômeno. Nessas circunstâncias, a linha Tidd pode ser representada utilizando-se parâmetros constantes, os quais foram calculados para a frequência de 100 kHz. Por outro lado, no caso das medições EDF o surto de tensão aplicado possui componentes harmônicas que abrangem um largo espectro de frequência, não podendo ser representado por parâmetros constantes.
- Para representação do efeito corona utilizaram-se as equações de Skilling-Umoto. O motivo para escolha de tais equações reside no fato de que este modelo descreve a variação da capacitância de maneira suave, sendo esta uma premissa para aplicação do VDLM. Além disso, as análises realizadas no capítulo 3 mostraram que o modelo de K. Lee, o qual também é baseado nas equações de Skilling-Umoto, apresentou o melhor desempenho dentre os modelos analisados, indicando que tais equações representam com boa precisão a variação da capacitância da linha e das perdas por efeito corona.

- O modelo proposto foi implementado no *software* Matlab e comparado com dados de medições da linha Tidd. Neste caso mostrou-se que os melhores resultados foram obtidos no caso em a linha é discretizada em trechos de 20 m, utilizando-se um passo de integração de 1 ns.
- Além disso, foi possível constatar que para um bom desempenho do modelo é necessário utilizar um passo de integração cujo valor é de vinte cinco a oitenta vezes menor do que o tempo de propagação entre os terminais da linha na ausência do efeito corona, ou seja, $25 \leq (\tau_0/\Delta t) \leq 80$. Deste modo, o VDLM diferencia-se do modelo clássico de Bergeron nesse aspecto, visto que neste último é suficiente a utilização de um passo de integração dez vezes menor do que o tempo de propagação, ou $(\tau_0/\Delta t) \geq 10$.
- Por último, é oportuno ressaltar que o modelo se mostrou altamente robusto para representação do efeito corona no cálculo de propagação de ondas, permitindo representar atenuações e distorções provocadas por este fenômeno de maneira simples, direta e com baixo custo computacional.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nas informações apresentadas na subseção anterior, aliada à experiência adquirida pelo autor no desenvolvimento desta pesquisa, verifica-se a necessidade de que sejam realizadas algumas análises adicionais.

Com relação à avaliação do desempenho de modelos de efeito corona, destacam-se os pontos a seguir:

- Uma vez que o modelo de K. Lee apresentou o melhor desempenho entre os modelos analisados, seria interessante desenvolver novos métodos para obtenção dos parâmetros σ_C e σ_G .
- Existem modelos na literatura que permitem obter a curva q-v sem a necessidade de realizar simulações computacionais. Nessas circunstâncias, seria extremamente importante realizar a implementação desses modelos em programas do tipo EMT e avaliar o desempenho dos mesmos no cálculo de propagação de ondas.
- Realizar comparações entre modelos aplicáveis a programas do tipo EMT e modelos físicos (que representam o efeito corona diretamente nas equações di-

ferenciais que descrevem a propagação de ondas em uma linha de transmissão).

- Avaliar a precisão dos modelos também para pulsos de tensão de polaridade negativa, bem como para outras medições existentes na literatura (incluindo sobretensões de chaveamento).
- Avaliar o impacto de se considerar o efeito corona no cálculo de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão.

Com relação ao novo método desenvolvido para representação do efeito corona em linhas de transmissão, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento e implementação de técnicas para controle da instabilidade numérica;
- Utilização de métodos iterativos para resolução das equações nodais da rede;
- Expansão do modelo para representação de linhas polifásicas;
- Expansão do modelo para permitir a representação da dependência com a frequência dos parâmetros longitudinais da linha;
- Implementação do modelo proposto em programas do tipo EMT;
- Avaliar o desempenho do modelo por meio de comparações com outras medições existentes na literatura, incluindo medições que avaliam a influência do efeito corona na atenuação de sobretensões de chaveamento.

6 BIBLIOGRAFIA

1. AL-TAI, M. A. et al. The simulation of surge corona on transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 1360–1368, 1989.
2. ARRUDA, C. K. DA C. **Modelagem de Efeito Coroa em Linhas de Transmissão em Corrente Contínua - tese de doutorado**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
3. BARROS, H. M.; CARNEIRO, S.; AZEVEDO, R. M. An efficient recursive scheme for the simulation of overvoltages on multiphase systems under corona. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 3, p. 1443–1452, jul. 1995.
4. BARROS, M. T. C. **Efeito Coroa em Linhas de Transporte de Energia - Tese de doutorado**. [s.l.] Instituto Superior Técnico (I.S.T), 1985.
5. BARROS, M. T. C.; JESUS, C. **Wide bandwidth modeling of corona on high voltage transmission lines**. Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - (CEIDP'94). **Anais...**Arlington, TX, USA: IEEE, 1994Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/592075/>>
6. BRANIN, F. H. Computer methods of network analysis. **Proceedings of the IEEE**, v. 55, n. 11, p. 1787–1801, 1967.
7. C.GARY; CRISTESCU, D.; DRAGAN, G. Distorsion and attenuation of travelling waves caused by transient corona. **CIGRE Report, Study Committee 33: (Overvoltages and Insulation Co-ordination)**, 1989.
8. CARNEIRO, S. et al. An efficient procedure for the implementation of corona models in electromagnetic transients programs. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 2, p. 849–855, abr. 1994.
9. CARNEIRO, S.; MARTI, J. R. Evaluation of corona and line models in electromagnetic transients simulations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 1, p. 334–342, 1991.
10. CERVANTES, M. et al. Simulation of Switching Overvoltages and Validation With Field Tests. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 33, n. 6, p. 2884–2893, dez. 2018.
11. CHRISTOPOULOS, C. Propagation of surges above the corona threshold on a line with a lossy earth return. **The International Journal for Computation and**

- Mathematics in Electrical and Electronic Engineering - COMPEL**, v. 4, n. 2, p. 91–102, 1985.
12. CIGRE. **Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines** -. 1991
 13. CLADE, J. J.; GARY, C. H.; LEFEVRE, C. A. Calculation of Corona Losses Beyond the Critical Gradient in Alternating Voltage. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-88, n. 5, p. 695–703, maio 1969.
 14. CONTI, A. R. DE. **Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas - Tese de doutorado**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
 15. CORREIA DE BARROS, M. T. Identification of the capacitance coefficients of multiphase transmission lines exhibiting corona under transient conditions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 3, p. 1642–1648, jul. 1995.
 16. DÁVILA, M. et al. **Practical implementation of a transmission line model for transient analysis considering corona and skin effects**. IEEE Bologna PowerTech Conference. **Anais...**Bologna, Italy: 2003
 17. DÁVILA, M.; NAREDO, J. L.; MORENO, P. **A Characteristics Model for Electromagnetic Transient Analysis of Multiconductor Lines with Corona and Skin Effects**. International Conference on Power System transients (IPST). **Anais...**Montreal, Canadá: 2005
 18. DOMMEL, H. W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-88, n. 4, p. 388–399, 1969.
 19. DOMMEL, H. W. Nonlinear and Time-Varying Elements in Digital Simulation of Electromagnetic Transients. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-90, n. 6, p. 2561–2567, 1971.
 20. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Transmission Line Reference Book: 345kV and Above**. Second Ed. ed. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1982.
 21. FERREIRA, L. F. R. et al. **Comparative Solutions of Numerical Oscillations in the Trapezoidal Method used by EMTP-based Programs**. International Conference on Power Systems Transients (IPST2015). **Anais...**Cavtat, Croatia: 2015
 22. GALLAGHER, T. J.; DUDURYCH, I. M. Model of corona for an EMTP study of

- surge propagation along HV transmission lines. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 151, n. 1, p. 61, 2004.
23. GARY, C.; DRAGAN, G.; CRISTESCU, D. **Attenuation of travelling waves caused by corona.pdf**. International Conference on Large High Voltage Electric Systems. **Anais...Paris: 1978**
 24. GARY, C.; TIMOTIN, A.; CRISTESCU, D. Prediction of surge propagation influenced by corona and skin effect. **IEE Proceedings A Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews**, v. 130, n. 5, p. 264, 1983.
 25. GOMES, A. DA F. et al. **Q-V Characteristics Simulation through Artificial Neural Network**. International Conference on Power Systems Transients. **Anais...Budapest: 1999**
 26. GROSS, I. W.; MCCOY, R. L.; SHEADEL, J. M. Insulators and Line Hardware for Tidd 500-KV Test Lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 66, n. 1, p. 1592–1602, jan. 1947.
 27. GUILLIER, J. F.; POLOUJADOFF, M.; RIOUAL, M. Damping model of travelling waves by corona effect along extra high voltage three phase lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 4, p. 1851–1861, 1995.
 28. HARTMANN, G. Theoretical Evaluation of Peek's Law. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-20, n. 6, p. 1647–1651, nov. 1984.
 29. HE, J. et al. Attenuation and deformation characteristics of lightning impulse corona traveling along bundled transmission lines. **Electric Power Systems Research**, v. 118, p. 29–36, 2015.
 30. HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systems**. 1. ed. Washington, D. C.: CRC Press, 1999.
 31. HUANG, K.; ZHANG, X. An experimental study on corona q-u curves under non-standard lightning impulses. **Journal of Electrostatics**, v. 81, p. 37–41, 2016.
 32. HUANG, K.; ZHANG, X.; TAO, S. Electromagnetic Transient Analysis of Overhead lines Including Corona and Frequency Dependence Effects under Damped oscillation Surges. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 33, n. 5, p. 2198–2206, 2018.
 33. HUANG, K.; ZHANG, X.; XIAO, X. Modelling of the corona characteristics under damped oscillation impulses. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 7, p. 1648–1653, 2016.
 34. HUANG, W.-G.; SEMLYEN, A. Computation of electro-magnetic transients on three-

- phase transmission lines with corona and frequency dependent parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. PWRD-2, n. 3, p. 887–898, 1987.
35. INOUE, A. **Study on Propagation Characteristics of High-Voltage Traveling Waves with Corona Discharge**. 1983
 36. INOUE, A. Propagation Analysis of Overvoltage Surges with Corona Based Upon Charge Versus Voltage Curve. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-104, n. 3, p. 655–662, mar. 1985.
 37. JESUS, C.; BARROS, M. T. C. Modelling of corona dynamics for surge propagation studies. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 3, p. 1564–1569, jul. 1994.
 38. KUDYAN, H.; H-SHIH, C. A Nonlinear Circuit Model for Transmission Lines in Corona. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n. 3, p. 1420–1430, 1981.
 39. LANE, F. A. et al. Transformers and Lightning Arresters-Tidd 500-Kv Test Lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 66, n. 1, p. 1613–1618, jan. 1947.
 40. LANE, F. A.; WYMAN, B. W. Switchgear Equipment for Tidd High-Voltage Test Lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 66, n. 1, p. 1619–1623, jan. 1947.
 41. LEE, K. Non-Linear Corona Models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP). **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-102, n. 9, p. 2936–2942, set. 1983.
 42. LI, X.-R.; MALIK, O. P.; ZHAO, Z.-D. Computation of transmission line transients including corona effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 3, p. 1816–1822, jul. 1989a.
 43. LI, X.; MALIK, O. P.; ZHAO, Z. A Practical Mathematical Model of Corona for Calculation of Transients on Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 1145–1152, abr. 1989b.
 44. MANITOBA HYDRO INTERNATIONAL LTD. **EMTDC User's Guide**. Winnipeg, Manitoba: 2010
 45. MARTI, J. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-101, n. 1, p. 147–157, jan. 1982.
 46. MARTÍ, J. R.; CASTELLANOS, F.; SANTIAGO, N. Wide-band corona circuit model for transient simulations. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2,

- p. 1003–1013, 1995.
47. MARTI, J. R.; LIN, J. Suppression of numerical oscillations in the EMTP. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 4, n. 2, p. 739–747, 1989.
 48. MARTINEZ, J. A.; GOLDSWORTHY, D.; HORTON, R. Switching Overvoltage Measurements and Simulations—Part I: Field Test Overvoltage Measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 6, p. 2502–2509, dez. 2014.
 49. MARUVADA, P. S.; MENEMENLIS, H.; MALEWSKI, R. Corona characteristics of conductor bundles under impulse voltages. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 96, n. 1, p. 102–115, jan. 1977.
 50. MARUVADA, P. S.; NGUYEN, D. H.; HAMADANI-ZADEH, H. Studies on modeling corona attenuation of dynamic overvoltages. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 1441–1449, 1989.
 51. MCCANN, G. D. The Effect of Corona on Coupling Factors Between Ground Wires and Phase Conductors. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 62, n. 12, p. 818–826, dez. 1943.
 52. MIHĂILESCU-SULICIU, M.; SULICIU, I. A rate type constitutive equation for the description of the corona effect. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n. 8, p. 3681–3685, 1981.
 53. MIRANDA, G. C. DE. **Uma Contribuição ao Estudo do Efeito Corona em Linhas de Transmissão Utilizando o Método de Elementos Finitos - Tese de doutorado**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 1994.
 54. MIRANDA, G. C. DE et al. Finite element method for transmission line corona effect simulation using the emtp. **Electric Machines and Power Systems**, v. 27, n. 7, p. 781–794, 1999.
 55. MORCHED, A.; GUSTAVSEN, B.; TARTIBI, M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 3, p. 1032–1038, jul. 1999.
 56. MOTOYAMA, H.; AMETANI, A. Development of a linear model for corona wave deformation and its effects on lightning surges. **Electrical Engineering in Japan**, v. 107, n. 2, p. 98–106, 1987.
 57. NAGAOKA, N.; MOTOYAMA, H.; AMETANI, A. Lightning surge calculations including corona effects using a two-conductor model. **Electric Power Systems Research**, v. 13, n. 1, p. 31–41, ago. 1987.
 58. NAREDO, J. L.; SOUDACK, A. C.; MARTI, J. R. Simulation of transients on

- transmission lines with corona via the method of characteristics. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 142, n. 1, p. 81, 1995.
59. NODA, T. **Development of a Transmission-line Model Considering the Skin and Corona Effects for Power Systems Transient Analysis - Doctoral Thesis**. [s.l.] Doshisha University, Kyoto, Japan, 1996.
 60. NODA, T. et al. A Wave-Front-Time Dependent Corona Model for Transmission-Line Surge Calculations. **Electrical Engineering in Japan**, v. 129, n. 1, p. 29–38, 1999.
 61. NODA, T.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an ARMA model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 1, p. 401–411, 1996.
 62. PALVA, M. V. **Research on Long Air Gap Discharges at Les Renardières**. CIGRE Report, Study Committee 33: (Overvoltages and Insulation Co-ordination). **Anais...1972**
 63. PEEK, F. W. The Law of Corona and the Dielectric Strength of Air. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. XXX, n. 3, p. 1889–1965, jun. 1911.
 64. PEEK, F. W. Laws of corona I, II, III. **AIEE Transactions**, v. 30, p. 1889, 1912.
 65. PETERSON, E. L. et al. Line Conductors-Tidd 500 kV test Lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 66, n. 1, 1947.
 66. PINTO, C. A. M. **Soluções da Equação de Onda Unidimensional - Dissertação de mestrado**. [s.l.] Universidade de Aveiro, 2013.
 67. PORTELA, C. M. **Computer simulation of electromagnetic transients with non-linear phenomena**. Proc. of 6th Power Systems Computation conference. **Anais...1978**
 68. RAMÍREZ, A. et al. Electromagnetic transients in overhead lines considering frequency dependence and corona effect via the method of characteristics. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 23, n. 3, p. 179–188, mar. 2001.
 69. SANTIAGO, N.; CASTELLANOS, F. **Physical Aspects of corona effect during transients overvoltages and their simulations with circuit models**. International Conference on Power systems and Engineering. **Anais...1992**
 70. SARMA, M. P.; JANISCHEWSKYJ, W. D.C. corona on smooth conductors in air. Steady-state analysis of the ionisation layer. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 116, n. 1, p. 161, 1969.

71. SEMLYEN, A.; WEI-GANG, H. Corona modelling for the calculation of transients on transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 3, p. 228–239, 1986.
72. SKILLING, H. H.; DYKES, P. DE K. Distortion of traveling waves by corona. **Electrical Engineering**, v. 56, n. 7, p. 850–857, jul. 1937.
73. THANG, T. H. et al. A simplified model of corona discharge on overhead wire for FDTD computations. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 54, n. 3, p. 585–593, 2012a.
74. THANG, T. H. et al. FDTD Simulation of Lightning Surges on Overhead Wires in the Presence of Corona Discharge. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 54, n. 6, p. 1234–1243, 2012b.
75. THANG, T. H. et al. **Lightning surges on an overhead wire in the presence of corona: FDTD simulation of Wagner et al.'s experiment**. 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. **Anais...IEEE**, maio 2012cDisponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6237802/>>
76. THANG, T. H. et al. FDTD simulations of corona effect on lightning-induced voltages. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 56, n. 1, p. 168–176, 2014.
77. TREMAINE, R. L.; LIPPERT, G. D. Instrumentation and Measurement - Tidd 500-Kv Test Lines -. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 66, n. 1, p. 1624–1631, jan. 1947.
78. TRINH, N. G. Partial discharge XIX: discharge in air part I: physical mechanisms. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 11, n. 2, p. 23–29, 1995.
79. UMOTO, J.; HARA, T. Numerical analysing of line equations considering corona loss on single-conductor system. **Electrical Engineering in Japan**, v. 89, p. 909–916, 1969.
80. VISACRO, S.; CONTI, A. DE. A distributed-circuit return-stroke model allowing time and height parameter variation to match lightning electromagnetic field waveform signatures. **GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS**, v. 32, p. 1–5, 2005.
81. WAGNER, C. F. et al. Corona considerations on High-Voltage Lines and Design Features of Tidd 500 kV Test Lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 66, n. 1, p. 1583–1591, 1947.
82. WAGNER, C. F.; GROSS, I. W.; LLOYD, B. L. High-Voltage Impulse Tests on

- Transmission Lines [includes discussion]. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**, v. 73, n. 2, p. 196–210, abr. 1954.
83. WAGNER, C. F.; LLOYD, B. L. Effects of corona on traveling waves. **Electrical Engineering**, v. 74, n. 12, p. 1071–1071, dez. 1955.
84. WATERS, R. T.; JONES, R. E.; BULCOCK, C. J. Influence of atmospheric ions on impulse corona discharge. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 112, n. 7, p. 1431, 1965.
85. WATSON, N.; ARRILLAGA, J. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation. 2003.
86. WEI-GANG, H.; XIAO-PING, W. Corona Q - V characteristics under unipolar-damped oscillating impulses. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 4, n. 6, p. 758–762, 1997.
87. WHITEHEAD, J. B. The Electric Strength of Air. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. XXIX, n. 2, p. 1159–1187, maio 1910.
88. YANG, P.; CHEN, S.; HE, J. Lightning impulse corona characteristic of 1000-kv uhv transmission lines and its influences on lightning overvoltage analysis results. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 4, p. 2518–2525, 2013.
89. ZAYIENTS, S. L.; KOSTENKO, M. V.; LYAPIN, A. G. **An experimental investigation on the deformation of travelling wave due to impulse corona**. 1958

Apêndice A - Medições na linha Tidd 500 kV

Entre os anos de 1947 e 1955 diversos pesquisadores ligados a *American Gas and Electric Company* realizaram uma série de experimentos em duas linhas transmissão experimentais de extra-alta tensão, cujo intuito era investigar o comportamento de tais linhas durante a ocorrência de sobretensões (LANE et al., 1947), (PETERSON et al., 1947), (GROSS; MCCOY; SHEADEL, 1947), (LANE; WYMAN, 1947), (TREMAINE; LIPPERT, 1947), (WAGNER et al., 1947), (WAGNER; GROSS; LLOYD, 1954), (WAGNER; LLOYD, 1955). Nesses experimentos foram analisados diversos aspectos decorrentes do efeito corona, como geração de rádio interferência, aumento nas perdas, além da atenuação e distorção nas formas de onda durante a ocorrência de descargas atmosféricas.

A Figura A.1 apresenta uma visão em perspectiva das linhas de transmissão utilizadas nos experimentos. Apesar de não estar representado na Figura, tais linhas também foram equipadas com cabos para-raios, apresentados na Figura A.2, que apresenta o perfil transversal da linha. Deve-se destacar que em ambas as linhas o terminal emissor está conectado a um gerador de pulso, enquanto a extremidade receptora é conectada a resistores de terminação, cuja resistência é igual à impedância característica da linha (linha casada na extremidade).

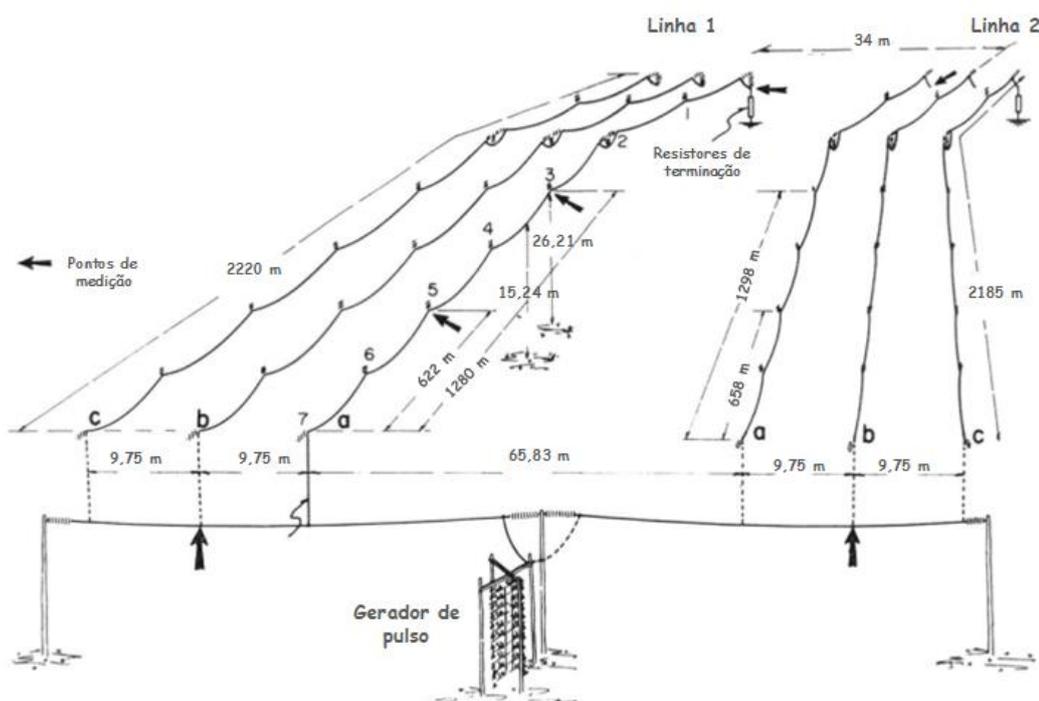


Figura A.1 - Linhas de transmissão utilizadas nos experimentos do projeto Tidd 500 kV. Adaptado de (WAGNER; GROSS; LLOYD, 1954).

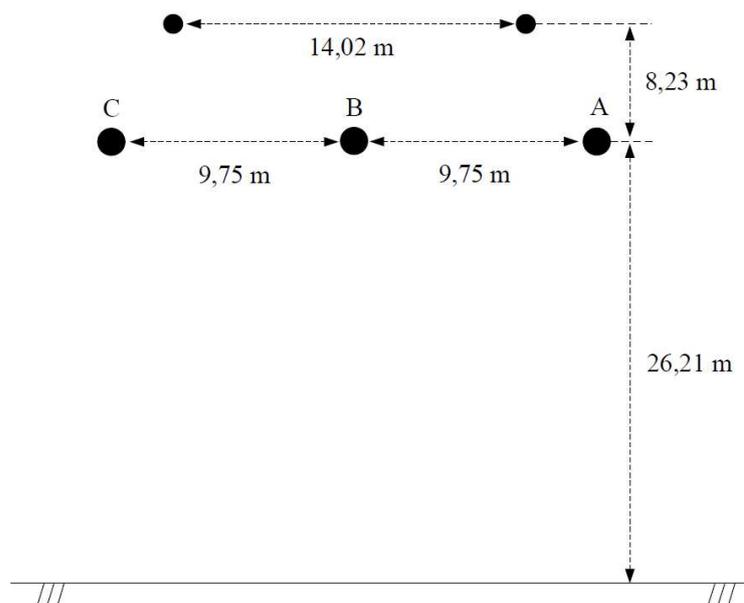


Figura A.2 - Perfil transversal das linhas de transmissão utilizadas nos experimentos do projeto Tidd 500 kV.

Como pode-se observar nas Figuras A.1 e A.2, as linhas possuem o mesmo perfil transversal. Contudo, existem ligeiras diferenças no comprimento e nos pontos onde foram realizadas as medições. Além disso, tais linhas foram equipadas com diferentes tipos de condutores a fim de investigar a sua influência na geração do efeito corona. Conforme amplamente divulgado na literatura, tanto o raio do condutor quanto o tipo de superfície (lisa ou rugosa) influenciam no valor do campo elétrico crítico. Todas as fases da linha 2 foram equipadas com condutores de alumínio do tipo ACSR com 50,8 mm de diâmetro. Para os condutores da linha 1, contudo, foram realizados testes distintos. Em uma primeira análise, todas as fases foram equipadas com condutores de cobre do tipo Hedernheim (HH) com 41,9 mm de diâmetro. Posteriormente foram realizados testes onde apenas a fase A da linha foi equipada com um condutor do tipo ACSR de 23,54 mm de diâmetro, sendo que nas demais fases foram mantidos os condutores de cobre. Em ambas as linhas foram utilizados cabos para-raios do tipo ACSR com 14,63 mm de diâmetro. A Figura A.3 apresenta a seção reta dos condutores descritos acima, e na Tabela A.1 são apresentadas informações importantes a respeito de tais condutores, as quais são necessárias para reprodução desses experimentos nas simulações digitais. Deve-se destacar que os condutores de alumínio foram produzidos pela fabricante *Aluminum Company of América* (ALCOA), enquanto que os condutores de cobre foram produzidos pela *Anaconda Wire and Cable Company* (PETERSON et al., 1947).

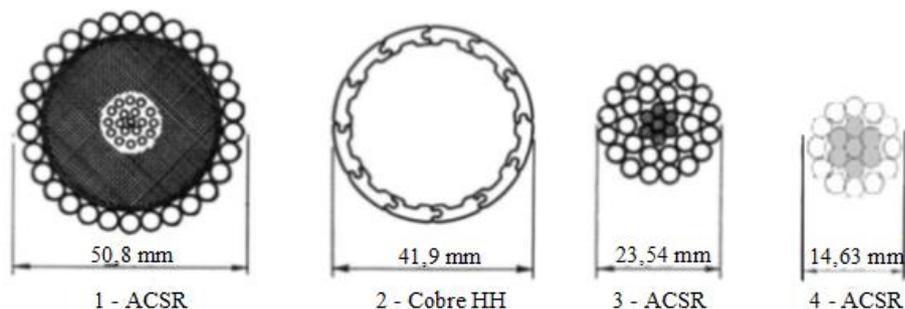


Figura A.3 - Seção reta dos condutores utilizados nos experimentos do projeto Tidd. Adaptado de (WAGNER; LLOYD, 1955).

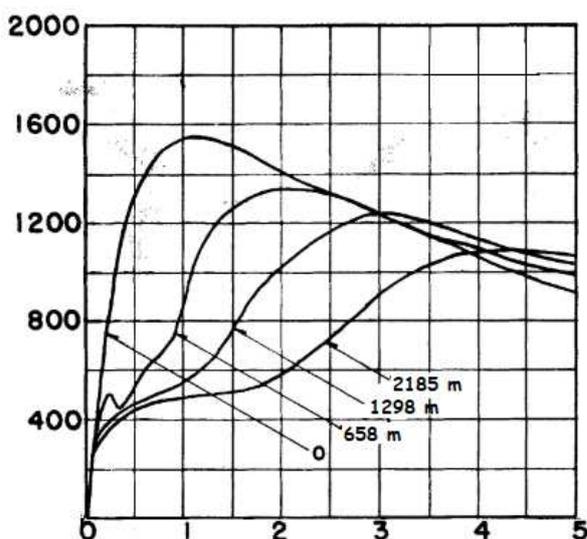
Tabela A.1 - Dados dos condutores.

Condutor	Diâmetro Interno (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Resistência elétrica CC à 20°C (Ω/km)
1	41,55	50,80	0,0206
2	33,73	41,90	0,040682
3	7,63	23,55	0,1022
4	7,72	14,63	0,3588

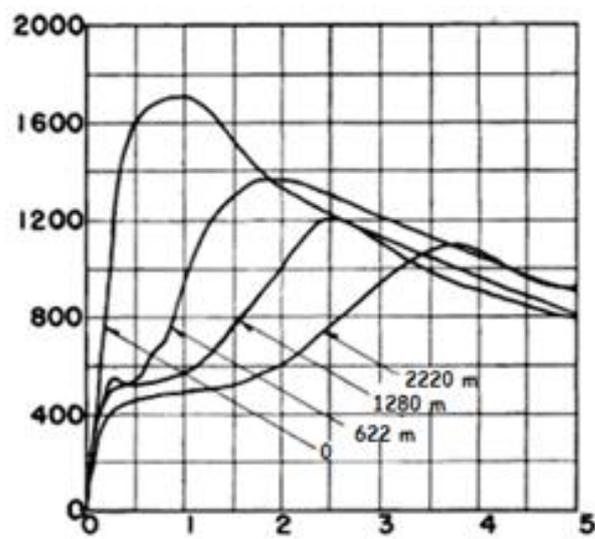
Outro parâmetro importante e necessário para reprodução desses experimentos é a resistividade do solo. Conforme informações apresentadas em (THANG et al., 2012c), a resistividade do solo na região onde os testes foram realizados varia entre 12 $\Omega\cdot\text{m}$ e 100 $\Omega\cdot\text{m}$. Nessas circunstâncias, nas simulações digitais é conveniente adotar um valor igual a 56 $\Omega\cdot\text{m}$, que corresponde a um valor médio. O leitor pode estar se perguntando o motivo pelo qual o solo possui resistividade tão reduzida nessa região. Essa informação pode ser justificada pelo fato de que, conforme apresentado em (WAGNER et al., 1947), as linhas de transmissão onde os testes foram realizados encontravam-se às margens do Rio Ohio, em Brilliant, Ohio, EUA, onde a alta umidade do solo devido à presença do rio contribui para a redução da resistividade elétrica.

No que diz respeito à análise da influência do efeito corona na atenuação e distorção das formas de onda, diversos testes foram realizados. Contudo, aqui serão descritos apenas aqueles que são de interesse para este trabalho. Basicamente, os experimentos realizados consistiram na aplicação de um pulso de tensão em apenas uma das fases da linha (fase A), sendo que as demais se encontravam desenergizadas. Sendo assim, medições foram realizadas em pontos estratégicos (conforme apresentado na Figura A.1), visando analisar a atenuação e distorção causada pelo efeito corona.

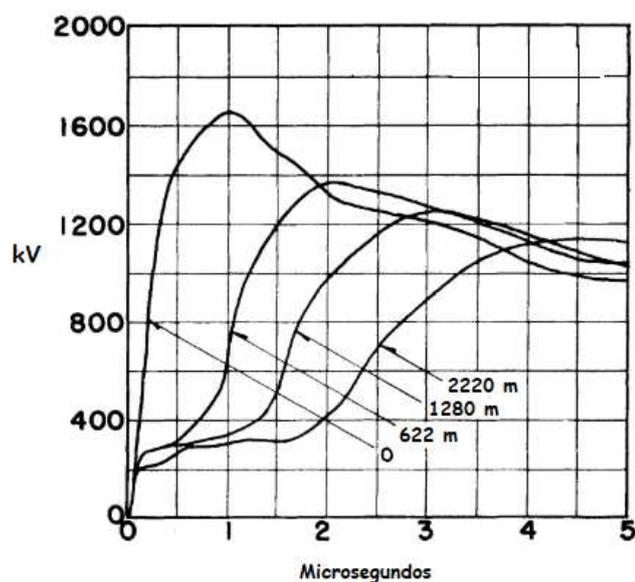
A Figura A.4 apresenta as formas de onda obtidas nas medições para os três diferentes tipos de condutores. Nesse experimento aplicou-se um pulso de tensão de aproximadamente 1600 kV (polaridade positiva) na fase A do terminal emissor, e medições foram realizadas ao longo da linha e na extremidade receptora. É oportuno destacar que outros experimentos também foram realizados, onde variou-se a amplitude e a polaridade do pulso de tensão aplicado. Os resultados obtidos são apresentados em (WAGNER; GROSS; LLOYD, 1954).



(a) - ACSR de 50,8 mm de diâmetro.



(b) - Hedernheim (HH) de 40,1 mm de diâmetro.



(c) - ACSR de 23,55 mm de diâmetro.

Figura A.4 - Medições na linha Tidd para os casos em que a mesma está equipada com diferentes condutores. As Figuras apresentam as formas de onda obtidas nos casos em que a linha está equipada com condutores (a) – ACSR de 50,8 mm de diâmetro, (b) – Hedernheim (HH) de 40,1 mm de diâmetro, (c) – ACSR de 23,55 mm de diâmetro. Adaptado de (WAGNER; GROSS; LLOYD, 1954).

Além das medições relacionadas com a propagação de surtos em linhas de transmissão, neste trabalho também foram realizadas medições laboratoriais de curvas carga-tensão (q-v) para diferentes tipos de condutores. Tais medições foram conduzidas por Wagner e Lloyd, os primeiros pesquisadores a utilizarem o conceito de curva q-v para obter uma previsão da variação da capacitância da linha quando se encontra sob efeito corona. Contudo, apesar das medições na LT terem sido realizadas para três diferentes tipos de condutores, as medições de curvas q-v foram realizadas apenas para o condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro. A Figura A.5 apresenta os resultados obtidos para aplicação de pulsos de tensão de diferentes amplitudes, os quais representam sobretensões causadas por descargas atmosféricas (polaridade positiva).

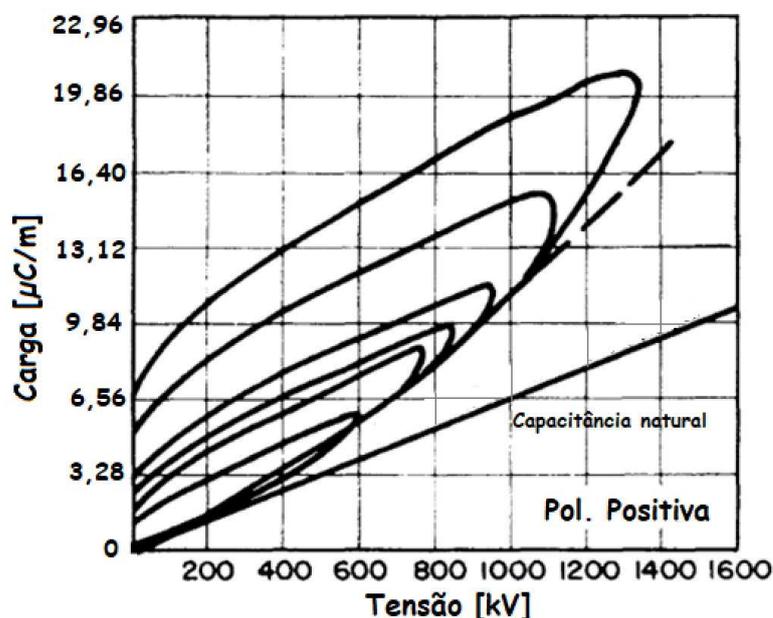


Figura A.5 - Medições de curvas q-v para o condutor ACSR de 23,55 mm de diâmetro utilizado nos experimentos do projeto Tidd 500 kV. Adaptado de (WAGNER; LLOYD, 1955)

É oportuno ressaltar que apesar do fato dos experimentos Tidd terem sido realizados há mais de meio século, estes experimentos são os mais bem relatados na literatura, visto que os autores forneceram uma grande quantidade de informações a respeito de todos os equipamentos, métodos e procedimentos adotados para realização das medições. Por este motivo estas medições foram adotadas para validação e análise de um grande número de trabalhos publicados ao longo dos anos (KUDYAN; H-SHIH, 1981), (CARNEIRO; MARTI, 1991), (NAREDO; SOUDACK; MARTI, 1995), (MARTÍ; CASTELLANOS; SANTIAGO, 1995), (MIRANDA et al., 1999), (RAMÍREZ et al., 2001), (GALLAGHER; DUDURYCH, 2004).

Apêndice B – Medições EDF

Similarmente às medições na Linha Tidd, as medições realizadas na companhia *Électricité de France* (EDF) (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978) foram desenvolvidas com o intuito de investigar a influência do efeito corona na atenuação e distorção de sobretensões provenientes de descargas atmosféricas. Contudo, a principal diferença com relação aos experimentos Tidd consiste no fato de que, ao invés de se utilizar uma linha experimental, os experimentos EDF foram realizados em uma linha de transmissão real, de 220 kV e 65 km.

A geometria da linha de transmissão descrita pelos autores é apresentada na Figura B.1. Os condutores das fases são do tipo ACSR de 26,4 mm de diâmetro externo e 11,52 mm de diâmetro interno, cuja resistividade é estimada em $0,0896 \Omega/\text{km}$ a 20°C . Os autores não descreveram o tipo de cabo para-raios utilizado na linha. Além disso, não foi fornecido o valor da resistividade do solo na região em que os experimentos foram realizados. Por se tratar de um solo europeu, pode-se considerar um valor padrão de $100 \Omega \cdot \text{m}$.

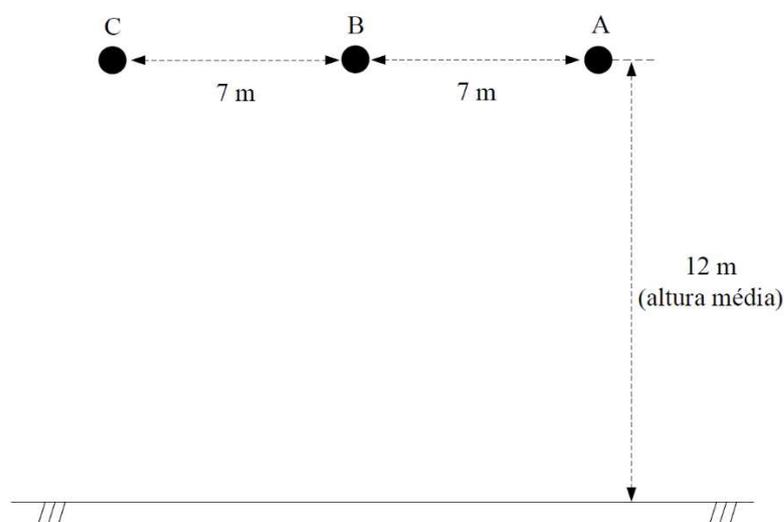


Figura B.1 – Perfil transversal da linha de transmissão utilizada nas medições EDF.

Os experimentos realizados consistiram na aplicação de um pulso de tensão na fase A do terminal emissor, e medições foram realizadas a 1 km, 3 km, 7 km e 10 km desse terminal. As demais fases da linha foram mantidas desenergizadas durante os testes.

Diferentemente dos experimentos Tidd, nos experimentos EDF não foram realizadas medições na entrada da linha, a fim de se obter a forma de onda aplicada no terminal emissor. Contudo, segundo os autores, a forma de onda do pulso de tensão aplicado assemelha-se à

uma dupla exponencial com amortecimentos, com 1,11 MV de pico e 0,29 μs de tempo de subida, conforme apresentado na Figura B.2. A equação utilizada para produzir esta forma de onda foi sugerida pelos próprios autores, e é apresentada em (B.1). A Figura B.3 apresenta as formas de onda obtidas nas medições ao longo da linha.

$$v(t) = 850 \cdot \left[0,998e^{-0,123t} - 1,051e^{-4,1t} \sin\left(12,3t + \frac{70\pi}{180}\right) \right] \text{ [kV]} \quad (\text{B.1})$$

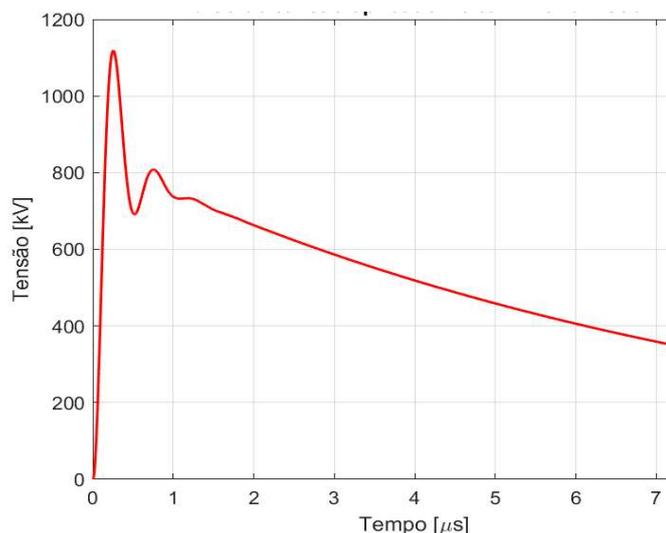


Figura B.2– Pulso de tensão aplicado na entrada da linha.

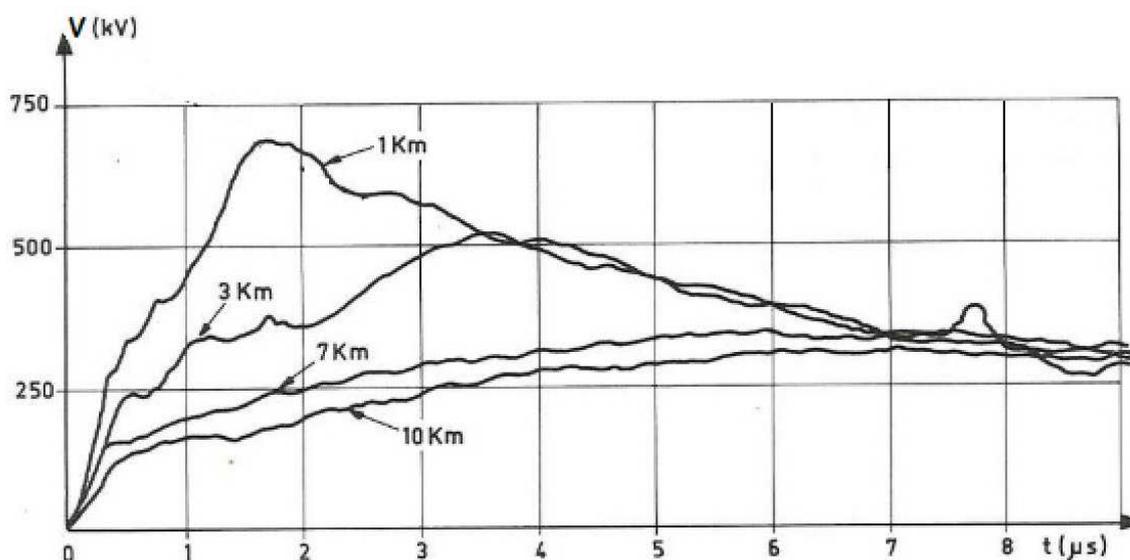


Figura B.3 - Medições na linha EDF. Adaptado de (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978).

Além de medições relacionadas à propagação de onda na presença do efeito corona, a companhia EDF também realizou medições de curvas q-v para diferentes tipos de condutores (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978), principalmente aqueles que eram mais utilizados em linhas de transmissão na época em que os experimentos foram efetuados (1978). A Figura

B.4 apresenta medições de curvas q-v para o condutor ACSR de 26,4 mm de diâmetro utilizado na linha de transmissão em que foram realizados os experimentos. No caso apresentado na figura, para medições das curvas q-v foram aplicados pulsos de tensão cuja forma de onda é de uma dupla exponencial de 1,2/50 μ s (polaridade positiva), onde variou-se a amplitude máxima. Ademais, conforme pode ser observado, infelizmente as medições foram feitas coletando-se um pequeno número de pontos, o que faz a curva apresentar uma forma mais “retangular” do que aquela que realmente ocorre na prática.

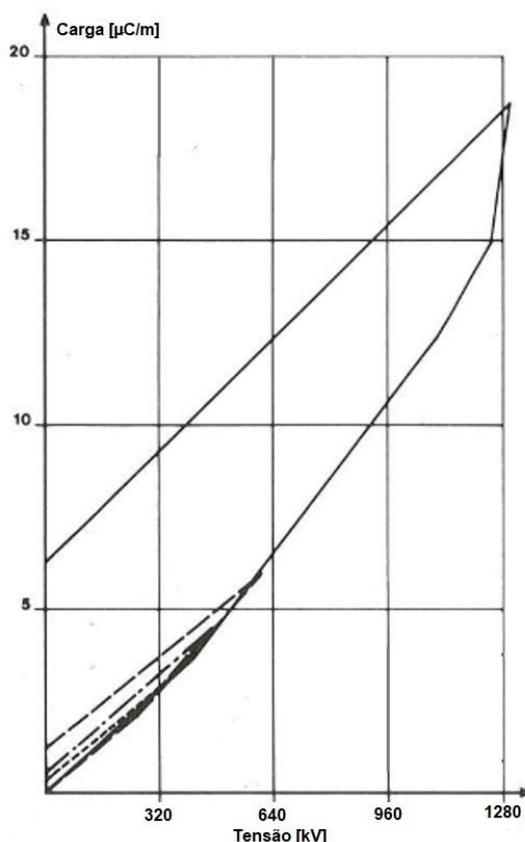


Figura B.4 – Medições de curvas q-v para o condutor ACSR de 26,4 mm de diâmetro utilizado na linha EDF. Adaptado de (GARY; DRAGAN; CRISTESCU, 1978).