



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Elétrica

Programa de Pós-Graduação

**Contribuições aos Estudos Computacionais de
Ressarcimento por Danos Elétricos Devido a
Descargas Atmosféricas Diretas e Indiretas**

Afonso Bernardino de Almeida Junior

Uberlândia
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**CONTRIBUIÇÕES AOS ESTUDOS COMPUTACIONAIS DE
RESSARCIMENTO POR DANOS ELÉTRICOS DEVIDO A
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRETAS E INDIRETAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia por Afonso Bernardino de
Almeida Junior para a obtenção do título de
Doutor em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, Ph.D. - UFU (**Orientador**)
Luciano Martins Neto, Dr. - UFU (**Coorientador**)
Isaque Nogueira Gondim, Dr. - UFU
Marcus Vinícius Borges Mendonça, Dr. -UFTM
Maria Emília de Lima Tostes, Dra. – UFPA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

- A447c
2016 Almeida Junior, Afonso Bernardino de, 1987-
Contribuições aos estudos computacionais de ressarcimento por
danos elétricos devido a descargas atmosféricas diretas e indiretas /
Afonso Bernardino de Almeida Junior. - 2016.
202 f. : il.
- Orientador: José Carlos de Oliveira.
Coorientador: Luciano Martins Neto.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.
1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Controle de
qualidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de, 1947- II. Martins Neto,
Luciano, 1948- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Contribuições aos Estudos Computacionais de Ressarcimento por Danos Elétricos Devido a Descargas Atmosféricas Diretas e Indiretas

Afonso Bernardino de Almeida Junior

Tese apresentada por Afonso Bernardino de Almeida Junior à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D.
(Orientador) – UFU

Prof. Darizon Alves de Andrade, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus pais, Afonso Bernardino de Almeida e Zulmira Cândida de Almeida, aos meus irmãos Greice e Thiago, à minha esposa Gabriela Yukie Ueda e a todos que de alguma forma contribuíram para esta realização

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** por iluminar os caminhos da minha vida e pela generosa companhia durante as etapas de realização deste trabalho, auxiliando nas minhas decisões e atitudes.

Em especial, expresso meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. **José Carlos de Oliveira** por todo incentivo, colaboração, amizade, confiança e ensinamentos, essenciais à concretização desta meta. Ainda estendo o agradecimento aos meus co-orientadores Prof. **Luciano Martins Neto**, Profª. **Ana Vukovic** e Prof. **Dave W. P. Thomas** por todo auxílio e colaboração.

À **minha família** pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo ao longo das fases e obstáculos superados em minha vida.

Aos amigos dos Laboratórios de Qualidade da Energia, **Alex Reis, Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, Camilla de Sousa Chaves, Diego Santana, Fabricio Parra Santilio, João Areis Júnior, Leandro Pains, Paulo Henrique Rezende e Vinicius Cardoso de Paula** pelo companheirismo, apoio, amizade e agradável convívio proporcionado nos diversos momentos de trabalho em equipe.

Aos professores **Antônio Carlos Delaiba, Carlos Eduardo Tavares, Isaque Nogueira Gondim, Ivan Nunes Santos, José Rubens Macedo Júnior e Marcelo Lynce Ribeiro Chaves** pelo auxílio e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas e amigos da Pós-Graduação **Giovani Aud Lourenço, Matheus Garcia Soares e Paulo César Álvares Mota** pelo apoio e amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFU, pela oportunidade de crescimento profissional e aprendizado. À **Cinara, José Maria e Kátia** pela presteza nos encaminhamentos dos assuntos vinculados com a secretaria da Pós-Graduação.

A **CAPES** por ter concedido suporte financeiro a esta pesquisa durante a etapa em que tive a oportunidade de complementar os estudos no Reino Unido.

A *University of Nottingham*, nas pessoas de **Ahmed Elkalsh, Daniel Simmons, Sendy Phang, Hayan Nasser, Latifah Abdul, Xuesong Meng, Zhewen Zhang, Lukasz Sójka** e todos do *George Green Institute*.

Ao **IFTM** pela viabilização de horários e cessão do afastamento para que pudesse cumprir com total dedicação todas as atividades relacionadas com esta tese de doutorado.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a viabilização desta tese de doutorado.

RESUMO

Esta tese encontra-se direcionada ao desenvolvimento de melhorias da potencialidade e confiabilidade de um aplicativo computacional, denominado por APR, destinado a avaliação da consistência do nexo causal entre fenômenos anômalos passíveis de ocorrência nas redes elétricas e a manifestação de danos físicos em equipamentos das unidades consumidoras. O tema central focado compreende os efeitos das descargas atmosféricas, diretas e indiretas, sobre as variações dos potenciais de terra, cujos impactos sobre os esforços dielétricos e térmicos nos dispositivos eletroeletrônicos se mostram fortemente influenciados. Em consonância com estas metas, são considerados duas questões pontuais. Uma relacionada com a representação dos sistemas de aterramento através de eletrodos de terra, com destaque aos principais modelos propostos na literatura, contemplando a linearidade e a não linearidade dos fenômenos no entorno destes. A partir de uma base de informações derivada de ensaios experimentais, são realizadas investigações sobre o grau de aderência entre os modelos existentes e os desempenhos experimentais, culminando pela adoção da estratégia mais adequada aos fins aqui postos. Numa segunda vertente, são também considerados os fenômenos advindos das descargas atmosféricas indiretas, que podem ocasionar efeitos similares sobre os potenciais de terra. Para tanto é proposta uma metodologia, baseada no método das imagens, visando a inserção desta via alternativa capaz de provocar os danos reclamados. Com a inserção de novas potencialidades de uso para o APR, este *software* passa a contar com meios para estudos avaliativos dos efeitos dos aumentos dos potenciais de terra, nos termos aqui propostos. Fundamentado em situações práticas e representativas de casos reais, são realizados estudos de casos sobre desempenho da nova versão do aplicativo computacional.

Palavras chave: Modelagem Computacional, Qualidade da Energia Elétrica, Resposta de Sistemas de Aterramentos submetidos à Descargas Atmosféricas, Pedidos de Ressarcimento de Danos Elétricos, Método das Imagens.

ABSTRACT

This research is related with the development of improvements for supporting the consistency of the causal nexus between anomalous phenomena likely to occur in transmission and distribution networks and the occurrence of physical damage to consumer's equipment. The work is focused on the subject of direct and indirect lightning strikes and the corresponding increase on the earth potential that may cause abnormal dielectric and thermal stresses on consumer devices. In line with these goals, this thesis is dedicated to two specific challenges. The first is related to the representation of grounding systems through earth electrodes, highlighting the main models proposed in the literature, regarding the linearity and non-linearity of the phenomena surrounding these. Using experimental data as reference values, investigations are carried out in order to check out the adherence degree between the existing models and the practical values. This allows for adopting the most appropriate strategy to represent the given effect. In the other hand, the work takes into account the ground potential rise phenomenon due indirect lightning. In this context, a methodology is proposed based on the images method, aimed at including this alternative way capable of causing the claimed damages. With the inclusion of the mentioned new features, the reimbursement analysis *software* is now able of evaluating refunding claims involving ground potentials rise at the occurrence of direct and indirect lightning strikes. Based on practical situations representing real cases, computational studies are performed in order to illustrated the new *software* version herein obtained.

Keywords: Computational Modeling, Power Quality, Grounding Systems Response Due Lightning Strike, Reimbursement Request, Image Method.

Sumário

Capítulo 1

Considerações Iniciais

1.1 Aspectos gerais.....	18
1.2 Contextualização do tema	19
1.2.1 Síntese qualitativa e quantitativa sobre PIDs	19
1.2.2 Aspectos jurídicos	22
1.2.3 Pesquisas e produtos voltados para a análise do nexso causal.....	24
1.3 Estado da arte	26
1.3.1 Conceitos gerais associados com Qualidade da Energia Elétrica	27
1.3.2 Normas/recomendações nacionais sobre Qualidade da Energia Elétrica.....	27
1.3.3 Sensibilidade e suportabilidade de aparelhos elétricos	27
1.3.4 Modelagem computacional de redes de distribuição e de aparelhos elétricos	28
1.3.5 Sistemas de aterramentos e aumento de potencial de terra	29
1.3.6 Normas, documentos e trabalhos realizados na área de ressarcimento de danos.....	31
1.4 Contribuições desta tese	33
1.5 Estrutura da tese	34

Capítulo 2

Modelagem dos sistemas de aterramento

2.1 Considerações iniciais	36
2.2 Conceitos gerais associados com sistemas de aterramento	37
2.2.1 Dependência da frequência com os parâmetros do solo.....	38
2.2.2 Propagação e ionização no solo	39
2.3 Modelos de sistemas de aterramento.....	40
2.3.1 Modelos com parâmetros lineares.....	41
2.3.2 Modelos com parâmetros não-lineares.....	44
2.4 Análise crítica dos modelos de aterramento.....	74
2.5 Avaliação de desempenho dos modelos de sistemas de aterramento.....	74
2.5.1 Resultados experimentais	75
2.5.2 Resultados computacionais	78
2.5.3 Análise comparativa dos modelos.....	78
2.6 Considerações finais.....	86

Capítulo 3

Estratégia para a determinação da elevação do potencial de terra

3.1 Considerações iniciais	89
3.2 Fundamentação física	90
3.3 Aumento do potencial de terra	91
3.3.1 Formulação	92
3.3.2 Implementação Computacional do Método de Cálculo do Aumento do Potencial de Terra	94
3.4 Valores típicos de campo elétrico crítico do solo	96
3.5 Estudo Computacional de Aumento do Potencial de Terra	98
3.6 Considerações finais	100

Capítulo 4

Implementação do Fenômeno do Aumento do Potencial de Terra no APR

4.1 Considerações iniciais	102
4.2 Considerações gerais sobre o aplicativo APR	103
4.3 Implementação dos modelos de sistemas de aterramento no APR	105
4.3.1 Desenvolvimento do cartão	106
4.3.2 Interface para o usuário	108
4.4 Implementação do fenômeno do aumento do potencial de terra no APR	109
4.5 Considerações finais	110

Capítulo 5

Avaliação do desempenho do APR através de estudos de casos reais

5.1 Considerações iniciais	112
5.2 Caracterização dos estudos de casos	112
5.3 Implementação no Aplicativo APR e Estudos de Desempenho	114
5.3.1 Caso 1.1 – Modelo de aterramento linear – Descarga atmosférica	114
5.3.2 Caso 1.2 – Modelo de aterramento não-linear – Descarga atmosférica	117
5.3.3 Caso 2 – Aumento de potencial de terra	120
5.4 Considerações finais	123

Conclusões

6.1 Considerações Finais.....	125
-------------------------------	-----

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
---------------------------------	-----

Anexos

Anexo A	137
Modelos 1, 2 e 3 - Lineares	137
Modelo 4 - Empírico	138
Modelo 5 - Geometria Variável	139
Modelo 6 – Liew e Darveniza (não-linear)	140
Modelo 7 – Liew e Darveniza (não-linear)	142
Modelo 8 – IST	148
Modelo 9 – IST	150
Modelo 10 – Wang, Liew e Darveniza	155
Modelo 11 – Wang, Liew e Darveniza Modificado	158

Apêndices

Apêndice A.....	161
Modelo 12 - TLM	161
Modelo 13 – Modelo das Imagens – 1 Camada	166
Modelo 13 – Modelo das Imagens – 2 Camadas	169
Apêndice B.....	174
Análise Comparativa.....	174
Apêndice C.....	176
Aumento de potencial de terra – 1 camada	176
Aumento de potencial de terra – 2 camadas.....	180
Apêndice D.....	187
Interface e geração dos cartões	187

Lista de Figuras

Figura 1.1: Número de pedidos de indenização por danos elétricos – ano de 2015	20
Figura 1.2: Histórico de solicitações e procedência de pedidos de ressarcimento	20
Figura 1.3: Principais equipamentos reclamados – dados para uma distribuidora B	21
Figura 1.4: Custos totais ressarcidos por pedidos de indenização por danos	21
Figura 1.5: Principais fenômenos aos quais estão associados os pedidos de indenização	22
Figura 2.1: Componentes de corrente no eletrodo e no solo	37
Figura 2.2: Impedância de aterramento no domínio da frequência	38
Figura 2.3: Atenuação e distorção das ondas de tensão (V) e corrente (I) ao longo do eletrodo	39
Figura 2.4: Processo de ionização do solo	40
Figura 2.5: Modelo considerando a ionização do solo – Liew e Darveniza	46
Figura 2.6: Variação da resistividade do solo devido à densidade de corrente	48
Figura 2.7: Subdivisão das regiões do modelo de Wang, Liew e Darveniza	50
Figura 2.8: Perfil do coeficiente α em função da corrente	52
Figura 2.9: Subdivisão das regiões do Modelo Wang, Liew e Darveniza Modificado	53
Figura 2.10: Geometria e considerações para um eletrodo horizontal e vertical	55
Figura 2.11: Representação do eletrodo utilizando TLM	55
Figura 2.12: Tensões incidentes e refletidas para o nó 1	56
Figura 2.13: Potencial numa localização genérica P devido a uma fonte de corrente individual	61
Figura 2.14: Linhas de campo elétrico devido à uma fonte de corrente pontual e a presença do ar	62
Figura 2.15: Método das imagens aplicado em sistemas de aterramento	63
Figura 2.16: Eletrodo de aterramento vertical e sua respectiva representação geométrica	64
Figura 2.17: Correlação entre a incidência de uma descarga atmosférica num eletrodo e o desempenho do Modelo das Imagens	66
Figura 2.18: Espalhamento das correntes em meios de resistividade diferentes	69
Figura 2.19: Modelo das Imagens para uma fonte de corrente na primeira camada – solo heterogêneo	69
Figura 2.20: Fonte de corrente e ponto de cálculo desejado na primeira camada – Situação 1	70
Figura 2.21: Amplitude das fontes de corrente imagem para a situação 1	70
Figura 2.22: Amplitude das fontes de corrente imagem para a situação 2	71
Figura 2.23: Amplitude das fontes de corrente imagem para a situação 3	72
Figura 2.24: Amplitude das fontes de corrente imagem para a situação 4	72
Figura 2.25: Tensão, corrente e resistência – Experimento 1	76
Figura 2.26: Tensão, corrente e resistência – Experimento 2	76
Figura 2.27: Tensão, corrente e resistência – Experimento 3	77
Figura 2.28: Tensão, corrente e resistência – Experimento 4	77
Figura 2.29: Tensão, corrente e resistência – Experimento 5	78
Figura 2.30: Tensão no aterramento – Experimento 1 – Modelos 1, 2, 3 e 4	78
Figura 2.31: Corrente vs Resistência – Experimento 1 – Modelos 1, 2, 3 e 4	79
Figura 2.32: Tensão no aterramento – Experimento 2 – Modelos 1, 2, 3 e 4	79
Figura 2.33: Corrente vs Resistência – Experimento 2 – Modelos 1, 2, 3 e 4	79
Figura 2.34: Tensão no aterramento – Experimento 3 – Modelos 1, 2, 3 e 4	80
Figura 2.35: Corrente vs Resistência – Experimento 3 – Modelos 1, 2, 3 e 4	80
Figura 2.36: Tensão no aterramento – Experimento 4 – Modelos 1, 2, 3 e 4	80
Figura 2.37: Corrente vs Resistência – Experimento 4 – Modelos 1, 2, 3 e 4	81
Figura 2.38: Tensão no aterramento – Experimento 5 – Modelos 1, 2, 3 e 4	81
Figura 2.39: Corrente vs Resistência – Experimento 5 – Modelos 1, 2, 3 e 4	81
Figura 2.40: Tensão no aterramento – Experimento 1 – Modelos 5, 12 e 13	82
Figura 2.41: Corrente vs Resistência – Experimento 1 – Modelos 5, 12 e 13	82
Figura 2.42: Tensão no aterramento – Experimento 2 – Modelos 5, 12 e 13	83

Figura 2.43: Corrente vs Resistência – Experimento 2 – Modelos 5, 12 e 13	83
Figura 2.44: Tensão no aterramento – Experimento 3 – Modelos 5, 12 e 13	83
Figura 2.45: Corrente vs Resistência – Experimento 3 – Modelos 5, 12 e 13	84
Figura 2.46: Tensão no aterramento – Experimento 4 – Modelos 5, 12 e 13	84
Figura 2.47: Corrente vs Resistência – Experimento 4 – Modelos 5, 12 e 13	84
Figura 2.48: Tensão no aterramento – Experimento 5 – Modelos 5, 12 e 13	85
Figura 2.49: Corrente vs Resistência – Experimento 5 – Modelos 5, 12 e 13	85
Figura 3.1: Classificação das descargas atmosféricas, baseada no caminho a ser percorrido	90
Figura 3.2: Representação geométrica do aterramento para cálculo do aumento de potencial de terra	93
Figura 3.3: Algoritmo para cálculo do Aumento de Potencial de Terra	95
Figura 3.4: Algoritmo para cálculo do Aumento de Potencial de Terra para solo de 2 camadas	95
Figura 3.5: Localização física de alguns pontos de coleta de amostras de solo	96
Figura 3.6: Dimensões da cuba utilizada nos ensaios experimentais	96
Figura 3.7: Amostra de solo submetida ao ensaio de obtenção do campo elétrico crítico	97
Figura 3.8: Corrente impulsiva utilizada na simulação	98
Figura 3.9: Perfil do aumento de potencial de terra	99
Figura 3.10: Perfil do decaimento do potencial ao longo do eixo x	99
Figura 4.1: Nova estrutura do aplicativo APR	104
Figura 4.2: Interface gráfica do APR	105
Figura 4.3: Valores da resistência de aterramento em função da corrente incidente	107
Figura 4.4: Cartão base do APR/ATP	107
Figura 4.5: Interface gráfica na plataforma MATLAB	108
Figura 4.6: Fluxograma da interação entre MATLAB, APR e ATP - Modelo de Aterramento	108
Figura 4.7: Formato do arquivo com os valores de entrada da fonte de medição	109
Figura 4.8: Cartão relativo à fonte de medição	109
Figura 4.9: Fluxograma da interação entre MATLAB, APR e ATP - Aumento de Potencial de Terra	110
Figura 5.1: Posicionamento físico do consumidor reclamante e da subestação de onde deriva se alimentador	113
Figura 5.2: Sistema elétrico importado para o APR	114
Figura 5.3: Parametrização do distúrbio – Caso 1.1	115
Figura 5.4: Tensão no ponto de conexão do equipamento – Caso 1.1	115
Figura 5.5: Corrente no ponto de conexão do equipamento – Caso 1.1	116
Figura 5.6: Solicitação dielétrica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador – Caso 1.1	116
Figura 5.7: Solicitação térmica versus suportabilidade térmica do microcomputador – Caso 1.1	116
Figura 5.8: Entrada de dados do modelo não-linear – Caso 1.2	117
Figura 5.9: Variação da resistência com o tempo – Caso 1.2	118
Figura 5.10: Tensão no ponto de conexão do equipamento – Caso 1.2	118
Figura 5.11: Corrente no ponto de conexão do equipamento – Caso 1.2	118
Figura 5.12: Solicitação dielétrica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador – Caso 1.2	119
Figura 5.13: Solicitação térmica versus suportabilidade térmica do microcomputador – Caso 1.2	119
Figura 5.14: Entrada de dados da fonte de distúrbio – Caso 2	120
Figura 5.15: Tensão no ponto de conexão do equipamento – 1m – Caso 2	121
Figura 5.16: Corrente no ponto de conexão do equipamento – 1m – Caso 2	121
Figura 5.17: Solicitação dielétrica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador – 1m - Caso 2	121
Figura 5.18: Solicitação térmica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador – 1m - Caso 2	122
Figura 5.19: Solicitação dielétrica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador para diferentes distâncias - Caso 2	122

Figura 5.20: Solicitação térmica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador para diferentes distâncias - Caso 2	123
---	-----

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Dissertações de mestrado e teses de doutorado pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica – UFU no âmbito dos PIDs.....	24
Tabela 1.2: Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados entre empresas concessionárias de energia elétrica e UFU.....	25
Tabela 2.1: Constantes de correlação requeridas pelos modelos de aterramento	74
Tabela 2.2: Características do aterramento utilizado nos ensaios experimentais	75
Tabela 2.3: Quadro comparativo dos resultados computacionais (Modelo 13) e experimentais.....	86
Tabela 3.1: Resultados experimentais do campo elétrico crítico	97
Tabela 3.2: Valores experimentais do campo elétrico crítico fornecidos em [114].....	97

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
APR	Analizador de pedidos de ressarcimento
θ	Ângulo para cálculo de eletrodos em paralelo
A	Área da superfície lateral do eletrodo
$A_j(t)$	Área de espessura dr
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
E	Campo elétrico
E_c	Campo elétrico crítico
$E_j(t)$	Campo elétrico no instante t
$E_N(P_j)$	Campo elétrico normal ao Ponto P_j
C	Capacitância
C_d	Capacitância por unidade de comprimento
α	Coefficiente dependente da amplitude da corrente injetada
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais S.A
I_C	Componente imaginária da corrente longitudinal
I_L	Componente imaginária da corrente transversal
I_G	Componente real da corrente longitudinal
I_R	Componente real da corrente transversal
λ'	Comprimento de onda
l	Comprimento do eletrodo
Δx	Comprimento do segmento de linha
G	Condutância
G_d	Condutância por unidade de comprimento
σ	Condutividade
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
β_1'	Constante de atenuação
β_2'	Constante de fase
k	Constante de intensidade
γ	Constante de propagação
τ_2	Constante de tempo de desionização
τ_I	Constante de tempo de ionização
k	Contador auxiliar
P_i	Correlação entre as correntes pontuais I_i com a corrente total I
I	Corrente
I_c	Corrente crítica no solo
kI_f	Corrente da fonte
dI	Corrente elementar num ponto físico da haste
kI_n	Corrente sobre o nó n
I_{total}	Corrente total
J	Densidade de corrente
$J_j(t)$	Densidade de corrente no instante t
X_n	Direção normal à superfície lateral do aterramento
d	Distância entre a fonte de corrente e um ponto da superfície do condutor
r'	Distância entre a fonte de corrente I e o ponto J
x	Distância entre a fonte de corrente pontual e um ponto da superfície do condutor
r_j	Distância entre a j -ésima superfície equipotencial e o centro do eletrodo
d'_{ji}	Distância entre o ponto V_j a fonte de corrente imagem I'_i
d_{ji}	Distância entre o ponto V_j e a fonte de corrente I_i
D	Distância entre os eletrodos

D_{lk}	Distância entre os eletrodos k e l
d'	Distância entre um ponto e a fonte imagem de corrente
h	Espessura da primeira camada
dr	Espessura infinitesimal
I'_i	Fonte de corrente imagem
I_i	Fonte de corrente real
ω	Frequência angular
f_{max}	Frequência máxima do impulso injetado
GPR	<i>Ground Potential Rise</i>
Z	Impedância
Z_0	Impedância característica da linha
L	Indutância
L_d	Indutância por unidade de comprimento
ITIC	<i>Information Technology Industry Council</i>
t	Instante de tempo qualquer
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IST	Instituto Superior Técnico
IAC	<i>Interactive Activation and Competition</i>
td	Intervalo de tempo da desionização
t_i	Intervalo de tempo da ionização
l_{seg}	Máximo comprimento do segmento
D_g	Média geométrica das distâncias entre os eletrodos
MI	Método das Imagens
m	Número de eletrodos em paralelo
n	Número de fontes pontuais distribuídas ao longo do eletrodo
ONS	Operador Nacional do Sistema
λ	Parâmetro ascendente do solo
β_l	Parâmetro descendente do solo
β_3	Parâmetro para diferentes picos da corrente
Δt	Passo de tempo
PID	Pedido de indenização por danos
μ_0	Permeabilidade do vácuo
μ	Permeabilidade magnética
μ_r	Permeabilidade relativa do solo
ε	Permissividade
ε_0	Permissividade do vácuo
ε_r	Permissividade relativa do solo
i_p	Pico de corrente
V	Potencial elétrico
dV	Potencial incremental em um ponto da superfície do condutor
V_j	Potencial no espaço
V_{Pj}	Potencial no ponto P_j , oriundo das correntes I_i e suas respectivas imagens I'_i
V_{ji}	Potencial no Ponto V_j devido a fonte de corrente I_i e I'_i
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
Z_i	Profundidade da fonte de corrente I_i
h	Profundidade do eletrodo
Z_j	Profundidade do ponto V_j
$Z_{(j)}$	Profundidade do ponto J
r	Raio
r_{cm}	Raio da região ionizada
a	Raio do condutor – Modelo das Imagens
r_0	Raio do eletrodo

$r_i(t)$	Raio equivalente instantâneo
b	Região de desionização
c	Região de ionização
a	Região não ionizada
R	Resistência
R_0	Resistência do aterramento do solo não-ionizado
R_d	Resistência por unidade de comprimento
ρ	Resistividade
ρ_1	Resistividade da primeira camada de solo
ρ_2	Resistividade da segunda camada de solo
ρ_c	Resistividade do eletrodo
ρ_s	Resistividade do solo
ρ_0	Resistividade inicial do solo não-ionizado
ρ_i	Resistividade quando $J_j(t)$ for igual à J_c
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis
t_{kj}	Tempo do decrescimento a partir do valor máximo de corrente
U	Tensão
Vd_n^i	Tensão incidente pelo lado direito do nó n
Ve_n^i	Tensão incidente pelo lado esquerdo do nó n
Vd_n^r	Tensão refletida do lado direito do nó n
Ve_n^r	Tensão refletida pelo lado esquerdo do nó n
$_kV_n$	Tensão sobre o nó n
$_kV_n$	Tensão sobre o nó n
β_2	Termo auxiliar de cálculo
TLM	<i>Transmission Line Modeling</i>
α_s	Último valor de α da região ionizada
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
J_c	Valor crítico de densidade de corrente
α_p	Valor de α no pico da corrente
α_0	Valor inicial de α
$i(t)$	Valor instantâneo da corrente injetada
J_s	Valor limite de densidade de corrente
ρ_{kj}	Valor mínimo da resistividade em t_{kj}

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Aspectos gerais

Os desenvolvimentos tecnológicos e suas correlações com consumidores de energia elétrica, tanto os residenciais, comerciais e industriais, têm ocasionado a utilização, de forma crescente, dos mais diversos equipamentos eletroeletrônicos, os quais, se mostram, cada dia, mais eficazes e eficientes, facilitando e otimizando processos e a vida humana. Não obstante a isto, não se pode ignorar que, conjuntamente a esta evolução, também surge uma série de questões envolvendo a relação comercial entre os agentes envolvidos, a saber: consumidores, distribuidoras e a agência nacional responsável pela regulação e fiscalização da relação comercial em pauta. De um modo pontual, e em consonância com as metas do trabalho de pesquisa em foco, surge um tema de grande relevância atual, qual seja, a correspondência e adequação entre a qualidade da energia elétrica e os dispositivos conectados à rede [1].

De fato, a dinâmica operacional de um sistema elétrico, concebido para uma operação sob condições ideais, impõe distúrbios e fortes impactos sobre as características operacionais de equipamentos causados, dentre outros motivos, pelas atuações de dispositivos de proteção, entradas e saídas de cargas de grande porte, ocorrências de curto-circuitos, presença de cargas não-lineares, incidências de descargas atmosféricas, etc. [2]. Diante deste contexto, responsável por suprimentos elétricos frequentemente denominados por não-ideais, tais equipamentos podem apresentar um funcionamento inadequado e, em casos mais extremos, sofrer danos físicos que resultam na necessidade de reparos ou mesmo a total substituição dos mesmos [3]–[5].

Nestas circunstâncias, surge um tema de grande difusão e perspectiva de evolução no cenário da comercialização e responsabilidades jurídicas, conhecido por Ressarcimentos por Danos Elétricos ou, como comumente designado por Pedido de Indenização por Danos (PID). A área encontra sustentação nos fundamentos das leis que norteiam os direitos e deveres entre um supridor e um consumidor, conforme previsto na Constituição Federal e no Código de Direito do Consumidor.

Apoiado nestas premissas há de se considerar, de um lado, os consumidores, os quais são cientes de seus direitos por prejuízos físicos e operacionais causados por distúrbios supostamente advindos da rede de suprimento e, por outro lado, a concessionária de energia, que busca correlacionar de uma maneira técnica e coerente as solicitações de ressarcimento devido a eventos ocorridos em sua rede de distribuição.

Com o intuito de intermediar tal situação, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) possui orientações que norteiam a solução de tais conflitos, porém os métodos por ela sugeridos não encontram, via de regra, sustentação em princípios técnicos ou científicos, o que ocasiona em insatisfações quanto aos pareceres finais [6], [7]. De acordo com estas orientações, a não ser que haja prova em contrário, basta a existência de um fenômeno anômalo da rede e simultaneidade com o dano reclamado, para que o pedido seja considerado procedente. Todavia, a real avaliação do que se denomina por nexo causal, de fato, fica extremamente fragilizada diante do processo em prática.

Ainda, um fato que contribui para o agravamento da situação é a falta de registros de grandezas elétricas associadas com a maioria das ocorrências por parte da concessionária, e tampouco, processos sistematizados para correlação dessas ocorrências com os padrões de suportabilidade dos equipamentos.

Isto posto e diante do crescente número de pedidos de ressarcimento por danos elétricos, ficam evidenciados os motivadores para a busca por mecanismos fundamentados na ciência e tecnologia que permitam balizar, de forma imparcial, os interesses individuais.

1.2 Contextualização do tema

De forma a oferecer meios para a caracterização do estado da arte sobre a área de pesquisa aqui tratada, apresenta-se, a seguir, uma descrição sumária dos principais aspectos associados com o assunto.

1.2.1 Síntese qualitativa e quantitativa sobre PIDs

A Figura 1.1 expressa aspectos quantitativos sobre o número de solicitações encaminhadas para análise pelas mais diversas concessionárias distribuidoras do país. Os números são considerados parciais e representam a situação vivenciada ao longo do ano de 2015 para cerca de 30% das empresas nacionais. Vale observar que a síntese apresentada compreende 20 empresas distribuidoras, enquanto o Brasil possui 63 concessionárias atreladas com a distribuição da energia elétrica. As demais, por apresentarem valores inferiores ao mínimo indicado, foram omitidas nesta apresentação. No total, constata-se que o número de solicitações chega a cerca de 287.550 reclamações de pedidos de ressarcimento, das quais, aproximadamente, 26% foram julgados procedentes e 74% improcedentes.

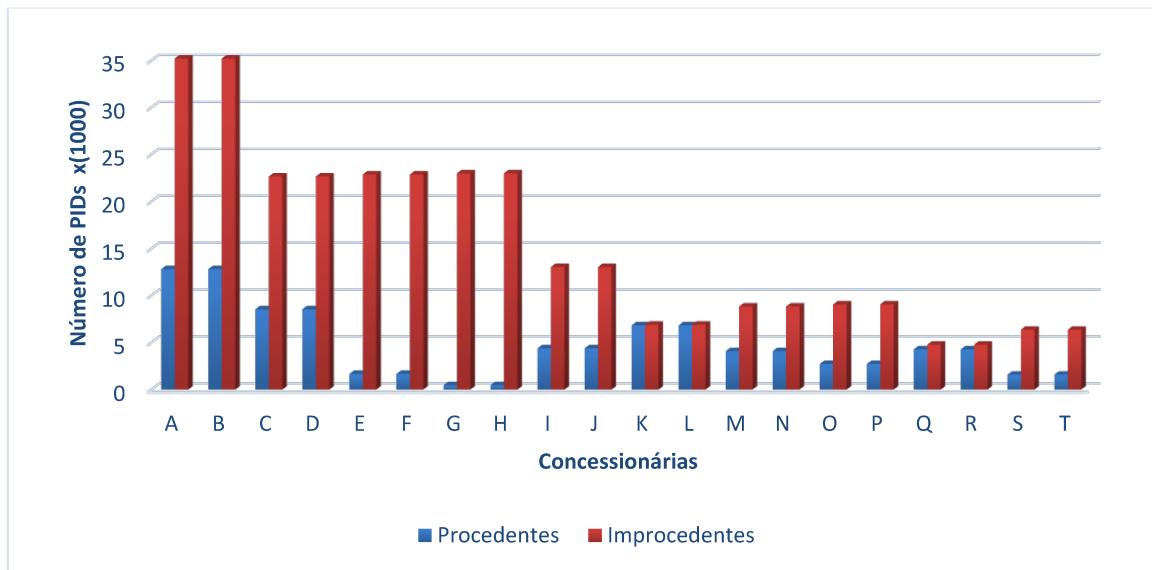


Figura 1.1: Número de pedidos de indenização por danos elétricos – ano de 2015

Neste mesmo contexto, pode-se constatar ainda, através de números da ouvidoria da ANEEL [8], a ocorrência de um significativo aumento dos recursos encaminhados a esta Agência. Estes números compreendem as situações para as quais não houve acordo entre a distribuidora e o consumidor. Estes indicativos revelam, ainda, que o número de pedidos improcedentes, de acordo com os procedimentos internos das empresas, tem aumentado consideravelmente, fato este que evidencia um acréscimo do número de conflitos entre as partes. Neste cenário vale ressaltar que para as reclamações feitas junto a ouvidoria da ANEEL para o ano de 2015 indicaram que apenas 25,54% do total de reivindicações foram consideradas pertinentes por este órgão regulador.

Ainda complementando as informações de caráter informativo, a Figura 1.2 mostra a situação experimentada por uma distribuidora nacional, aqui identificada por empresa A, ao longo do período compreendido entre 2010 e 2015.

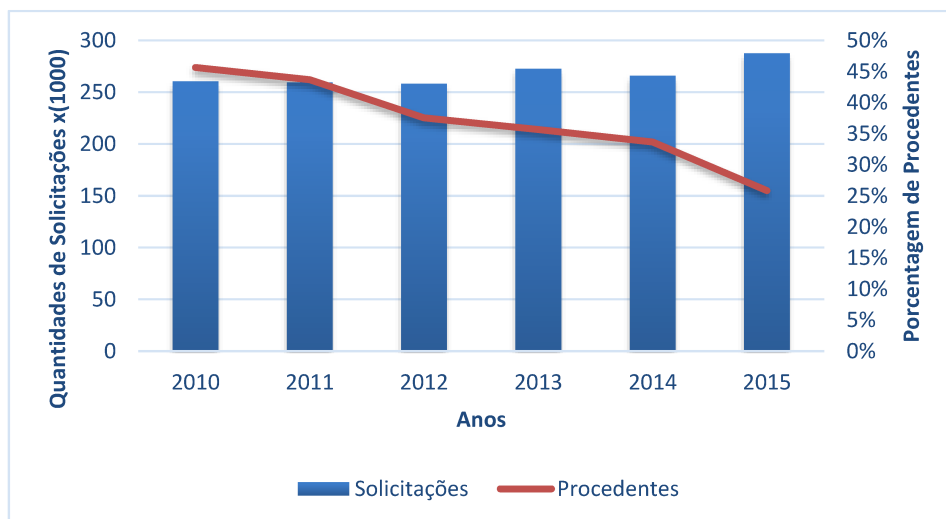


Figura 1.2: Histórico de solicitações e procedência de pedidos de ressarcimento

A Figura 1.3, por outro lado, é indicativa dos principais equipamentos contemplados nos processos de indenização para outra empresa distribuidora de grande porte, a qual é aqui identificada por B. A diversidade de produtos fica evidenciada e, ainda, que a maioria dos pedidos envolve eletrodomésticos de custo mais elevado, fato este que, em atenção aos números financeiros, conduz a um custo médio estimado de R\$300,00 por produto indenizado.

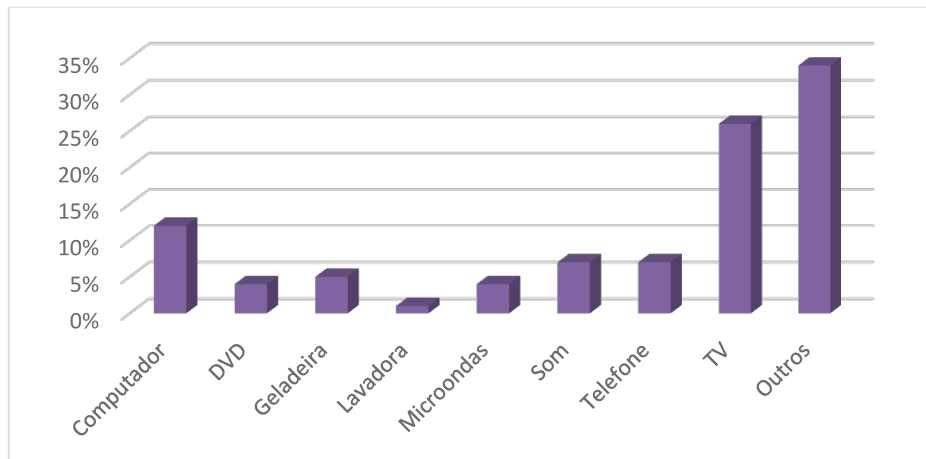


Figura 1.3: Principais equipamentos reclamados – dados para uma distribuidora B.

Diante do número de solicitações e dos custos associados com o reparo ou substituição dos equipamentos cujos pedidos foram julgados procedentes, mais uma vez, objetivando consubstanciar o assunto contemplado nesta tese, a Figura 1.4 apresenta os valores totais dos ressarcimentos feitos pela empresa A, ao longo dos últimos anos. Novamente, fica evidenciado que os valores financeiros são significativos e a taxa de crescimento das solicitações de indenização se apresenta evidente. Estes argumentos, somados às ponderações anteriores, refletem, de forma clara e inequívoca, a relevância do tema e a importância da busca por mecanismos legais e técnicos para a solução dos problemas de conflitos entre as partes.

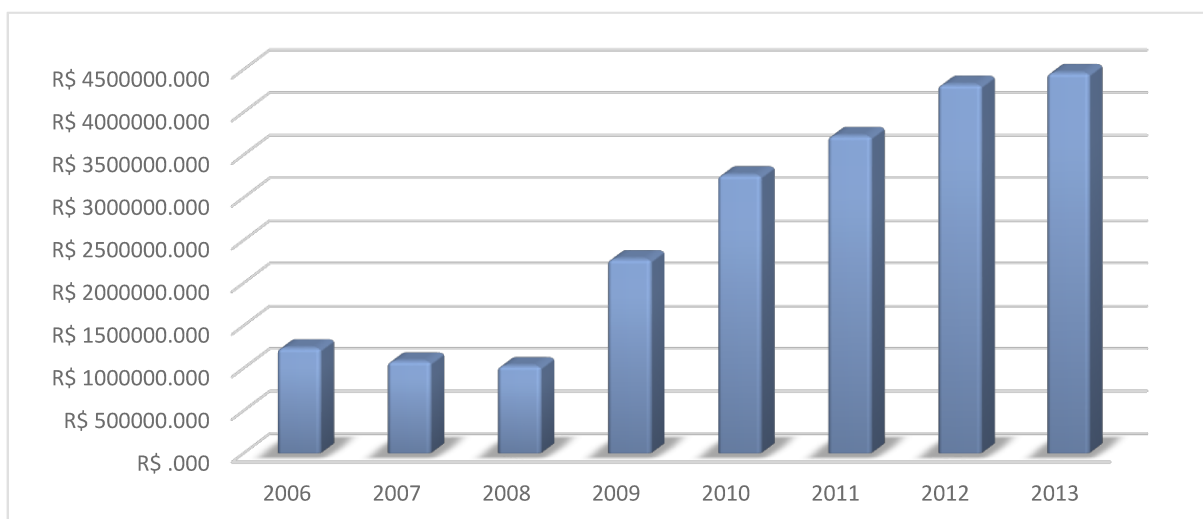


Figura 1.4: Custos totais ressarcidos por pedidos de indenização por danos

Ainda visando oferecer um panorama amplo sobre a questão em foco, a Figura 1.5 mostra a origem dos supostos fenômenos aos quais estariam vinculados, em sua maioria, os pedidos de indenização. Como pode ser visto, as descargas atmosféricas e os religamentos automáticos constam como as principais causas das reclamações direcionadas às distribuidoras de energia elétrica. Não obstante a isto, a correlação entre tais distúrbios e os danos a eles atribuídos, certamente, constitui-se ainda em motivos para discussões e avaliações mais criteriosas, não bastando a existência para uma justa correlação entre causas e efeitos. Isso tem provocado um conjunto de ações de ordem regulamentadora, métodos de análise, processos e outros aspectos diretamente afetos ao assunto [9].

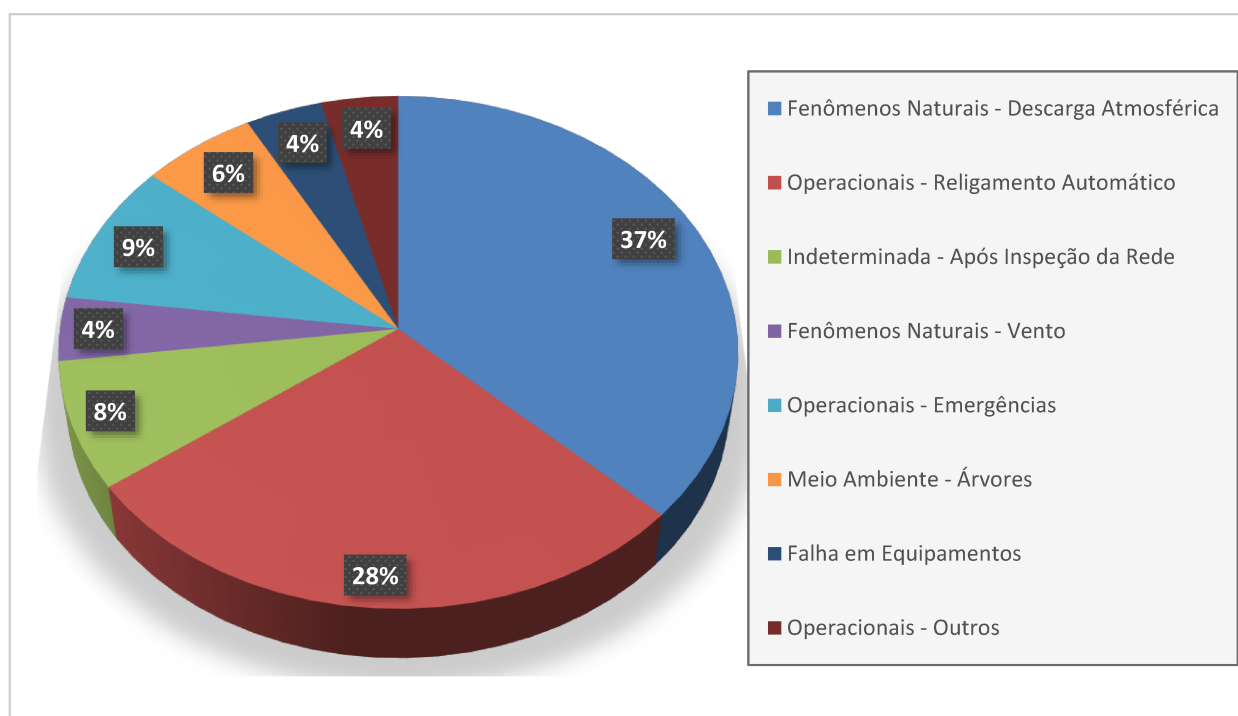


Figura 1.5: Principais fenômenos aos quais estão associados os pedidos de indenização

1.2.2 Aspectos jurídicos

Juridicamente, a energia elétrica é considerada um bem ou um produto essencial e, consoante com o disposto em Lei nº 8987/1995, esta deve ser oferecida de maneira adequada e com qualidade. Partindo-se desse pressuposto e, considerando o previsto pela legislação vigente, sobretudo a Constituição Federal, não restam dúvidas que as pessoas jurídicas de direito privado prestadoras de serviços públicos, dentre as quais se encontram inseridas as concessionárias de energia elétrica, responderão pelos danos a outrem ocasionados. Assim sendo, emerge o fato que as empresas privadas, quando lhes é atribuído o dever de executar os serviços de interesse público, seja através de concessão, permissão ou autorização, respondem pelos danos causados pela falha ou defeito na prestação de seus serviços.

À luz destes argumentos, surge um dos papéis da ANEEL, direcionado para a mitigação dos problemas existentes entre as concessionárias de energia elétrica e seus usuários. Com efeito, além da missão regulatória e fiscalizatória atribuída por lei a ANEEL, possui este órgão a competência de expedir os atos necessários ao cumprimento das normas estabelecidas pela legislação em vigor. Dessa maneira, na resolução de conflitos existentes entre usuários do serviço público de energia elétrica e as concessionárias de energia elétrica, merece observância o disposto pelas Resoluções normativas editadas pela ANEEL, as quais devem estar em perfeita harmonia com o disposto no Código de Defesa do Consumidor e, sobretudo, em consonância com o que dispõe a Constituição Federal, que se sobrepõe a toda e qualquer legislação, tendo em vista a hierarquia de normas existentes no ordenamento jurídico pátrio.

À luz destas diretrizes, não obstante seja dispensável a comprovação da culpa, para que se concretize o dever das concessionárias de energia elétrica de indenizar os danos elétricos ocasionados aos consumidores, faz-se imprescindível a constatação de alguns pressupostos, quais sejam: o dano efetivamente ocasionado ao consumidor; o ato ilícito, consistente na ação ou omissão por parte do agente causador do dano que violam direitos causando danos a outrem e o nexo causal entre a conduta por parte daquele que ocasiona danos a outrem e o dano experimentado.

Faz-se importante ponderar, dessa maneira, que em algumas situações a Administração Pública e as prestadoras de serviços públicos poderão ter por excluída a obrigação de indenizar, ainda que se constate danos a outrem ocasionados, nos casos em que se vislumbre alguma excludente de responsabilidade civil.

Assim sendo, naquelas situações em que se vislumbre a ausência do nexo causal entre o dano ocasionado ao consumidor e eventual falha ou deficiência na prestação de serviços pela concessionária de energia elétrica, não há que se falar em dever de indenizar por parte desta.

Ao final, importa destacar que muito embora a legislação vigente ampare o direito do consumidor em se ver ressarcido por eventuais danos elétricos ocasionados por falha ou defeito na prestação do serviço público de energia elétrica, fazem-se incontestáveis as dificuldades enfrentadas pelos consumidores na obtenção da reparação devida. Por outro lado, o total desconhecimento por parte dos consumidores das situações em que de fato estar-se-ia diante de alguma excludente de responsabilidade da concessionária de energia elétrica, não havendo, pois, qualquer obrigação desta última em proceder às indenizações pleiteadas, leva a crer que se faz premente a uniformização dos procedimentos adotados na análise dos pedidos de indenização por danos elétricos.

Desta forma, uma padronização através de mecanismos ou *softwares* alicerçados em critérios técnicos e científicos da engenharia, capazes de aferir com maior precisão se de fato houve correlação entre a perturbação no sistema elétrico e o dano ocasionado ao consumidor, uma vez que somente em

se constatando o nexa causal entre a falha na prestação do serviço público de energia elétrica e o dano alardeado é que se poderia cogitar na indenização correspondente [10].

1.2.3 Pesquisas e produtos voltados para a análise do nexa causal

No âmbito dos trabalhos realizados pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no que diz respeito a mecanismos balizadores para emissão de pareceres envolvendo pedidos de ressarcimento por danos elétricos, a Tabela 1.1 resume todas as dissertações de mestrado e teses de doutorado defendidas sobre o assunto em pauta.

Tabela 1.1: Dissertações de mestrado e teses de doutorado pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica – UFU no âmbito dos PIDs.

AUTOR	TIPO DE TRABALHO	ANO	TÍTULO DO TRABALHO
Paulo Henrique de Oliveira Rezende	Qualificação de Doutorado	2016	Contribuições para os Estudos Computacionais de Ressarcimento por Danos Elétricos: Limites de Suportabilidade e Induções Eletromagnéticas
Paulo Henrique de Oliveira Rezende	Dissertação de Mestrado	2012	Uma proposta de modelagem de condicionadores de ar split visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos.
Isaque Nogueira Gondim	Tese de Doutorado	2012	Contribuição para o aplicativo APR: Novos limites de Suportabilidades, perturbações via medições e sistematização no processo da configuração da rede.
Jomil Marques Borges	Dissertação de Mestrado	2012	Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise de Ressarcimento de Aparelhos de Som Associados aos Distúrbios na Rede Elétrica da CEMIG Testando Dispositivos Mitigadores.
Claudinei Jeremias de Ávila	Dissertação de Mestrado	2012	Curvas de Suportabilidade Dielétrica e Térmica para Televisores Integrados ao APR e ao Banco de Dados da CEMIG Distribuição SA.
José Nelson Quadrado Júnior	Dissertação de Mestrado	2012	Estudos Avaliativos de Desempenho do Aplicativo APR Através de Caso Reais de Consumidores da Região Metropolitana de Cuiabá.
Edécio Antônio Martins	Dissertação de Mestrado	2012	Elaboração de Curvas de Suportabilidade para Microcomputadores e Estudos de Desempenhos de Dispositivos Mitigadores para Subsidiar os PIDs.
Fernando Gadenz	Dissertação de Mestrado	2010	Uma Proposta para a Inserção do Tempo de Uso dos Equipamentos no Aplicativo APR e Estudos Avaliativos de Casos Reais de PIDs.
Orlando Adolfo da Silva	Dissertação de Mestrado	2010	Metodologia para subsidiar a análise de Solicitações de ressarcimento com dispositivos de proteção contra surtos.
Marcus Vinícius Borges Mendonça	Tese de Doutorado	2010	Contribuições ao Processo Computacional para Análise de Pedidos de Indenização por Danos em Equipamentos Elétricos.

Ivandro Antonio Bacca	Dissertação de Mestrado	2008	Modelagem para Análise de Desempenho de Eletrodomésticos à Força-Motriz Diante de Distúrbios de Qualidade da Energia.
Carlos Eduardo Tavares	Tese de Doutorado	2008	Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento a Consumidores.
Rodrigo Antônio Peniche	Dissertação de Mestrado	2004	Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia - Enfoque: Aparelhos de DVD, Fax e Telefone sem fio.
Carlos Eduardo Tavares	Dissertação de Mestrado	2004	Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia - Enfoque: Televisores, VCR's e Som.
Mateus Duarte Teixeira	Dissertação de Mestrado	2003	Uma Estrutura Laboratorial para Testes de Desempenho de Equipamentos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ricardo Nogueira Magalhães	Dissertação de Mestrado	2003	Controlador Lógico Programável no Contexto da Qualidade da Energia.
Bismarck Castilho Carvalho	Dissertação de Mestrado	2003	Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ana Carolina Azevedo	Dissertação de Mestrado	2003	Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ana Cláudia Daroz dos Santos	Dissertação de Mestrado	2001	Desempenho de Fontes Lineares e Chaveadas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.

Como demonstrado, a linha de pesquisas na qual se insere a presente tese já se apresenta com um lastro significativo de contribuições, também materializadas na forma de inúmeros artigos em congressos nacionais e internacionais, periódicos e outros meios de divulgação.

Visando ainda consubstanciar a relevância do assunto, relacionam-se, a seguir, projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados pelo Grupo de Qualidade da Energia Elétrica em conjunto com empresas distribuidoras que compõem o setor elétrico nacional.

Tabela 1.2: Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados entre empresas concessionárias de energia elétrica e UFU

PROJETOS	DESCRIÇÃO
CELG-UFU 2014-2016	Este projeto contempla um aprimoramento do produto desenvolvido até o seu início e tem por foco a melhoria de várias questões para a estrutura composta de hardware e <i>software</i> até então obtidas. Dentre os principais aspectos explorados ressaltam-se os seguintes pontos: redução das dimensões físicas da sonda e respectivo peso, tipo de transmissão de dados, suportabilidade ambiental e seu aspecto físico, redução de custos, etc.
CELG-UFU 2008-2010	Fundamentalmente, através da definição de uma estrutura de hardware e <i>software</i> , tal projeto contemplou a formação de bancos de dados sobre ocorrências reais nas redes de distribuição, os quais poderão ser utilizados como entrada de informações para o APR-2.0.

CEMIG-UFU 2008-2010	Esta pesquisa visou, sobretudo, a determinação de curvas reais que expressem os níveis de suportabilidade de distintos equipamentos eletroeletrônicos, possibilitando, assim, melhorias significativas para o processo de análise e parecer emitido pelo APR-2.0.
LIGHT-UFU 2006-2009	Este projeto ofereceu expressivos avanços em relação ao produto anterior. Dentre as principais inovações destacam-se: novos equipamentos foram inseridos, foi proposta uma estratégia para a inclusão do tempo de uso dos produtos, foram considerados modelos mais complexos para os cabos elétricos, os equipamentos fundamentados no princípio da força motriz foram aprimorados, e outros aspectos visando situações particulares para as redes de distribuição da empresa contratante. Ao final das atividades foi produzido um <i>software</i> que recebeu a designação: APR-2.0, ou seja, uma segunda versão do produto anteriormente destacado.
CEB-UFU 2005-2007	Produziu um <i>software</i> que reproduz efeitos associados com os indicadores de conformidade dos suprimentos e, conjuntamente com outro grupo de equipamentos devidamente simulados, permite correlacionar as intensidades dos fenômenos com as curvas de suportabilidade dielétrica e térmica dos produtos investigados. Neste projeto a rede elétrica até o consumidor é modelada manualmente, são contemplados alguns equipamentos definidos pela empresa e avança no sentido de se utilizar o ATP como plataforma para os cálculos. Este trabalho resultou numa primeira versão do aplicativo, o qual foi designado por APR-1.0, ou seja, Analisador de Pedidos de Ressarcimento - versão 01.
LIGHT-UFU 2002-2004	Possibilitou a geração de modelos computacionais para distintos aparelhos eletroeletrônicos, os quais permitem a reprodução, via <i>software</i> , do desempenho dielétrico e térmico dos mesmos, sob a ação dos mais distintos tipos de distúrbios passíveis de manifestação numa rede de distribuição. Nesta fase das atividades foi utilizado um simulador que não o ATP.

Maiores informações e detalhamentos sobre os objetivos alcançados com os trabalhos ressaltados podem ser obtidos diretamente através de uma consulta aos mesmos. Entretanto, é importante destacar que, como resultado deste volume de pesquisas, a UFU produziu um *software* destinado ao processo de análise da consistência entre causas e efeitos, destinado à avaliação dos processos de indenização e a oferecer pareceres conclusivos sobre a existência ou não do pressuposto nexo causal. Este programa foi denominado por Analisador de Pedidos de Ressarcimento (APR) e esta ferramenta constitui-se a base e o objetivo principal da presente tese.

1.3 Estado da arte

Após pesquisas e estudos da bibliografia atual encontrada pelos meios tradicionais de acesso, obteve-se um conjunto de informações sobre os mais distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no âmbito da área de análise de pedidos de ressarcimento.

De um modo geral, os documentos obtidos podem ser agrupados nos seguintes tópicos:

1.3.1 Conceitos gerais associados com Qualidade da Energia Elétrica

Nas referências [1], [2], [11] e [12] podem ser encontrados conceitos, definições e uma extensa descrição dos distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica. Complementarmente, a referência [13] apresenta formas para categorizar problemas relativos à qualidade de energia. Tendo em vista que as questões associadas com o tópico aqui discutido são de ampla difusão no meio acadêmico e outros, considera-se dispensável tecer maiores comentários sobre o assunto neste trabalho.

1.3.2 Normas/recomendações nacionais sobre Qualidade da Energia Elétrica

A referência [14], em seu módulo 8, tem por objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia em sistemas de distribuição de energia elétrica. Define os conceitos e os parâmetros envolvidos dando mecanismos que possibilitem à ANEEL estabelecer valores-limite para os indicadores de Qualidade da Energia Elétrica. Os Procedimentos de Rede do ONS [15], por sua vez, considera os padrões de qualidade recomendados para a rede básica do sistema elétrico nacional. Novamente, devido à reconhecida disseminação desses documentos, entende-se ser desnecessária uma maior discussão. Muito embora a questão ainda se apresente de forma embrionária, vale ressaltar que os Procedimentos da Distribuição da ANEEL, em seu Módulo 9, contempla, de forma pontual, o tema central focado nesta tese, qual seja, os assuntos correlacionados com as diretrizes desde a entrada de um pedido até a emissão de um parecer final por parte da distribuidora de energia [16].

1.3.3 Sensibilidade e suportabilidade de aparelhos elétricos

Os trabalhos de pesquisa realizados por diversas instituições nacionais e internacionais a respeito da sensibilidade e suportabilidade de aparelhos elétricos, quando submetidos a suprimento de energia contendo distúrbios de naturezas diversas, objetivam um melhor entendimento dos limites toleráveis por equipamentos eletroeletrônicos e outros. Enquanto alguns desses estudos visam quantificar os níveis de sensibilidade e suportabilidade admissíveis pelos produtos [17]–[26], outros direcionam suas investigações de modo a observar as interdependências de modo mais qualitativo [27]–[33]. Não obstante os trabalhos encontrados sobre o assunto, ressalta-se que são poucos aqueles que, efetivamente, produzem resultados finais conclusivos na forma de curvas representativas de tais níveis, as quais, certamente, consistiriam em fundamentos sólidos para os estudos em foco.

Em [34] pode-se encontrar uma síntese das principais publicações pertinentes ao assunto. Dos trabalhos indicados destaca-se a relevância da referência [4], a qual apresenta resultados de estudos experimentais envolvendo uma boa gama de produtos eletroeletrônicos, a exemplo de: televisores, aparelhos de som e DVD e microcomputadores. Todos eles submetidos a transitórios impulsivos e

sobretensões à frequência industrial. Uma outra contribuição importante corresponde a publicação [5], contendo curvas de sensibilidade e suportabilidade para cada um dos seguintes equipamentos: televisores, rádio relógios, DVD players, refrigeradores e microcomputadores. A tônica desta referência está no desempenho dos equipamentos diante de interrupções, afundamentos de tensão e transitórios impulsivos. O documento [17] mostra a curva ITIC (*Information Technology Industry Council*), a qual descreve um envelope compreendendo níveis toleráveis de tensão de suprimento recomendados, na fase de projeto, para a maioria dos equipamentos eletroeletrônicos de tecnologia da informação. Em [3] são apresentados os resultados de testes de aparelhos de videocassete no que tange à suportabilidade destes equipamentos quanto da incidência de sobretensões transitórias.

Além das publicações anteriores, retratando resultados e desempenhos experimentais sob a ação de distúrbios diversos, destacam-se ainda os documentos balizadores sobre os procedimentos de testes visando avaliar os níveis de suportabilidade dos equipamentos. Neste particular, reconhece-se, em especial, aqueles identificados nas referências [35], [36]. Tais documentos apresentam orientações para a aplicação de sobretensões impulsivas, afundamentos e interrupções quando da análise operacional de equipamentos.

Do exposto segue que, apesar dos avanços relatados, o assunto oferece ainda desafios merecedores de maiores investigações, a exemplo de trabalhos direcionados ao estabelecimento de diretrizes conclusivas sobre a correlação entre distúrbios e níveis de suportabilidade de equipamentos.

1.3.4 Modelagem computacional de redes de distribuição e de aparelhos elétricos

No que tange aos sistemas elétricos e sua modelagem no domínio do tempo, a referência [37] trata especificamente das características dos recursos computacionais disponibilizados pelo simulador ATP (*Alternative Transients Program*). Tendo em vista que este ponto constitui-se num dos alicerces desta tese, é importante observar que inúmeros trabalhos foram publicados e que contemplam o emprego desta ferramenta para os fins aqui almejados.

Informações sobre a questão da modelagem dos diversos equipamentos que compõem os seguimentos de consumo industrial, comercial e residencial e respectivas implementações em ambientes computacionais podem ser encontradas em [21], [38], [23], [24], [34], [39]. Essas e outras referências estabelecem as diretrizes utilizadas, propõem estratégias para representações de vários dispositivos e validam as propostas através da comparação entre seus desempenhos teóricos diante dos resultados experimentais. Tendo em vista as particularidades atreladas com os estudos investigativos para cada um dos produtos focados neste contexto, considera-se relevante ressaltar que os modelos disponibilizados e já implementados na base ATP se mostram compatíveis às exigências impostas por estudos de regime permanente e sob condições de suprimento adversas.

Nestes termos pode-se considerar que a plataforma destinada à modelagem da rede elétrica e respectivos distúrbios (ATP e programas correlatos ou aplicativos advindos deste), assim como também os modelos dos equipamentos eletroeletrônicos objetos dos mais distintos pedidos de indenização, para o momento, se mostram apropriados aos objetivos aqui delineados.

1.3.5 Sistemas de aterramentos e aumento de potencial de terra

Não obstante os avanços atingidos e descritos nas referências [34] e [40], as quais culminaram num aplicativo computacional direcionado a oferecer meios para uma análise e parecer sobre pedidos de ressarcimento, observa-se que este se apresenta, na sua forma original, com algumas limitações. Uma delas está associada com a questão dos aterramentos dos diversos equipamentos que perfazem o universo de dispositivos passíveis de investigações no mencionado programa. O ponto fundamental está vinculado com o fato que os pontos de aterramento dos dispositivos eletroeletrônicos, assim como também um eventual neutro e para-raios da rede de distribuição, desconsideraram as características distintas dos diversos tipos de solos.

Diante desta conjuntura, objetivando disponibilizar modelos físicos que contemplem investigações computacionais envolvendo fenômenos de origem atmosférica ou outra natureza, tornam-se relevantes preocupações com a representação das conexões ao sistema de aterramento, assim como também a inclusão deste último de forma apropriada aos fins aqui almejados.

Dentro deste cenário, as referências [40]–[42] destacam a consideração do fenômeno da ionização do solo para estudos com descargas atmosféricas; [43] propõe um modelo de sistema de aterramento em haste em que a resistividade do solo é considerada variável, de modo a representar a ionização do solo; [44]–[47] avaliam a resposta do sistema de aterramento devido à correntes impulsivas e seu respectivo efeito; [48], [49] analisam o desempenho de diferentes estratégias de modelagem do sistema de aterramento e realizam análises comparativas; [50] realiza experimentos visando a obtenção do comportamento de sistemas de aterramento percorridos por correntes impulsivas; [51], [52] destacam resultados de desempenho de modelos de sistemas de aterramento sob a ação de transitórios impulsivos, ressaltando as não-linearidades impostas ao circuito elétrico representativo deste componente da rede elétrica.

Em [50] são realizados trabalhos direcionados a um estudo teórico-experimental de sistemas de aterramento quando solicitados por correntes impulsivas. Desta maneira, o autor apresenta uma modelagem, usando um bipolo elétrico equivalente, para representar tanto o comportamento dinâmico quanto estático de um sistema de aterramento em simulações computacionais no programa SPICE – *Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis*. Ainda nesta linha, as referências [53]–[60] abordam também medições e validações de modelos de aterramentos.

A referência [47] trata de um modelo não-linear para os sistemas de aterramento e destaca a dependência do tempo de ocorrência do pico de corrente com o aumento da tensão imposta. Assim, o estudo mostra que, à medida que a tensão aplicada ao modelo é incrementada, o intervalo de tempo gasto para a corrente atingir o seu maior valor é reduzido.

Em [43] e [61], os autores propõem modelos não-lineares de sistemas de aterramento a partir de considerações feitas sobre as regiões ao redor do eletrodo quando a rigidez dielétrica do solo não resiste a um dado transitório impulsivo. Os cálculos relativos aos modelos são confrontados com resultados experimentais, apresentando uma boa correlação entre a representação computacional e os ensaios realizados.

A publicação [62] compara diferentes modelos representativos de eletrodos de terra e avalia o comportamento dos mesmos quando percorridos por impulsos elétricos. Os modelos empregados nas simulações, conduzidas no programa ATP, são caracterizados tanto por implementações computacionais levando em consideração configurações simplificadas com a representação por parâmetros concentrados e lineares, quanto disposições mais complexas como parâmetros distribuídos e não-lineares.

Em [63] e [64], os autores consideram situações críticas e funcionamentos inadequados de equipamentos eletrônicos relacionados com interferências nestes dispositivos advindas de correntes fluindo através de instalações de aterramento. No que tange o aumento de potencial de terra, as referências [64]–[66] avaliam a proteção de equipamentos eletrônicos devido ao referido efeito; [67] realiza estudos para a predição do aumento de potencial de terra em sistemas de potência; [68]–[70] propõem uma estratégia de modelagem visando a proteção de dispositivos de telecomunicação; [71] destaca, na forma de um guia, os métodos de proteção de descargas atmosféricas em equipamentos conectados à rede elétrica; as referências [72]–[74] avaliam a influência do aumento de potencial de terra nas vizinhanças de sistemas elétricos; [75]–[77] estudam o impacto e propagação de descargas atmosféricas em residências, advindas de diferentes pontos de impacto; ainda, as referências [78] e [79] tratam do aumento de potencial de terra e o respectivo impacto em circuitos de baixa tensão.

As referências [80] e [81], por sua vez, estão relacionadas com estudos laboratoriais de sistemas de aterramento. Tais pesquisas visam obter parâmetros de resistividade de solos úmidos à base de areia e argila misturados com quantidades controladas de cloreto de sódio e também, contribuem na caracterização das propriedades elétricas associadas à ionização de solos secos. Ainda neste cenário, ressalta-se que em [82] são descritos procedimentos utilizados em medições de campo envolvendo malhas de terra de subestações energizadas.

1.3.6 Normas, documentos e trabalhos realizados na área de ressarcimento de danos

A referência [83] constitui-se uma resolução normativa vigente sobre o tema enfocado e estabelece, conforme mencionado anteriormente, as disposições relativas ao ressarcimento de danos em equipamentos instalados em unidades consumidoras, causados por perturbação ocorrida no sistema supridor de energia elétrica. De acordo com este documento, os consumidores que tenham tido aparelhos danificados devem procurar a distribuidora em até 90 dias para solicitar ressarcimento. No que tange a distribuidora de energia, o prazo para ressarcir o consumidor será de 45 dias. Dentro desse prazo, a concessionária tem até 10 dias para vistoriar o equipamento, até 15 dias, após a inspeção, para comunicar o resultado do pedido ao consumidor e mais 20 dias para efetuar o ressarcimento em dinheiro, conserto ou substituição do equipamento, se for o caso. Para eletrodomésticos usados na conservação de alimentos perecíveis, como geladeiras e freezers, a vistoria deve ocorrer em até um dia útil.

Complementarmente, em [84] são propostos critérios e procedimentos para padronizar a análise das responsabilidades pelos danos materiais, reclamados por terceiros, naqueles casos em que a concessionária possui a devida responsabilidade. Somado a tais embasamentos, a referência [85] foca especificamente a correlação do tema ressarcimentos com efeitos atrelados com descargas atmosféricas e manobras. Esta última ainda mostra aos agentes do setor elétrico, de forma explícita, os procedimentos da ANEEL e das Agências Estaduais Conveniadas em relação ao tema, de modo a prevenir conflitos com consumidores.

O trabalho [7] analisa o agravamento das relações entre consumidores e concessionárias a respeito dos pedidos de ressarcimento por danos em aparelhos elétricos provocados por distúrbios da rede elétrica. Esta referência também aponta para o fato que as agências de regulação observam um número crescente de conflitos entre as partes, e que, atualmente, não há meios eficientes para resolver tais contendas. Para minimizar parte dos problemas, esta referência propõe ações envolvendo concessionárias e sociedade para a proteção do sistema, equilibrando responsabilidades pela instalação de dispositivos protetores para diminuir a solicitação de danos causados por transitórios na tensão de alimentação.

Em [86] são feitas considerações sobre a interrupção da tensão por meio de manobras na média tensão em condições normais de operação, tendo-se detectado, via equipamentos de medição, que estes eventos na rede podem produzir um tipo de transitório que se converte, devido a uma série de fatores, em possíveis sobretensões na baixa tensão. Embora consideradas como fenômenos normais, essas sobretensões, muitas vezes não muito severas, têm sido apontadas como prováveis causas de danos a aparelhos elétricos.

A referência [87] discute a questão do fluxo de correntes na terra e da tensão de surto entre dois aterramentos distintos quando da incidência de uma descarga atmosférica ou falta para a terra nas redes de distribuição. O documento exemplifica danos causados aos equipamentos eletroeletrônicos nessas situações, defendendo que a queima pode não ser atribuída, exclusivamente, a surtos de sobretensões provenientes da rede de alimentação da distribuidora.

A publicação [88] apresenta estudos de simulação com vistas à verificação da possibilidade das descargas atmosféricas danificarem equipamentos eletroeletrônicos instalados em edifícios localizados a centenas ou até mesmo a milhares de metros do ponto de impacto. O documento conclui que, dentre as causas mais comuns para o surgimento destes problemas, uma delas está na instalação inadequada das proteções contra raios e dos dispositivos de proteção contra sobretensões nas edificações.

Em [89] são discutidas questões relativas aos custos decorrentes das descargas atmosféricas em sistemas de distribuição de energia à luz das mudanças no Código Civil, do Código de Defesa do Consumidor e das alterações na norma ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão – na sua última revisão de 2004 [90]. O documento contempla: o enfoque jurídico, as mudanças mais significativas ocorridas na NBR 5410 com referência ao assunto, as formas de custeio das interrupções de energia e informações relativas à evolução do número de pedidos de indenização por danos (PID) nos últimos anos, principalmente, após a publicação da Resolução Normativa nº 61 de 2004 da ANEEL.

A referência [91], por sua vez, encontra-se associada com os seguintes temas: identificação das causas mais frequentes dos pedidos de ressarcimento; desenvolvimento de ferramenta computacional para estimar as sobretensões e subtensões quando da ocorrência de eventos; análise de religamentos e plano de ação com um elenco de proposições para empresas e consumidores visando à redução de queimas de aparelhos elétricos.

Com relação a *softwares* específicos para análise de pedidos de ressarcimento, a referência [92] apresenta um sistema inteligente para auxílio à tomada de decisões. O sistema consta de interfaces para registro e caracterização de ocorrências de danos ao consumidor, ocorrências de perturbações de qualidade de energia na rede de distribuição e um módulo inteligente para apoio a tomada de decisão quanto à responsabilidade por danos elétricos em equipamentos do consumidor. A proposta é baseada no emprego da Rede Neural Artificial tipo IAC – *Interactive Activation and Competition*.

Ainda com relação a programas computacionais, como já destacado anteriormente, a referência [34] traz importantes contribuições para esta complexa área de pedidos de indenização por danos elétricos. Esse trabalho, a partir de uma metodologia fundamentada na correlação entre

distúrbios e esforços dielétricos e térmicos impostos aos equipamentos eletroeletrônicos, permite uma análise da viabilidade do nexo causal se fazer presente ou não em um dado fato ocorrido. Esse procedimento, sistematizado na forma de um programa computacional, originou o aplicativo denominado por APR.

1.4 Contribuições desta tese

A partir dos fundamentos apresentados, reconhecendo-se as áreas de carência apontadas, e ainda, apoiado no aplicativo computacional descrito na referência [34], esta tese de doutorado avança no contexto da sistematização dos procedimentos trazendo melhorias quanto aos seguintes pontos focais:

- Avaliação dos métodos para a modelagem dos eletrodos em haste diante do fenômeno da ionização do solo e definição, com base em dados experimentais, da representação mais apropriada aos estudos da elevação do potencial do terra quando da ocorrência de incidências diretas de descargas atmosféricas;
- Desenvolvimento de uma proposta para a modelagem dos fenômenos decorrentes da incidência de descargas atmosféricas indiretas;
- Implementação computacional dos modelos de aterramentos e fenômenos supracitados no aplicativo APR e realização de testes de desempenho da metodologia nos termos propostos, a partir de estudos de casos reais de pedidos de ressarcimento por danos.

No que se refere ao primeiro aspecto, relacionado com a modelagem dos sistemas de aterramento, este encontra sustentação no fato que, até o momento, os potenciais dos neutros e terras são determinados pelo programa base aqui focado, qual seja o APR, via resistência constante ou através de modelos não-lineares requerentes de constantes de correlação. Isto, como amplamente conhecido, pode conduzir a resultados que divergem consideravelmente das situações em campo. Isto se deve, sobretudo, ao fato que os potenciais do terra, sob a ação de fenômenos atmosféricos, são diretamente dependentes do valor utilizado para a respectiva resistência da haste de aterramento. Tendo em vista que esta hipótese pode não representar com exatidão as situações práticas, visto a manifestação, para muitos casos, da ionização do solo, tal efeito se faz extremamente relevante para o tratamento do tema.

No que tange ao segundo aspecto, este encontra-se atrelado com as questões próprias às incidências indiretas dos fenômenos atmosféricos. Neste particular, as contribuições encontram-se

direcionadas ao estabelecimento de meios para a modelagem do processo interativo entre as descargas manifestadas nas regiões circunvizinhas e as alterações dos potenciais do terra junto ao consumidor reclamante. Para tanto, é feita uma proposição de uma estratégia, devidamente amparada por fundamentos eletromagnéticos, que permite determinar qualitativa e quantitativamente os impactos decorrentes sobre os potenciais manifestados nos eletrodos de aterramento e, por conseguinte, as elevações de tensão focadas neste trabalho.

Concluindo, a última etapa dos trabalhos compreende esforços direcionados obtenção de uma nova versão do aplicativo APR, com a inserção dos fenômenos acima tratados, seguido de um processo para a avaliação de desempenho do *software* assim obtido.

1.5 Estrutura da tese

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo, este trabalho encontra-se assim estruturado:

Capítulo 2 - Modelagem dos sistemas de aterramento

Com o intuito de atender à questão da representação dos sistemas de aterramentos e melhor caracterização dos mesmos no aplicativo APR, conforme a prática exercida pelas empresas distribuidoras, esta unidade visa propor e incorporar estratégias distintas para a modelagem, implementação computacional e avaliação de desempenho dos sistemas de aterramento, com destaque a análise comparativa entre os processos tradicionais e a representação proposta.

Capítulo 3 - Estratégia para a determinação da elevação do potencial de terra

Nesta seção, são apresentados os fundamentos necessários à compreensão física e matemática da modelagem desenvolvida para o cálculo das variações dos potenciais de terra, em decorrência das incidências das descargas atmosféricas de maneira indireta.

Capítulo 4 - Implementação do Fenômeno do Aumento do Potencial de Terra no APR

Esta unidade encontra-se voltada para a adequação computacional do Aplicativo APR às proposições de modelagem dos sistemas de aterramento, bem como a inserção da estratégia para a avaliação dos impactos das descargas atmosféricas indiretas via aumento de potenciais de terra.

Capítulo 5 - Avaliação do desempenho do APR através de estudos de casos reais

Esta seção destina-se a avaliar o desempenho da nova versão do aplicativo computacional, empregando-se, para tanto, situações associadas com casos reais de pedidos de indenização por danos elétricos.

Capítulo 6 - Conclusões

Por fim, apresenta-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados com o trabalho como um todo. Além disso, serão ressaltadas questões vinculadas

às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO

2.1 Considerações iniciais

Tendo em vista que, dentre os fenômenos responsáveis por danos, a ocorrência das descargas atmosféricas se apresenta como a mais relevante, o tema, por si só, desperta grandes interesses no âmbito da pesquisa. Portanto, ao se considerar aspectos relacionados com o desenvolvimento de ferramentas de análise para a avaliação da existência, ou não, do nexos causal atrelado com danos elétricos reclamados, este assunto se apresenta com grandes desafios quanto a sua conceituação, forma de propagação, impactos dos sistemas de aterramento, dentre outros.

De fato, o comportamento do aterramento é capaz de influenciar consideravelmente a operação de dispositivos supridos pelas redes elétricas, sobretudo, quando da ocorrência das descargas atmosféricas [93]. Quer sejam estes efeitos diretos ou indiretos, a experiência e estudos evidenciam que, concomitantemente a manifestação das descargas, além das incidências diretas dos surtos de tensão e corrente sobre os dispositivos, há também a se considerar um fenômeno complementar, o qual se manifesta na forma de um aumento de potencial de terra (GPR – *Ground Potential Rise*). Esta situação, como se sabe, ocorre mesmo sob circunstâncias tais que as descargas atmosféricas não atinjam diretamente os cabos constituintes dos complexos de transmissão e distribuição, e o resultado desta interação pode, também, se apresentar como causa para danos em equipamentos elétricos e eletrônicos que possuam interligações à malha terra, conforme prática estabelecida por vários documentos normativos [78], [90], [94], [95].

No contexto do tema ora referido, estudos apontam que a resposta do aterramento de um sistema, quando submetido a descargas atmosféricas, possui um comportamento distinto daquele verificado para baixas frequências. Isto se dá por diversos fatores, dentre eles, um dos mais relevantes é a ionização do solo [59], [60], [96]. À luz deste fato, as representações computacionais dos aterramentos não podem ser simplistas, mas sim, devem primar por uma estratégia, em que pese o equilíbrio entre a simplicidade, a objetividade e qualidade dos resultados. Assim agindo almeja-se atingir modelos e desempenhos condizentes com a realidade do campo.

Em sintonia com tais objetivos, este capítulo tem por foco as seguintes metas:

- Sintetizar e discutir os modelos existentes de sistemas de aterramento;

- Apresentar, fundamentado nas contribuições existentes, proposição de melhorias de modelos de aterramentos visando os fins aqui postos;
- Implementar computacionalmente as representações existentes e o modelo modificado nesta pesquisa na plataforma ATP, com vistas a avaliação de desempenho das mesmas diante de resultados experimentais.

2.2 Conceitos gerais associados com sistemas de aterramento

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação entre um sistema físico ao solo, constituído basicamente por:

- Conexões elétricas interligando pontos do sistema aos eletrodos;
- Eletrodos de aterramento;
- A terra que envolve os eletrodos.

Para uma melhor compreensão do tema, inicialmente, a Figura 2.1, mostra uma parcela do eletrodo enterrada no solo e que a corrente que se propaga por este elemento se apresenta constituída por duas componentes: a longitudinal ($I_G + jI_C$) e a transversal ($I_R - jI_L$). Esta consideração implica pois que a corrente pode ser interpretada como uma parcela que é dissipada para o solo (longitudinal) e, a outra componente, para o comprimento do restante do eletrodo (transversal) [95]. Esta representação sugere, pois, que o circuito equivalente elétrico indicado pode ser utilizado como fundamento para a modelagem do fenômeno em pauta.

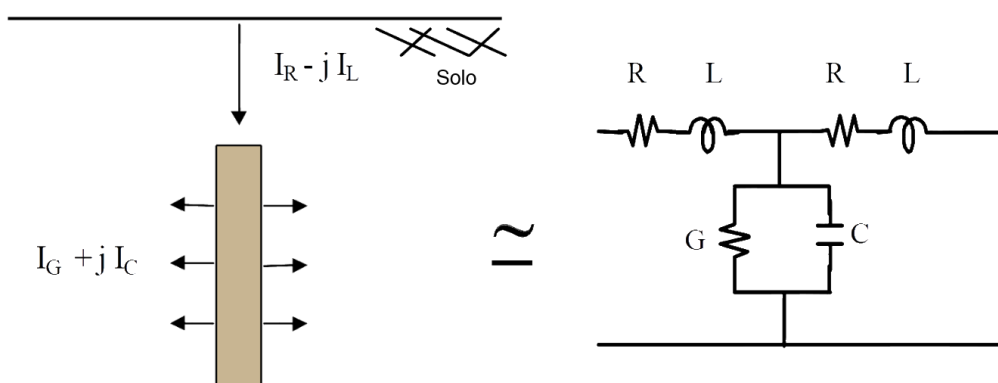


Figura 2.1: Componentes de corrente no eletrodo e no solo

O fluxo da corrente transversal ocasiona perdas e estabelece um campo magnético em torno do eletrodo, fato este que origina as resistências (R) e indutâncias (L) equivalentes e em série no circuito da Figura 2.1.

No que tange a corrente longitudinal, o campo elétrico no solo (de resistividade ρ e permissividade ϵ) está relacionado ao fluxo de corrente condutiva e capacitiva no meio. A relação

entre tais correntes não depende da geometria dos eletrodos, mas apenas da relação entre a condutividade do solo (σ) e a frequência angular (ω), conforme expresso em (2.1).

$$\frac{I_{\text{Condutiva}}}{I_{\text{Capacitiva}}} = \frac{\sigma}{\varepsilon\omega} \quad (2.1)$$

Do exposto segue que o efeito em questão pode ser representado pela inserção de uma condutância (G) e uma capacitância (C) equivalentes em paralelo com o circuito da Figura 2.1. Este utiliza a representação por um circuito T equivalente, para o qual os parâmetros em série são subdivididos em partes iguais.

Este circuito representativo apresenta apenas um eletrodo de aterramento. Portanto, para situações reais, surge a necessidade de uma adoção de arranjos mais complexos, contendo combinações de componentes de forma similar ao da Figura 2.1. A modelagem deve ainda contemplar a topologia de configuração geométrica e de conexões dos eletrodos, assim como deve ainda considerar os efeitos mútuos de natureza condutiva, capacitiva e indutiva, entre cada um dos elementos que compõe o sistema de aterramento [95].

2.2.1 Dependência da frequência com os parâmetros do solo

Considerando pois o sistema de aterramento como um todo, os arranjos elétricos equivalentes devem ser então agrupados e, sob o ponto de vista da entrada da malha de terra, isto origina o que se denomina por “impedância do aterramento” [97].

No domínio da frequência, o comportamento desta impedância pode ser determinado pela relação entre a elevação do potencial desenvolvida no eletrodo (referenciada no infinito) e a corrente aplicada ao aterramento para cada frequência de injeção, conforme expresso em (2.2).

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.2)$$

A título de ilustração, a Figura 2.2 é indicativa do comportamento de uma impedância complexa no domínio da frequência para um eletrodo enterrado em um solo de resistividade ρ igual a $2500 \Omega\text{m}$ [98].

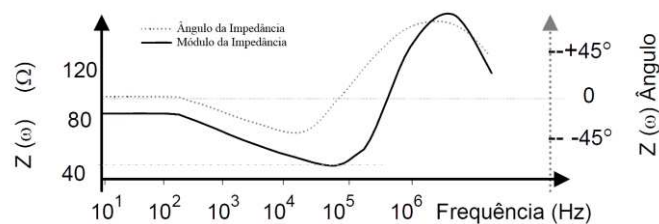


Figura 2.2: Impedância de aterramento no domínio da frequência.

Observa-se que, para frequências reduzidas, a impedância pode ser aproximada por uma resistência. Porém, com o aumento da frequência, inicialmente nota-se uma redução no valor da impedância quando comparada com frequências de ordem inferior. Isto se deve a predominância do efeito capacitivo. Em seguida, observa-se a influência do efeito indutivo, reduzindo assim o valor da impedância até que os efeitos indutivos e capacitivos se anulem (menor valor do módulo da impedância) e, logo após este instante, a impedância passa a crescer devido ao aumento do efeito indutivo.

Ainda neste contexto, conforme verificado por [99], [100], os parâmetros do solo (resistividade e permissividade), responsáveis pelas correntes condutiva e capacitiva, são também fortemente influenciados pela frequência. Devido a lacunas na literatura sobre a formulação geral do assunto, em que pese a correlação com a mencionada interdependência, o valor da resistividade do solo é obtido por meio de instrumentos que utilizam sinais em baixa frequência. Da mesma forma, assume-se que a permissividade relativa do solo varia entre 4 e 81 conforme a umidade do solo [98].

2.2.2 Propagação e ionização no solo

Quando ondas impulsivas de tensão e corrente são injetadas em um eletrodo longo fincado no solo, à medida que estas se propagam ao longo deste, suas amplitudes são atenuadas devido às perdas de energia e, concomitantemente, ocorre uma redução da inclinação da frente de onda, causando sua suavização ao longo da direção de propagação. A Figura 2.3 [95] é ilustrativa destes fenômenos.

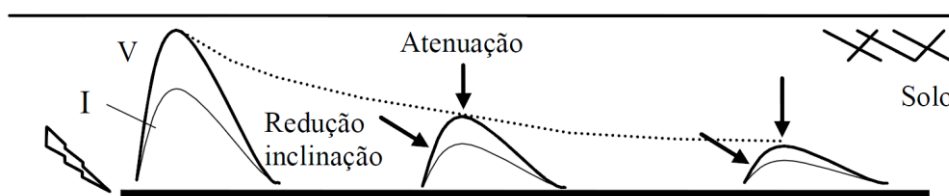


Figura 2.3: Atenuação e distorção das ondas de tensão (V) e corrente (I) ao longo do eletrodo.

Somado ao exposto, conforme a configuração de aterramento, quando a corrente I_l injetada no solo é incrementada, a densidade de corrente na superfície do condutor é linearmente aumentada, mantendo-se constante a relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante no solo. A Figura 2.4 mostra, esquematicamente, o efeito em pauta. Nestas circunstâncias, a densidade de corrente (J) pode atingir valores elevados e isto pode ocasionar um campo elétrico (E) que pode exceder um valor crítico. Sob tais situações poderá ocorrer a ionização da região circunvizinha [101].

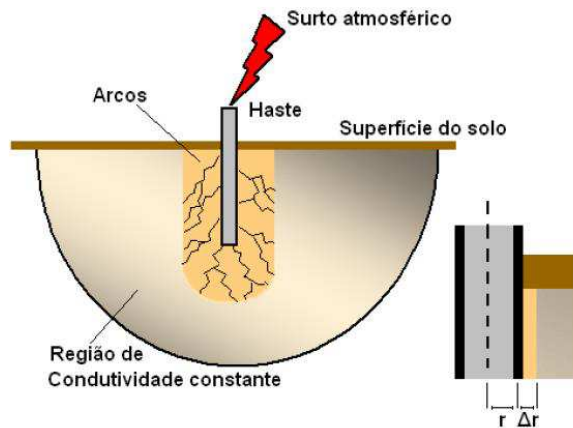


Figura 2.4: Processo de ionização do solo

O cálculo do campo elétrico pode ser definido por:

$$E = \rho \cdot J \quad (2.3)$$

Efetivamente, o processo de ionização é responsável pela redução da impedância de aterramento, devido ao aumento da área de dispersão da corrente, pois os canais ionizados possuem uma condutividade muito maior que o solo.

Portanto, é importante ressaltar que o efeito de ionização é capaz de promover a redução da impedância de aterramento no caso de eletrodos concentrados. Para grandes malhas de aterramento esse efeito é praticamente nulo, não afetando o valor da impedância de aterramento [102].

2.3 Modelos de sistemas de aterramento

Com o intuito de se representar as várias características do solo, diversos modelos para os sistemas de aterramento foram desenvolvidos, como considerado na sequência desta tese.

Segundo [50], as metodologias para tais estudos, utilizam, em sua maioria, processos analíticos, empíricos e numéricos.

O estabelecimento analítico do problema foi formulado, praticamente, ao mesmo tempo do seu surgimento. Entretanto, no início do século XX, não se dispunha de ferramentas computacionais capazes de lidar com a complexidade das soluções dos métodos matemáticos envolvidos. Por esta razão, alguns pesquisadores optaram por simplificar o problema por meio de relações simples entre as diversas variáveis e, também, utilizar estudos experimentais na composição de modelos empíricos.

Os processos numéricos, devido aos avanços na área de computação, têm merecido destaque quanto ao seu uso e podem ser categorizados como:

- Equivalentes baseados em parâmetros concentrados;

- Equivalentes baseados em campos eletromagnéticos;
- Equivalentes híbridos;
- Equivalentes baseados em parâmetros distribuídos.

Na primeira categoria decompõe-se o sistema de aterramentos em finitos segmentos, caracterizando, cada um deles, como um circuito com parâmetros concentrados (contendo indutâncias, capacitâncias e resistências). Posteriormente utilizam-se as clássicas leis de Kirchhoff para o desenvolvimento matemático do modelo. A segunda abordagem tem como cerne as equações de Maxwell, analisando o comportamento do sistema de aterramento devido aos campos eletromagnéticos induzidos pelas correntes. Quanto a terceira categoria, esta se fundamenta na composição das duas abordagens anteriores e, por fim, a quarta categoria utiliza de técnicas de modelagem por parâmetros distribuídos, detalhando a distribuição de corrente e tensão ao longo do eletrodo.

Somado as considerações supra postas, vale ainda ressaltar que, segundo [62], as representações dos sistemas de aterramento podem ser divididas em modelos de eletrodos com parâmetros lineares ou não-lineares.

A adoção pela utilização de parâmetros lineares ou não-lineares está atrelada a magnitude da corrente que escoar pelo eletrodo. Muitas vezes se opta pela consideração de parâmetros não-lineares para os casos de estudo em que ocorre o fenômeno da ionização do solo. Já a seleção por parâmetros concentrados ou distribuídos está vinculada com a relação entre a frequência da corrente escoada e o comprimento do eletrodo. Isto posto, fica evidenciado que modelos através de parâmetros concentrados são aceitáveis quando o comprimento de onda da corrente que o percorre é bem maior que o comprimento do eletrodo.

2.3.1 Modelos com parâmetros lineares

Basicamente, os modelos de sistemas de aterramento que utilizam parâmetros lineares são caracterizados por uma ou mais resistências com valores constantes, sendo esta calculada recorrendo às expressões matemáticas que têm, fundamentalmente, considerações quanto a configuração geométrica dos eletrodos. Estas considerações aproximam-se da realidade quando não há o fenômeno da ionização do solo. Alguns autores complementam esta configuração com indutâncias, formando um conjunto de resistências e indutâncias representativas dos eletrodos, além das resistências de terra [96]. À luz destes princípios, estudos abrangendo curtos-circuitos envolvendo o terra podem ser feitos por meio desta aproximação, sob condições tais que a corrente escoada pelo eletrodo de aterramento não seja muito elevada [63].

Os métodos propostos baseiam-se que o solo é homogêneo, isotrópico e linear, com resistividade constante. Ainda, a representação em pauta encontra-se alicerçada no fato que a corrente injetada é constante e de pequena intensidade.

Dentro deste cenário, os três modelos lineares mais utilizados, segundo [62], são:

- **Modelo 1 -Rüdenberg**

O modelo proposto por Rüdenberg [103] admite que a corrente injetada I se distribui uniformemente ao longo do eletrodo cilíndrico e vertical, de raio r_0 e comprimento l . Observa-se que, neste caso, se considera apenas um eletrodo cilíndrico colocado verticalmente no solo, onde R é a resistência do aterramento, ρ_0 a resistividade do solo, conforme (2.4).

$$R = \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l}{r_0} \right) \quad (2.4)$$

Para se obter o valor da resistência do aterramento, para vários eletrodos cilíndricos colocados verticalmente no solo e interligados paralelamente, deve-se adotar a expressão (2.5).

$$R = \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l}{D_g} \right) \text{ onde } D_g = \sqrt[m]{r_0 \prod_{k=2}^m D_{1k}} \quad (2.5)$$

Onde:

- m é o número de eletrodos colocados em paralelo;
- D_{lk} é a distância entre o eletrodo k e o eletrodo l ;
- D_g é a média geométrica das distâncias entre os eletrodos.

- **Modelo 2 - Dwight**

Através do modelo proposto por Dwight [104], obtém-se as expressões para as resistências do sistema de aterramento admitindo que, sobre a superfície do condutor, a densidade de carga é uniforme. Utilizando assim o método do potencial médio, o valor desta grandeza na superfície do eletrodo, é calculado e, na sequência, determina-se a capacitância do solo. O cálculo da impedância de terra é obtido através do paralelismo entre a capacitância e resistência do condutor.

Para um eletrodo cilíndrico colocado verticalmente no solo, considerando a impedância puramente resistiva, a mesma é calculada através da expressão (2.6).

$$R = \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot l}{r_0} \right) - 1 \right) \quad (2.6)$$

Para dois eletrodos colocados verticalmente no solo e distanciados por D , ligados paralelamente entre si, pode-se calcular a resistência de aterramento através das expressões:

$$R = \frac{\rho_0}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot l}{r_0} \right) - 1 + \frac{l}{D} - \frac{1}{3} \left(\frac{l}{D} \right)^3 + \frac{2}{5} \left(\frac{l}{D} \right)^5 - \dots \right) \text{ se } \frac{2 \cdot l}{D} \ll 1 \quad (2.7)$$

$$R = \frac{\rho_0}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot l}{r_0} \right) + \ln \left(\frac{4 \cdot l}{D} \right) - 2 + \frac{D}{2 \cdot l} - \frac{1}{16} \left(\frac{D}{l} \right)^2 + \frac{1}{512} \left(\frac{D}{l} \right)^4 + \dots \right) \text{ se } \frac{2 \cdot l}{D} \gg 1 \quad (2.8)$$

Para quatro eletrodos colocados verticalmente no solo, ligados paralelamente entre si, o cálculo da resistência de aterramento é realizado através das expressões:

$$R = \frac{\rho_0}{8 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot l}{r_0} \right) - 1 + \frac{2 \cdot l}{D} - \frac{2}{3} \left(\frac{l}{D} \right)^3 + \frac{l}{\sqrt{2} \cdot D} - \frac{1}{3} \left(\frac{l}{\sqrt{2} \cdot D} \right)^3 - \dots \right) \text{ se } \frac{2 \cdot l}{D} \ll 1 \quad (2.9)$$

$$R = \frac{\rho_0}{8 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot l}{r_0} \right) + 2 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot l}{D} \right) - 4 + \frac{D}{l} - \ln \left(\frac{4 \cdot l}{\sqrt{2} \cdot D} \right)^2 + \frac{\sqrt{2} \cdot D}{2 \cdot l} + \dots \right) \text{ se } \frac{2 \cdot l}{D} \gg 1 \quad (2.10)$$

- **Modelo 3 - Liew e Darveniza**

O terceiro modelo utilizado, proposto por Liew e Darveniza [43], admite que a densidade de corrente é uniforme ao longo do eletrodo e perpendicular à sua superfície, sendo as superfícies equipotenciais consideradas da forma cilíndrica/esférica, seguindo a forma do eletrodo. O cálculo da resistência de terra neste modelo, para um eletrodo cilíndrico colocado verticalmente no solo, é dado em (2.11).

$$R = \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{r_0 + l}{r_0} \right) \quad (2.11)$$

Para dois eletrodos colocados verticalmente no solo, ligados paralelamente entre si, pode-se calcular a resistência de aterramento através das expressões:

$$R = \frac{1}{2} \int_{r_0}^{\frac{D}{2}} \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot r^2} dr + \frac{1}{2} \int_{\frac{D}{2}}^{\infty} \frac{\rho_0}{r \cdot l (2 \cdot \pi - 2 \cdot \theta) + \pi \cdot r^2 (1 + \cos \theta)} dr \quad (2.12)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{D}{2 \cdot r} \right) \quad (2.13)$$

Onde r é a variável de integração que tem o valor entre r_0 e infinito.

Já para quatro eletrodos colocados verticalmente no solo, ligados paralelamente entre si, o cálculo da resistência de aterramento é realizado através da expressão (2.14), onde o valor de θ é ainda calculado por (2.13).

$$R = \frac{1}{4} \int_{r_0}^{\frac{D}{2}} \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot r^2} dr + \frac{1}{4} \int_{\frac{D}{2}}^{\frac{\sqrt{2} \cdot D}{2}} \frac{\rho_0}{r \cdot l(2 \cdot \pi - 4 \cdot \theta) + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cos \theta} dr + \frac{1}{4} \int_{\frac{\sqrt{2} \cdot D}{2}}^{\infty} \frac{\rho_0}{r \cdot l \left(\frac{3}{2} \cdot \pi - 2 \cdot \theta \right) + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \cos \theta + r^2 \cdot \theta (\sin \theta - \cos \theta)} dr \quad (2.14)$$

2.3.2 Modelos com parâmetros não-lineares

Com o intuito de representar as situações em que o sistema de aterramento é submetido a descargas atmosféricas, surge a necessidade da utilização de modelos não-lineares. Isto se dá devido ao fenômeno da ionização do solo, como já considerado anteriormente.

Visando contemplar tais condições de operação, os modelos empíricos utilizam de equações obtidas de forma experimental, através de curvas e medições, para caracterizar a ionização e, posteriormente, calcular a redução do valor da resistência de aterramento. Já os modelos de geometria variável representam a ionização do solo através do aumento fictício da seção transversal do eletrodo, reduzindo assim a resistência de aterramento.

Entretanto, tanto os modelos empíricos quanto os de geometria variável, não contemplam as características dinâmicas de todo o processo, onde existem correlações entre as constantes de tempo de ionização e de desionização do solo. Para considerar tais correlações, os modelos de resistividade variável obtêm a diminuição da resistência de aterramento através da variação da resistividade do solo das regiões afetadas pelo processo de ionização.

Na sequência são apresentados os modelos aplicáveis às situações supra postas.

- **Modelo 4 - Empírico**

Segundo [105], o modelo empírico pode ser descrito através de estudos de curvas experimentais, realizadas por metodologias propostas pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e pelo *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ), sendo o comportamento do sistema de aterramento, para uma haste cilíndrica e vertical, matematicamente definido pelas expressões:

$$R(t) = R_0 \left(1 + \frac{i(t)}{I_c} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

$$R_0 = \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \left(\frac{r_0 + l}{r_0} \right) \quad (2.16)$$

$$I_c = \frac{E_c}{\rho_0} \cdot A \quad (2.17)$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot r_0^2 \quad (2.18)$$

Onde:

- R_0 é a resistência do aterramento do solo não-ionizado;
- $i(t)$ é o valor instantâneo da corrente injetada;
- I_c é a corrente crítica no solo;
- E_c é o campo elétrico crítico do solo;
- A é a área da superfície lateral do eletrodo.

Para o cálculo da resistência de aterramento, devido à m eletrodos colocados em paralelo, considera-se que a corrente total se distribui uniformemente entre eles, bastando assim, dividir a resistência devida à apenas um eletrodo por m , conforme expressão (2.19).

$$R = \frac{R(t)}{m} = \frac{R_0}{m \cdot \sqrt{1 + \frac{i(t)}{m \cdot I_c}}} \quad (2.19)$$

• Modelo 5 - Geometria Variável

Este modelo representa a ionização do solo, através do cálculo da resistência de aterramento, considerando que, um eletrodo imerso em um solo ionizado possui um sistema fictício equivalente onde as dimensões do mesmo são maiores e o solo possui características não-ionizadas [62]. Assim, a resistividade do solo se mantém constante, sendo a redução da resistência do aterramento devida ao aumento da seção transversal do condutor.

Deste modo, quando uma corrente $i(t)$ é injetada no eletrodo ultrapassa seu valor crítico, calculado também pelas expressões (2.17) e (2.18), é determinado então o raio $r_i(t)$ equivalente, conforme expressão (2.20).

$$r_i(t) = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{l^2}{4} + \frac{\rho_0 \cdot i(t)}{2 \cdot \pi \cdot E_c}} \quad (2.20)$$

Para m eletrodos colocados em paralelo, também considerando que a corrente total se distribua uniformemente entre eles, basta substituir o termo de $i(t)$ por $i(t)/m$, na expressão (2.20).

- **Modelo 6 e 7 -Liew e Darveniza**

Os estudos realizados em [43] descrevem um modelo dinâmico para representação do sistema de aterramento, levando em conta as características não-lineares do mesmo, bem como a presença do fenômeno da ionização do solo. Os autores consideram um solo homogêneo e isotrópico e com resistividade constante, quando a densidade de corrente ao redor do eletrodo permanecer inferior à um valor crítico.

Para tanto, o modelo divide o solo ao redor do eletrodo em superfícies equipotenciais, de infinitesimais espessuras, de forma cilíndrica e semiesférica, conforme a Figura 2.5, onde a é a região onde não há ionização, b é a região onde ocorre a desionização, c é a região de ionização do solo e dr é a espessura infinitesimal das superfícies equipotenciais.

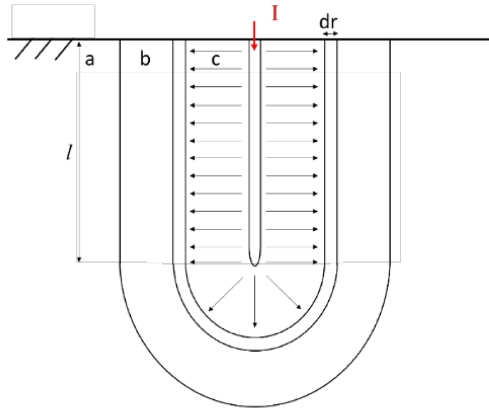


Figura 2.5: Modelo considerando a ionização do solo – Liew e Darveniza

Para se representar o fenômeno da ionização do solo, o modelo considera que o valor da resistividade varia com o tempo, lembrando que, nos momentos anteriores a ocorrência da ionização, o valor resistividade permanece constante e igual à inicial de solo não ionizado (ρ_0). Quando a densidade de corrente ultrapassa um valor crítico, sendo esse dependente das características inerentes do solo, a resistividade decresce de forma exponencial, resultando em uma redução brusca da resistência de aterramento. Na sequência, com o decaimento da densidade de corrente, acontece a desionização do solo, quando o valor de resistividade do solo retorna ao seu valor inicial.

A densidade de corrente da superfície equipotencial analisada em um determinado instante é obtida pela seguinte expressão:

$$J_j(t) = \frac{i(t)}{A_j(t)} = \frac{i(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot r_j^2} \quad (2.21)$$

Onde:

- $A_j(t)$ é a área de cada superfície equipotencial de espessura dr ;

- $J_j(t)$ a densidade de corrente no instante t ;
- r_j a distância entre a j -ésima superfície equipotencial e o centro do eletrodo.

Portanto, o valor da resistividade do solo está relacionado à densidade de corrente e é obtido através das seguintes condições:

- Caso a densidade de corrente $J_j(t)$ for menor que um valor crítico J_c , a resistividade do solo é obtida pela expressão (2.23) – Região “a”.

$$J_c = \frac{E_c}{\rho_0} \quad (2.22)$$

$$\rho_j(t) = \rho_0 \quad (2.23)$$

- Caso a densidade de corrente $J_j(t)$ alcance ou exceda um valor crítico J_c , o valor da resistividade de solo é obtido através de (2.24) – Região “c”.

$$\rho_j(t) = \rho_0 \cdot e^{-\frac{t_i}{\tau_1}} \quad (2.24)$$

Onde t_i corresponde ao intervalo de tempo medido a partir do início da ionização e τ_1 é a constante de tempo de ionização.

- Caso a densidade de corrente $J_j(t)$ for menor que um valor crítico J_c e a região estiver anteriormente ionizada, caracterizando assim a desionização do solo, a resistividade retorna ao seu valor inicial, de acordo com a expressão (2.25) - Região “b”.

$$\rho_j(t) = \rho_i + (\rho_0 + \rho_i) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_d}{\tau_2}}\right) \cdot \left(1 - \frac{J_j(t)}{J_c}\right)^2 \quad (2.25)$$

Na expressão acima:

- ρ_i é o valor da resistividade quando $J_j(t)$ for igual à J_c , sendo este valor atingido durante o decrescimento a partir do valor máximo de corrente;
- t_d corresponde ao intervalo de tempo medido a partir do início da desionização;
- τ_2 é a constante de tempo de desionização.

O comportamento da resistividade, devido às variações da densidade de corrente nas superfícies equipotenciais, também pode ser elucidado pela Figura 2.6.

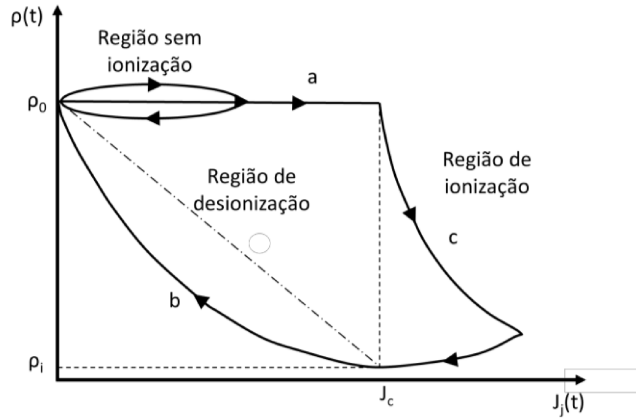


Figura 2.6: Variação da resistividade do solo devido à densidade de corrente

Para o cálculo da resistência de aterramento, considerando cada superfície de espessura dr , a expressão (2.26) é utilizada. Observa-se que, tanto a área quanto a resistividade, apresentam valores variáveis com o tempo.

$$dR_j(t) = \frac{\rho_j(t)}{A_j(t)} \cdot dr = \frac{\rho_j(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot r_j^2} \cdot dr \quad (2.26)$$

Diante do exposto, para então finalmente calcular a resistência total do aterramento, basta integrar a expressão (2.26), originando assim na expressão (2.27).

$$R(t) = \int dR_j(t) = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho_j(t)}{A_j(t)} \cdot dr = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho_j(t)}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\frac{1}{r_j} - \frac{1}{r_j + l} \right) \cdot dr \quad (2.27)$$

Complementarmente, em atenção as sugestões feitas em [62], o modelo em pauta foi modificado de forma tal a calcular a resistividade considerando, ao invés de um valor mínimo dr como passo de integração para resolução da expressão (2.27), divisões agrupadas de 10 em 10 cm (Modelo 7). O valor de cada divisão foi obtido através da média aritmética das n divisões de espessura dr que compõem esta divisão mais espessa.

- **Modelo 8 e 9 – IST**

O modelo desenvolvido no Instituto Superior Técnico (IST) [105] tem como base a metodologia proposta por Liew e Darveniza [43], porém acrescenta alguns componentes complementares visando aumentar a qualidade da representação do fenômeno da ionização do solo.

No modelo de Liew e Darveniza, considera-se que, após iniciado o processo de ionização do solo, o valor da resistividade é decrescido com o tempo. Em consonância com esta hipótese, admite-se, implicitamente, que podem existir campos elétricos superiores ao campo elétrico crítico do solo, mesmo que estes não sejam efetivamente manifestados.

Com o intuito de adequar o processo a tal realidade, o modelo do IST considera que o fenômeno da ionização do solo apresenta uma dinâmica própria e controlada pelo campo elétrico crítico do solo. Ainda, trata o solo como homogêneo, isotrópico e com resistividade ρ_0 constante, enquanto o campo elétrico circundante do eletrodo permanecer inferior ao campo elétrico crítico característico do solo, adotando assim as regiões da Figura 2.5. O campo elétrico analisado em um determinado instante $E_j(t)$ é obtido pela seguinte expressão:

$$E_j(t) = \rho_j(t) \cdot J_j(t) = \frac{\rho_j(t) \cdot i(t)}{A_j(t)} = \frac{\rho_j(t) \cdot i(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot r_j^2} \quad (2.28)$$

Neste caso, o valor da resistividade do solo está relacionado ao campo elétrico e é obtido através das seguintes condições:

- Caso o campo elétrico $E_j(t)$ for menor que um valor crítico E_c , a resistividade do solo também é obtida pela expressão (2.23) – Região “a”, conforme modelo anterior.
- Caso o campo elétrico $E_j(t)$ alcance ou exceda um valor crítico E_c , inicia-se assim o processo de ionização do solo. Neste caso, as cargas resultantes desse processo tentarão manter o campo elétrico em seu valor crítico e, para tanto, considerando cada valor da densidade de corrente, pode-se definir um valor crítico da resistividade em cada parcela infinitesimal das superfícies equipotenciais, conforme expressão (2.29).

$$\rho_{cj}(t) = \frac{E_c}{J_j(t)} = \frac{E_c \cdot A_j(t)}{i(t)} \quad (2.29)$$

Entretanto, esse valor não é atingido instantaneamente e a resistividade do solo pode ser obtida pela expressão (2.30) – Região “c”.

$$\rho_j(t) = \rho_j(t - \Delta t) + (\rho_{cj}(t) - \rho_j(t - \Delta t)) \cdot \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{\tau_1}}\right) \quad (2.30)$$

Onde Δt é o passo de tempo, necessário para duas amostras sucessivas.

- Caso o campo elétrico $E_j(t)$ for menor que um valor crítico E_c e a região estiver anteriormente ionizada, caracterizando assim a desionização do solo, a resistividade retorna ao seu valor inicial, de acordo com a expressão (2.31) - Região “b”.

$$\rho_j(t) = \rho_{kj} + (\rho_0 + \rho_{kj}) \cdot \left(1 - e^{\frac{-(t-t_{kj})}{\tau_2}}\right) \cdot \left(1 - \frac{E_j(t)}{E_c}\right)^2 \quad (2.31)$$

Onde ρ_{kj} é o valor mínimo da resistividade, no tempo t_{kj} , sendo este valor atingido durante o decrescimento a partir do valor máximo de corrente.

Igualmente ao modelo anterior, o cálculo da resistência de aterramento é realizado através das expressões (2.26) e (2.27).

Mais uma vez, em atenção as sugestões contidas em [62], o modelo 8 foi modificado, originando assim o denominado Modelo 9, que também calcula a resistividade considerando que as divisões para o passo de integração do cálculo da expressão (2.27) sejam agrupadas de 10 em 10 cm.

- **Modelo 10 - Wang, Liew e Darveniza**

De maneira similar, o modelo desenvolvido em [61] também utiliza como base a metodologia proposta por Liew e Darveniza [43], considerando-se, porém, situações em que elevadas correntes resultem em caminhos discretos de ruptura no solo e na sua superfície.

Quando o fenômeno da ionização se manifesta, ocorrem assim a condução elétrica através do solo e a decomposição química do material constituinte do terreno, ocasionando então as rupturas dielétricas. Diante disso, quando a densidade de corrente supera um valor limite J_s , surgem arcos elétricos, produzindo caminhos irregulares de condução elétrica ao longo do solo e, ainda, aumentando conforme o valor da densidade de corrente. Adicionalmente, na região em que a corrente atinge o seu maior valor, inicia-se a decomposição química e esta permanece até que a densidade de corrente atinja um valor menor que um valor crítico J_c .

À luz do exposto, há a necessidade de se considerar, adicionalmente, uma região ao modelo de Liew e Darveniza [43], onde ocorrem descargas elétricas com intensas conduções de corrente e, por tal motivo, a resistividade chega a valores próximos de zero. Esta nova subdivisão pode ser observada na Figura 2.7.

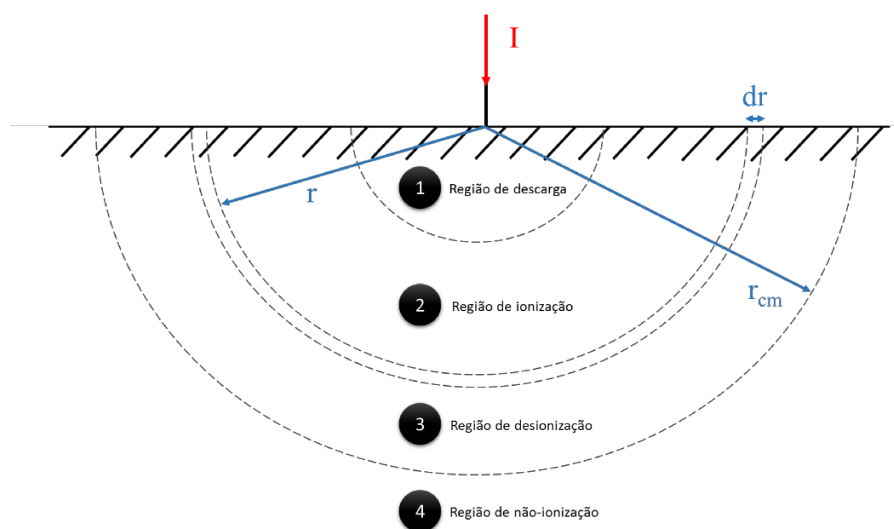


Figura 2.7: Subdivisão das regiões do modelo de Wang, Liew e Darveniza

É importante ressaltar que o modelo aqui considerado passa, agora, a contemplar regiões com uma geometria hemisférica, diferentemente da estrutura cilíndrica hemisférica do modelo base. Portanto, as expressões que utilizam a área em seu cálculo devem ser adequadamente modificadas para fins da inserção do efeito ora considerado.

Para o cálculo da densidade de corrente da superfície equipotencial analisada em um determinado instante, utiliza-se a seguinte expressão:

$$J_j(t) = \frac{i(t)}{A_j(t)} = \frac{i(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j^2} \quad (2.32)$$

O valor da densidade de corrente crítica é obtido através de:

$$J_c = \frac{E_c}{\rho_0} \quad (2.33)$$

Desta forma, quando $J_j(t) < J_c$ isto implica na não manifestação de rupturas dielétricas no solo, porém, quando $J_c \leq J_j(t) < J_s$, estas já ocorrem. Ainda, se $J_j(t) \geq J_s$, as rupturas se apresentam intensas.

No que tange a variável J_s , esta é definida como:

$$J_s = \alpha \cdot J_c \quad (2.34)$$

Onde o coeficiente α é dependente da amplitude da corrente injetada e $\alpha \geq 1$. Tal coeficiente pode ser obtido da seguinte maneira:

- À medida que a corrente aumenta e penetra no solo, a expressão (2.35) é aplicável.

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \left(1 - \lambda \cdot e^{i(t)^{\beta_1}}\right) \text{ para } \alpha > 1 \quad (2.35)$$

Onde α_0 é o valor inicial de α , λ e β_1 são parâmetros constantes. Com o aumento de corrente injetada, mais intensa será a formação de descargas parciais, implicando em J_s e α menores.

- Devido ao aumento de corrente, o coeficiente α diminui o seu valor, possuindo assim uma diferente característica:

$$\alpha = 1 + e^{\frac{\beta_2}{i(t)}} \quad (2.36)$$

$$\beta_2 = i(t - \Delta t) \cdot \ln(\alpha_s - 1) \quad (2.37)$$

Onde α_s é o último valor de α obtido por (2.35) e β_2 é calculado através de (2.37).

- Quando a corrente decresce de seu valor máximo, o reestabelecimento de α é dado por:

$$\alpha = \alpha_p + (\alpha_0 - \alpha_p) \cdot \left(1 - \frac{i(t)}{i_p}\right)^{\beta_3} \quad (2.38)$$

Onde α_p é o valor de α obtido no momento em que a corrente atinge o seu pico (i_p) e β_3 é um parâmetro constante que adquire distintos valores para diferentes picos da corrente com o intuito de assegurar que, quanto maior o pico de corrente, mais lentamente α retoma seu valor inicial α_0 .

Para esclarecer a variação de α com a corrente, a Figura 2.8 representa o procedimento de cálculo dos valores da constante.

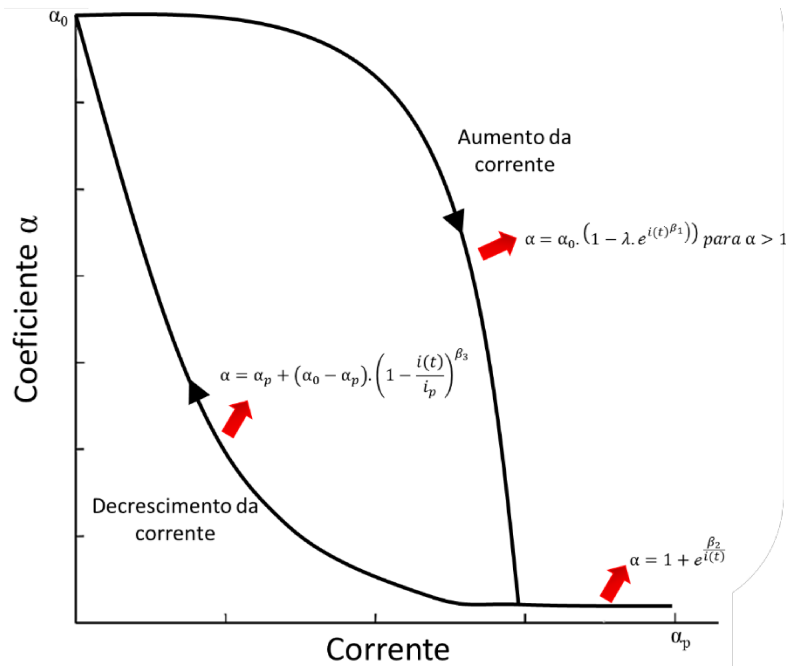


Figura 2.8: Perfil do coeficiente α em função da corrente

Uma vez definido α , que caracteriza J_s , a resistividade do solo pode ser determinada, distintamente, sendo r_{cm} o raio da região ionizada, para cada superfície considerada:

- Região 1 (descargas) - onde $Jj(t) \geq J_s$ e $r < r_{cm}$, a ruptura dielétrica se manifesta através de intensas descargas e a resistividade do solo decai para zero.
- Região 2 (ionização) - onde $J_c \leq Jj(t) < J_s$ e $r < r_{cm}$, ocorre a ruptura dielétrica por ionização e a resistividade do solo decai de acordo com a expressão (2.24).
- Região 3 (desionização) - onde $Jj(t) < J_c$ e $r < r_{cm}$, a resistividade do solo é restabelecida segundo a expressão (2.25).
- Região 4 (não-ionização) - onde $Jj(t) < J_c$ e $r > r_{cm}$, a resistividade se mantém igual ao seu valor inicial, conforme (2.23).

É relevante ressaltar que os valores de E_c , λ , τ_1 , τ_2 , α_0 , β_1 e β_3 devem ser atribuídos para cada tipo de solo, de eletrodo e de corrente de surto.

Finalmente, a expressão para o cálculo da resistência de aterramento, considerando cada superfície de espessura dr e a expressão para calcular a resistência total do aterramento, são expressas por (2.39) e (2.40), respectivamente.

$$dR_j(t) = \frac{\rho_j(t)}{A_j(t)} \cdot dr = \frac{\rho_j(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j^2} \cdot dr \quad (2.39)$$

$$R(t) = \int dR_j(t) = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho_j(t)}{A_j(t)} \cdot dr = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho_j(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j^2} \cdot dr \quad (2.40)$$

• Modelo 11 – Wang, Liew e Darveniza Modificado

Apesar dos avanços do modelo proposto em [61], tendo em vista que a proposta não considera a presença de hastes de aterramento, seus resultados, notadamente, são satisfatórios apenas para incidências de descargas atmosféricas diretamente no solo. Portanto, uma vez que as questões aqui tratadas envolvem correntes circulantes por eletrodos, isto implica em significativas discrepâncias para a resistência do solo, principalmente, para os momentos que antecedem o fenômeno da ionização. Isto produz, para os fins aqui postos, erros expressivos, como será oportunamente esclarecido.

Procurando pois adequar a representação de forma à atender ao exposto, baseado em estudos inicializados em [40], os quais se apresentam como passos preliminares à melhoria do modelo de aterramento do programa APR.

Em [40] a ideia básica consiste na alteração da área das superfícies equipotenciais, através da qual a área nas imediações do eletrodo passa a ser tratada na forma de uma superfície cilíndrica e outra semiesférica, conforme indicado na Figura 2.9.

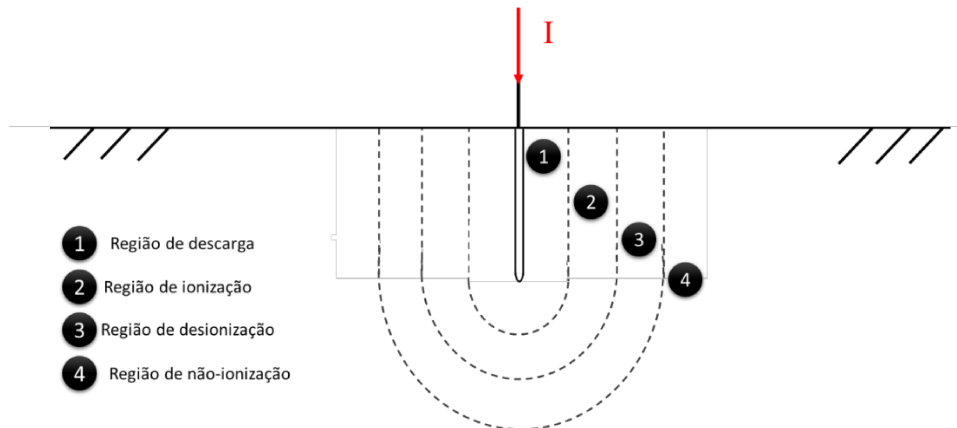


Figura 2.9: Subdivisão das regiões do Modelo Wang, Liew e Darveniza Modificado

Neste contexto, as expressões atreladas com a área de uma semiesfera, devem ser modificadas de forma a contemplar as diferenças postas, como considerado na sequência, onde se constata que a grandeza $A_j(t)$ é tratada na forma da composição de duas regiões, e não mais de uma maneira singular. Isto produz a equação (2.41).

$$A_j(t) = 2 \cdot \pi \cdot r_j^2 + 2 \cdot \pi \cdot r_j \cdot l \quad (2.41)$$

Por conseguinte, a densidade de corrente, antes determinada pela expressão (2.32), passa a ser definida por:

$$J_j(t) = \frac{i(t)}{A_j(t)} = \frac{i(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j^2 + 2 \cdot \pi \cdot r_j \cdot l} \quad (2.42)$$

O valor da densidade de corrente crítica (J_c), se mantem inalterada e consonante com os termos definidos pela expressão (2.33).

Quanto a densidade de corrente limite (J_s), esta segue o procedimento de cálculo descrito no modelo proposto em [59], assim como também o processo de cálculo da constante α .

Para a determinação da resistividade do solo, grandeza esta variável com o tempo e dependente de J_s , seu cálculo deve ser realizado de maneira distinta para cada região, conforme descrito em [61].

Por fim, a resistência de aterramento, antes fornecidas pelas expressões (2.39) e (2.40), passa a ser determinada pelas equações (2.43) e (2.44), respectivamente.

$$dR_j(t) = \frac{\rho_j(t)}{A_j(t)} \cdot dr = \frac{\rho_j(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j^2 + 2 \cdot \pi \cdot r_j \cdot l} \cdot dr \quad (2.43)$$

$$R(t) = \int dR_j(t) = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho_j(t)}{A_j(t)} \cdot dr = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho_j(t)}{2 \cdot \pi \cdot r_j^2 + 2 \cdot \pi \cdot r_j \cdot l} \cdot dr \quad (2.44)$$

Com tal alteração, este modelo passa agora a contemplar o sistema físico de um eletrodo cilíndrico colocado verticalmente no solo, considerando a variação da resistividade do solo para representar a ionização e, adicionalmente, situações em que elevadas correntes resultem em caminhos discretos de ruptura no solo e na sua superfície.

- **Modelo 12 – Representação por Equivalentes de Linha de Transmissão - *Transmission Line Modeling* (TLM)**

O modelo proposto em [106] utiliza uma representação baseada na teoria de linhas de transmissão. O solo é considerado homogêneo e composto por uma camada horizontal, sendo representado por sua resistividade elétrica (ρ), permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ), conforme ilustra a Figura 2.10.

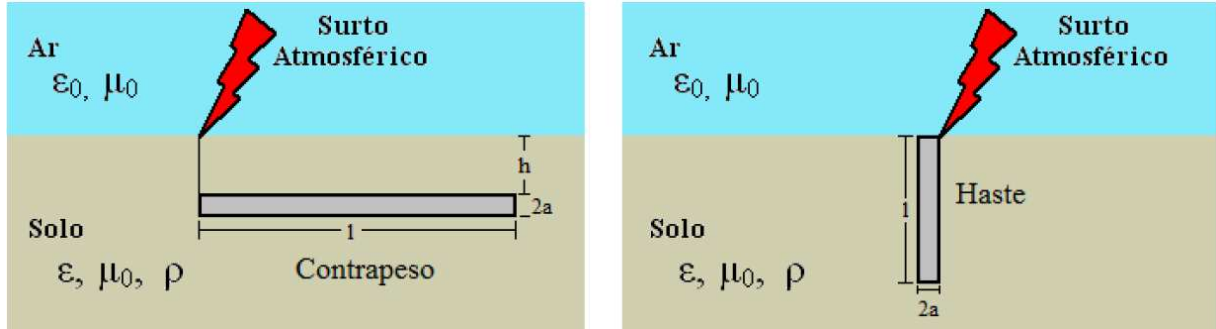


Figura 2.10: Geometria e considerações para um eletrodo horizontal e vertical

Desta maneira, um eletrodo de comprimento l pode ser representado através de uma associação de elementos resistivos, indutivos, condutivos e capacitivos de forma que as tensões e correntes nos pontos de conexão entre cada célula podem ser prontamente determinadas. Neste modelo, do tipo π , os componentes R , L , G e C são a resistência e indutância série e admitância e capacitância *shunt*, respectivamente, conforme Figura 2.11.

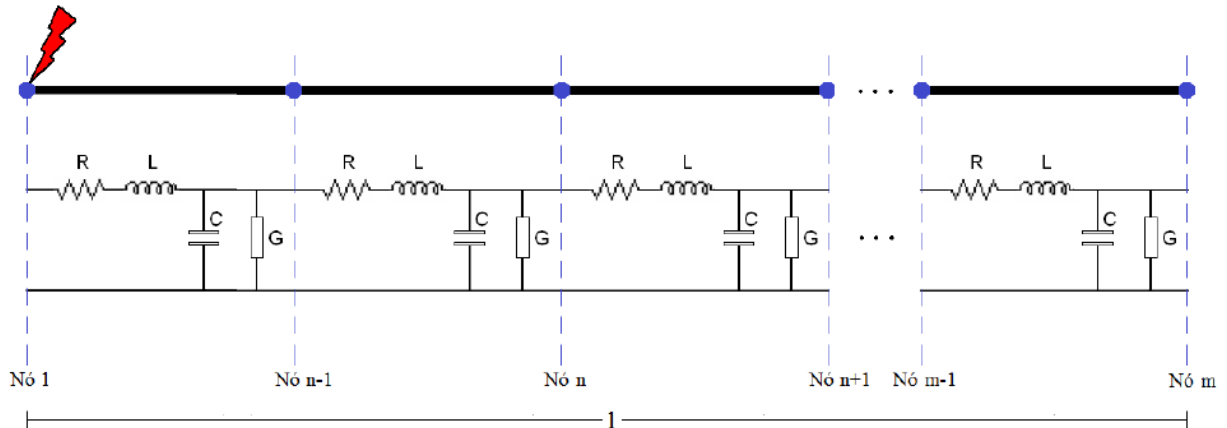


Figura 2.11: Representação do eletrodo utilizando TLM

Utilizando as leis de Kirchhoff para tensão e corrente, pode-se então obter a impedância característica da linha (aqui correspondente ao eletrodo) e o tempo de propagação de um pulso entre dois nós, conforme (2.45) e (2.46), respectivamente [107].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.45)$$

$$\Delta t = \sqrt{LC} \quad (2.46)$$

Onde Z_0 é a impedância característica da linha (Ω), L é a indutância da linha (H), C é a capacitância da linha (F) e Δt é o passo de tempo (s).

As tensões e correntes sobre os nós são obtidas em três etapas: uma primeira relacionada com os cálculos para o primeiro nó, na sequência para os nós intermediários e, por fim, para o último nó. Assim, o processo da propagação do impulso entre os nós consecutivos requer um intervalo de tempo definido por Δt . Esta propagação ocorre desde o ponto de injeção de corrente até a extremidade da linha, sendo que cada célula é considerada como se fosse uma linha independente.

Para a propagação do impulso no primeiro nó, adotado como ponto de incidência da descarga, as tensões incidentes e refletidas se apresentam consonantes com as indicações da Figura 2.12.

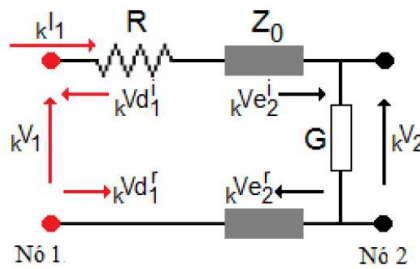


Figura 2.12: Tensões incidentes e refletidas para o nó 1

Para um instante genérico de tempo definido por k (s):

- kI_1 - Corrente sobre o nó 1 em (A);
- kV_1 - Tensão neste mesmo nó em (V);
- kVd_1^i - Tensão incidente pelo lado direito do nó é em (V);
- kVd_1^r - Tensão refletida do lado direito em (V);
- kVe_2^i - Tensão incidente pelo lado esquerdo do nó 2 em (V);
- kVe_2^r - Tensão refletida pelo lado esquerdo do nó 2 em (V);
- kV_2 - Tensão sobre o nó 2 em (V).

A partir de princípios básicos associados com a propagação das ondas viajantes, as grandezas supra mencionadas se inter-relacionam através das equações (2.47) - (2.51).

$$kI_1 = kI_f \quad (2.47)$$

$${}_kV_1 = {}_kI_1(R + Z_0) + 2 {}_kVd_1^i \quad (2.48)$$

$${}_kVd_1 = 2 {}_kVd_1^i + {}_kI_1Z_0 \quad (2.49)$$

$$Vd_1^r = {}_kVd_1 - {}_kVd_1^i \quad (2.50)$$

$${}_{k+1}Vd_1^i = {}_kVe_2^r \quad (2.51)$$

No que tange aos resultados atrelados com a propagação para os nós subsequente, as correntes e tensões são determinadas em consonância com (2.52) e (2.53), respectivamente.

$${}_kV_n = \frac{\frac{2 {}_kVe_n^i}{Z_0} + \frac{2 {}_kVd_n^i}{R + Z_0}}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R + Z_0} + G} \quad (2.52)$$

$${}_kI_n = \frac{{}_kV_n - 2 {}_kVd_n^i}{R + Z_0} \quad (2.53)$$

As variáveis componentes das expressões anteriores são determinadas como segue:

$${}_kVe_n = {}_kV_n \quad (2.54)$$

$${}_kVd_n = 2 {}_kVd_n^i + {}_kI_n Z_0 \quad (2.55)$$

$${}_kVe_n^r = {}_kVe_n - {}_kVe_n^i \quad (2.56)$$

$${}_kVd_n^r = {}_kVd_n - {}_kVd_n^i \quad (2.57)$$

$${}_{k+1}Ve_n^i = {}_kVd_{n-1}^r \quad (2.58)$$

$${}_{k+1}Vd_n^i = {}_kVe_{n+1}^r \quad (2.59)$$

Especial atenção merece o último nó, representado por m , o qual corresponde a extremidade do eletrodo. Para este considera-se seus terminais na forma de um circuito aberto, fato este que implica em ${}_kI_m = 0$.

Com base na adoção supra feita, considera-se que as tensões refletidas e incidentes se manifestem tão apenas do lado esquerdo do nó, sendo as respectivas equações para as tensões e correntes determinadas de acordo com as expressões (2.60) - (2.62).

$${}_kV_m = \frac{\frac{2{}_kVe_m^i}{Z_0}}{\frac{1}{Z_0} + G} \quad (2.60)$$

$${}_kVe_m^r = {}_kV_m - {}_kVe_m^i \quad (2.61)$$

$${}_{k+1}Ve_m^i = {}_kVd_{m-1}^r \quad (2.62)$$

Do exposto segue que a metodologia ora apresenta requer parâmetros representativos, de forma similar ao que ocorre para as linhas de transmissão. Estes correspondem às grandezas equivalentes R, L, C e G, destinadas a modelagem do eletrodo, conforme definido pelo conjunto de equações apresentadas.

Para tanto, adotando por premissa que os parâmetros sejam determinados por unidade de comprimento da linha equivalente, estes podem ser determinados por expressões dependentes da geometria do eletrodo, conforme estabelecido em [97].

Para um eletrodo vertical de comprimento l e raio a :

$$R_d = \frac{\rho_c}{\pi a^2} \quad (2.63)$$

$$L_d = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad (2.64)$$

$$C_d = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{2l}{a}\right)} \quad (2.65)$$

$$G_d = \frac{2\pi}{\rho_s \ln\left(\frac{2l}{a}\right)} \quad (2.66)$$

Onde:

- R_d - Resistência por unidade de comprimento em (Ω/m);
- L_d - Indutância por unidade de comprimento em (H/m);

- C_d - Capacitância por unidade de comprimento em (F/m);
- G_d - Condutância por unidade de comprimento em (S/m);
- ρ_c - Resistividade do eletrodo em (Ωm);
- ρ_s - Resistividade do solo em (Ωm);
- ε_r - Permissividade relativa do solo;
- ε_0 - Permissividade do vácuo em (F/m);
- μ_0 - Permeabilidade do vácuo em (H/m);
- h - Profundidade do eletrodo (m).

Vale ressaltar que, além da modelagem aqui utilizada, há outras formulações com menor grau de difusão, a exemplo daquelas encontradas em [103], [108]–[110].

Uma vez determinados os parâmetros por unidade de comprimento do modelo e considerando uma distribuição uniforme dos mesmos ao longo de cada segmento, pode-se então obter os parâmetros do modelo através de (2.67), onde Δx é o comprimento do segmento de linha, em metros.

$$\begin{aligned} R &= R_d \Delta x \\ L &= L_d \Delta x \\ C &= C_d \Delta x \\ G &= G_d \Delta x \end{aligned} \quad (2.67)$$

Para determinar o máximo valor de Δx (grandeza esta dependente da frequência – ou taxa de variação - do impulso injetado), utiliza-se dos princípios estabelecidos em [46], [106], [111], fato este que culmina na expressão (2.68).

$$l_{seg} < \frac{\lambda'}{10} \quad (2.68)$$

Onde λ' é o comprimento de onda (m) e l_{seg} é o máximo comprimento do segmento (m).

Para a obtenção da variável λ emprega-se as expressões (2.69) e (2.70).

$$\gamma = \sqrt{j2\pi f_{max} \mu_0 \mu_r \left(\frac{1}{\rho_s} + j2\pi f_{max} \varepsilon_0 \varepsilon_r \right)} = \beta_1' + j\beta_2' \quad (2.69)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta_2'} \quad (2.70)$$

Onde γ é a constante de propagação, β_1 é a constante de atenuação, β_2 é a constante de fase, f_{max} é a frequência máxima do impulso injetado (Hz) e μ_r é a permeabilidade relativa do solo.

Como o TLM é um método diferencial, é necessário se estabelecer as condições de contorno para este modelo. Para o atendimento a este quesito, a corrente elétrica na origem do condutor é considerada igual a corrente do pulso injetado, enquanto que, na outra extremidade do condutor, admite-se a já mencionada condição de um circuito aberto. Vale ainda destacar que todas as tensões incidentes à direita e à esquerda de todos os nós, no primeiro instante de tempo, são nulas.

De posse da tensão no primeiro nó, para cada passo de integração, é possível se obter a resistência do aterramento. Para tanto basta correlacionar a tensão calculada e a corrente injetada de acordo com a sua relação básica. Maiores detalhes do modelo e sua implementação podem ser encontrados em [106].

Para a consideração da ionização do solo neste modelo, é necessário modificar o parâmetro da condutância no circuito equivalente, de acordo com os estudos realizados por [112] e [113]. Os outros parâmetros não serão afetados devido ao fato de que não ocorrerão mudanças na permeabilidade e permissividade do solo. As formulações para a corrente crítica I_{cr} e a condutância variante no tempo G_{dv} (Ωm^{-1}) são expressas na sequência:

$$I_{cr} = \frac{E_{cr} \rho_s}{2\pi(lG_d)^{-2}} \quad (2.71)$$

$$G_{dv} = G_d \sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_{cr}}} \quad (2.72)$$

Onde I_{cr} é a corrente crítica (A), E_{cr} é o campo elétrico crítico (V/m) e I é a corrente injetada (A).

É importante ressaltar que na ocorrência da ionização do solo, a corrente máxima resulta em um campo elétrico máximo e, conseqüentemente, uma resistência mínima. A partir deste momento, devido ao rápido decréscimo da corrente, não há tempo suficiente para que o solo retome suas características originais. Portanto, a resistência de aterramento é mantida em seu valor mínimo até o final do fenômeno em pauta.

- **Modelo 13 –Método das Imagens**

A presente proposta de modelagem, conforme relatado em [114], se apoia no fato que a corrente elétrica impactante sobre o eletrodo se dispersará no solo a partir da superfície do mesmo. Fundamentado neste princípio, admite-se que, devido a grande diferença entre os valores da

resistividade do solo e do condutor, haverá uma superfície equipotencial ao longo da extensão do eletrodo.

Desta forma, do ponto de vista físico, para a obtenção do valor da resistência de aterramento, tendo em mente a manifestação de um potencial constante ao longo do condutor, o cálculo da distribuição de corrente pode ser feito a partir da premissa que os condutores enterrados se apresentam como sucessivas fontes pontuais de corrente, cada uma representando uma parcela da corrente total que se dispersa no solo. Isto posto segue que cada fonte (Figura 2.13) contribui para uma parcela do potencial na superfície do condutor, conforme (2.73).

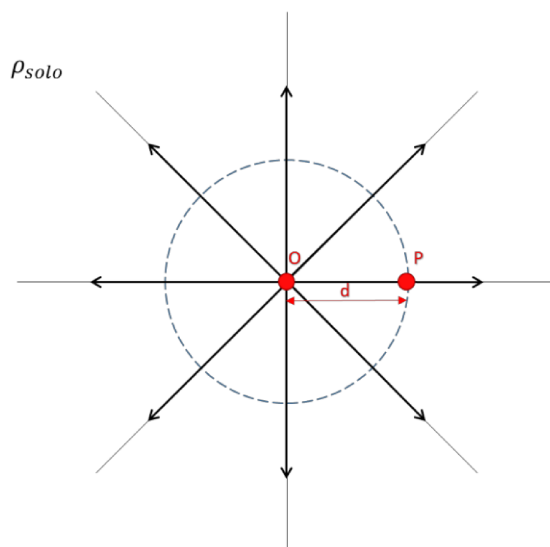


Figura 2.13: Potencial numa localização genérica P devido a uma fonte de corrente individual

$$dV = \frac{\rho_{solo}}{4\pi d} dI \quad (2.73)$$

Onde:

- dI - Corrente elementar devido a uma fonte de corrente em (A);
- ρ_{solo} - Resistividade do solo em (Ωm);
- dV - Parcela de potencial em um ponto na superfície do condutor devido à uma fonte dI em (V);
- d - Distância entre a fonte de corrente e um ponto da superfície do condutor (m).

A partir desta premissa, de modo a se obter o potencial V em um ponto qualquer da extensão do eletrodo, oriunda da composição das diversas fontes de corrente, basta integrar a expressão (2.73):

$$V = \frac{\rho_{solo}}{4\pi} \int \frac{dI}{d} \quad (2.74)$$

Para o cálculo da grandeza V pode-se empregar dois métodos, a saber: o da distribuição uniforme de corrente e o da superfície equipotencial [114], [115].

O primeiro admite que a corrente é uniformemente distribuída na superfície lateral do eletrodo e permite, a partir desta consideração, utilizar a expressão (2.74) analiticamente. Entretanto, diante do fato da adoção de uma distribuição uniforme de corrente, o potencial obtido na superfície do eletrodo não é uniforme ao longo do mesmo. Esta é a principal desvantagem desta opção.

A segunda estratégia estabelece um potencial na superfície do eletrodo e calcula a distribuição de corrente necessária para satisfazer tal condição. Sua resolução analítica se torna complexa e inviável para os fins aqui postos.

Outro ponto a ser considerado nos estudos refere-se ao comportamento das linhas de campo elétrico entre o condutor (solo) e o dielétrico (ar), na superfície do solo, conforme ilustra a Figura 2.14. Esta evidencia que a distribuição ilustrada na Figura 2.13 se mostra, em termos reais, significativamente diferente quando da consideração do limite do solo na região circunvizinha a do eletrodo

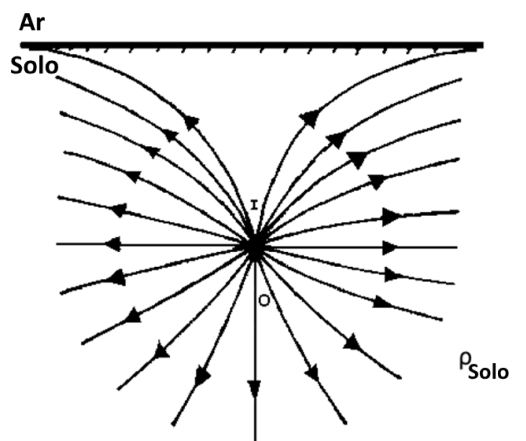


Figura 2.14: Linhas de campo elétrico devido à uma fonte de corrente pontual e a presença do ar

De modo a incorporar a questão acima, o método das imagens pode ser utilizado com adequações. Para tanto basta substituir o meio composto de solo e ar por um que possua apenas solo e, assim procedendo, aplicar a metodologia anteriormente apresentada.

Com base nesta premissa, uma fonte de corrente, denominada “imagem”, é adicionada ao meio anteriormente composto por ar (a uma distância espelhada da fonte de corrente original) e, nestas condições, procede-se o cálculo do potencial. A Figura 2.15 ilustra a concepção ora considerada.

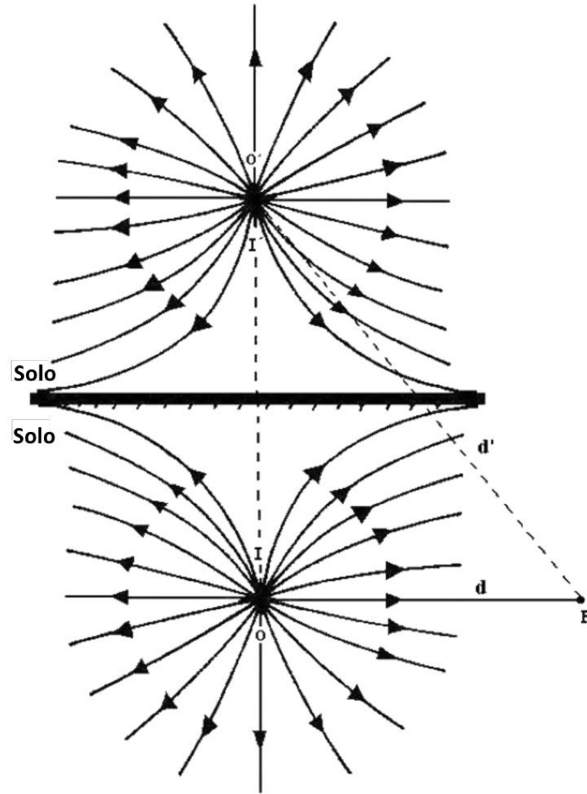


Figura 2.15: Método das imagens aplicado em sistemas de aterramento

Com base no exposto segue que as expressões (2.75) e (2.76) passam a se apresentar como mecanismo para o cálculo dos potenciais em substituição às expressões (2.73) e (2.74), respectivamente.

$$dV = \frac{\rho_{soil}}{4\pi} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} \right) dI \quad (2.75)$$

$$V = \frac{\rho_{solo}}{4\pi} \int \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} \right) dI \quad (2.76)$$

Nas equações anteriores d' é a distância entre o ponto P e a fonte imagem de corrente (m).

Seccionando o eletrodo e sua imagem em segmentos elementares Δs (Figura 2.16), pode-se calcular o potencial em um ponto V_j da superfície dos condutores de aterramento, considerando que as correntes pontuais estejam em seu centro.

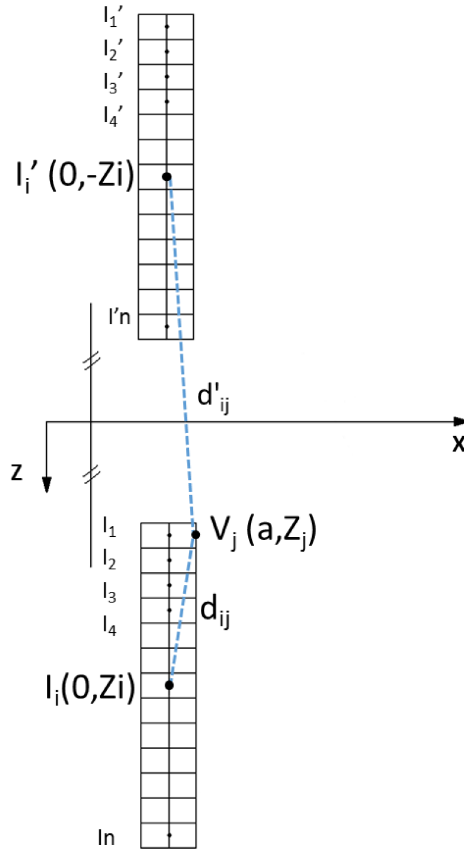


Figura 2.16: Eletrodo de aterramento vertical e sua respectiva representação geométrica

Onde:

- Z_i - Profundidade da fonte de corrente I_i em (m);
- Z_j - Profundidade do ponto V_j em (m);
- d_{ji} - Distância entre o ponto V_j e a fonte de corrente I_i , em (m);
- d'_{ji} - Distância entre o ponto V_j a fonte de corrente imagem I'_i , em (m);
- a - Raio do condutor em (m).

Para o cálculo do potencial V_{ji} , devido a fonte de corrente I_i e I'_i , utiliza-se a expressão (2.77).

$$V_{ji} = \frac{\rho_{solo}}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{(z_j - z_i)^2 + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{(z_j + z_i)^2 + a^2}} \right) I_i \quad (2.77)$$

Onde V_{ji} é o potencial no ponto V_j devido a fonte de corrente I_i e sua respectiva imagem I'_i , em (V).

Representado os termos constituintes da expressão (2.77) entre parênteses pelas variáveis d_{ji} e d'_{ji} obtém-se:

$$V_{ji} = \frac{\rho_{solo}}{4\pi} \left(\frac{1}{d_{ji}} + \frac{1}{d'_{ji}} \right) I_i \quad (2.78)$$

A equação (2.78) pode ser readequada, conforme a expressão (2.79).

$$I_i \left(\frac{1}{d_{ji}} + \frac{1}{d'_{ji}} \right) = \frac{V_{ji}}{\frac{\rho_{solo}}{4\pi}} \quad (2.79)$$

Visando o processo de cálculo da distribuição de corrente, a metodologia utilizada consiste numa sistemática iterativa, a qual parte de uma condição hipotética tal que o segundo termo da relação anterior, para uma situação inicial, corresponda a um valor unitário. Assim procedendo o potencial constante na superfície do eletrodo é iniciado nos termos estabelecidos pela expressão (2.80).

$$V_{ji} = \frac{\rho_{solo}}{4\pi} \quad (2.80)$$

À luz do fato que todas as fontes pontuais de corrente distribuídas no eletrodo contribuem para o potencial, substituindo (2.80) em (2.79) obtém-se:

$$\sum_{i=1}^n I_i \left(\frac{1}{d_{ji}} + \frac{1}{d'_{ji}} \right) = 1 \quad (2.81)$$

Onde n é o número de fontes pontuais distribuídas ao longo do eletrodo.

Ainda, adotando o termo entre parêntesis da equação (2.81) como a_{ji} , conforme (2.82), e ainda variando j e i de 1 à n , chega-se a expressão matricial (2.83).

$$a_{ji} = \left(\frac{1}{d_{ji}} + \frac{1}{d'_{ji}} \right) \quad (2.82)$$

$$[I_i][a_{ji}] = [1] \quad (2.83)$$

A partir de tal sistema de equações, é possível determinar a distribuição de corrente no aterramento, cujo somatório representa a corrente total do aterramento, conforme (2.84). Deste modo, a resistência do aterramento pode ser obtida através de (2.85). Vale ressaltar que tanto os eletrodos verticais quanto os horizontais podem ser contemplados na representação, bastando para tanto posicionar corretamente os pontos de cálculo do potencial da superfície do eletrodo.

$$I_{total} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (2.84)$$

$$R = \frac{\rho_{solo}}{4\pi I_{total}} \quad (2.85)$$

Para considerar o efeito da ionização do solo no Modelo das Imagens, considera-se que, na região em que se estabelece canais ionizados, a resistividade é praticamente nula. Nestas circunstâncias, pode-se imaginar que o eletrodo imerso possa ser considerado com um expressivo aumento em sua secção transversal. À medida que a corrente elétrica que circula no sistema de aterramento tem o seu valor alterado, a área da região dos canais ionizados também se altera, fato este que conduz a uma variação dinâmica no valor da resistência do aterramento.

A título de ilustração, a Figura 2.17 mostra uma sequência de instantes de tempo de uma descarga e a visão física associada com o desempenho do Modelo das Imagens aqui considerado.

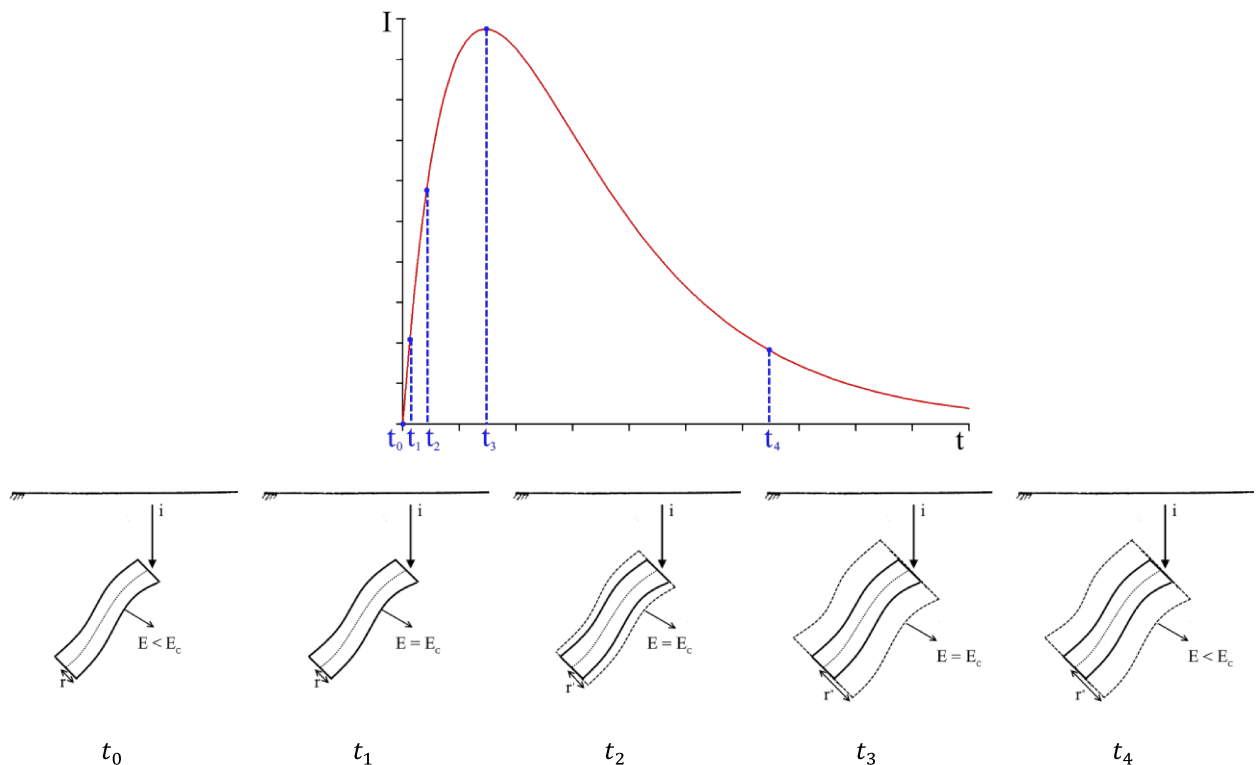


Figura 2.17: Correlação entre a incidência de uma descarga atmosférica num eletrodo e o desempenho do Modelo das Imagens

A Figura 2.17 evidencia as seguintes etapas do processo:

- No instante t_0 a corrente de descarga atinge o eletrodo e se apresenta com um valor insuficiente para a produção de um campo elétrico capaz de ionizar o solo. Desta

forma a resistência de aterramento é calculada normalmente, considerando o raio original do eletrodo;

- Em t_1 a corrente atinge um valor suficiente para provocar a formação de um campo elétrico na superfície do condutor com potencial para a ionização do solo (E_c). Ainda nesta etapa, o valor da resistência não foi alvo de alterações;
- À partir de t_1 , com a continuidade do aumento da corrente, o valor do campo elétrico na superfície do condutor supera o valor E_c . Isto ocasiona um início de ionização da região de solo circundante ao eletrodo, respeitada a limitação imposta pela superfície do solo. Diante disto, a região no entorno do eletrodo se comporta como um condutor fictício de raio r' , fato este que permite obter a nova resistência de aterramento do mesmo;
- No intervalo de tempo compreendido entre t_2 para t_3 o fenômeno se intensifica. Em t_3 a corrente da descarga assume seu valor máximo, o condutor fictício assume seu raio máximo e , conseqüentemente, a resistência de aterramento apresenta-se com seu valor mínimo. É importante ressaltar que o campo elétrico na superfície do condutor fictício, entre os instantes t_1 e t_3 , é igual ao campo elétrico crítico E_c ;
- Por fim, o processo segue com expressivos e rápidos decréscimos da corrente, todavia, sem que haja imediatas variações na recomposição das características originais do solo. Isto resulta em que a resistência de aterramento permanece no valor mínimo até praticamente a extinção da descarga.

Do exposto fica evidenciado que o processo passa, necessariamente, por cálculos sucessivos do campo elétrico no solo circundante ao aterramento. Para tanto, considera-se que a direção resultante dos campos elétricos devido as fontes de correntes pontuais sejam normais às mesmas, hipótese esta que tem se mostrado uma razoável aproximação, conforme será constatado ao longo dos estudos de caso explorados nesta tese.

Para a obtenção do campo elétrico em um dado ponto P_j , a partir do gradiente de potencial em relação à direção normal, utiliza-se a expressão (2.86), na qual X_n representa a direção normal à superfície lateral do aterramento.

$$E_N(P_j) = -\frac{\partial V_{Pj}}{\partial X_n} \quad (2.86)$$

Considerando que a corrente de cada segmento esteja concentrada em seu centro, como já mencionado, então o potencial V_{Pj} no ponto P_j , oriundo das correntes I_i como suas respectivas imagens I'_i , pode ser obtido através da expressão (2.87), análoga a equação (2.78).

$$V_{Pj} = \frac{\rho_{solo}}{4\pi} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_{Pi}} + \frac{1}{d'_{Pi}} \right) I_i \quad (2.87)$$

A correlação entre as correntes pontuais I_i com a corrente total I utiliza-se a expressão (2.88).

$$P_i = \frac{I_i}{I_{total}} \quad (2.88)$$

Onde P_i é o fator de distribuição de corrente em cada segmento elementa, representando a distribuição de corrente ao longo das seções que compõem o eletrodo e I_e é a corrente injetada no sistema (A). Utilizando (2.86), (2.87) e (2.88) tem-se que o campo elétrico é:

$$E_N(P_j) = -\frac{I_e \rho_{solo}}{4\pi} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_{Pi}} + \frac{1}{d'_{Pi}} \right)' P_i \quad (2.89)$$

Onde:

$$\left(\frac{1}{d_{Pi}} + \frac{1}{d'_{Pi}} \right)' = \frac{\partial a_{Pji}}{\partial X_n} \quad (2.90)$$

Utilizando (2.89) e (2.90), pode-se obter a expressão completa do campo elétrico a seguir. Vale ressaltar que r_f corresponde a um raio fictício do eletrodo em (m):

$$E_N(P_j) = \frac{I_e \rho_{solo} P_i}{4\pi} \left(\frac{r_f}{(r_f^2 + (z_j + z_i)^2)^{1.5}} + \frac{r_f}{(r_f^2 + (z_j - z_i)^2)^{1.5}} \right) \quad (2.91)$$

Adicionalmente, o Modelo das Imagens permite considerar solos heterogêneos compostos por duas camadas horizontais, com resistividades distintas e constantes, caracterizadas por ρ_1 e ρ_2 , respectivamente. Para contemplar tais situações, torna-se necessário algumas adequações das formulações, conforme proposto por [116] e sintetizado na sequência.

Em consonância com o estabelecido na citada referência, supondo uma fonte pontual de corrente na primeira camada, o espalhamento da mesma, ao sair da primeira camada para a segunda,

terá um comportamento dependente dos valores de suas respectivas resistividades, conforme ilustrado na Figura 2.18.

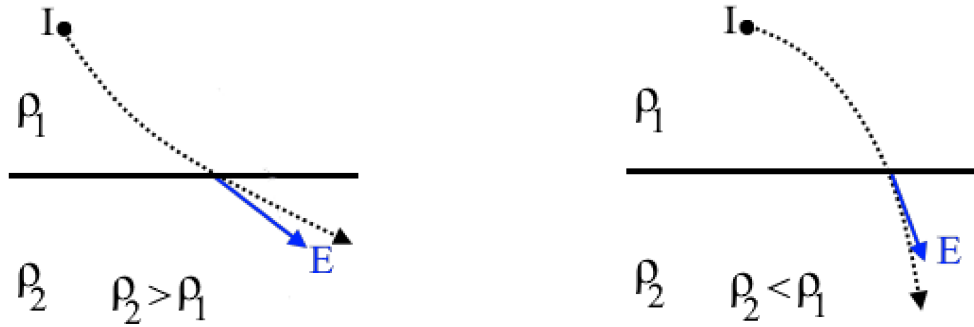


Figura 2.18: Espalhamento das correntes em meios de resistividade diferentes

Para o caso de $\rho_2 > \rho_1$, visto que a corrente, ao chegar na segunda camada, enfrenta uma resistividade maior, penetra com maior dificuldade, isto resulta que sua direção de espalhamento tende a ficar mais no plano horizontal. Para uma situação inversa quando aos valores das resistividades, a corrente se distribui com maior facilidade quando atinge a segunda camada. Nestas condições há uma tendência para a direção vertical.

Para se obter a mesma configuração das linhas de corrente da Figura 2.18, pode-se utilizar um artifício na forma de uma substituição da resistividade da segunda camada por ρ_1 e, complementarmente, a inserção da imagem da fonte de corrente I com relação a superfície de separação das camadas com intensidade kI . A constante k ora referida é dada por:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.92)$$

Este artifício se apresenta consonante com os princípios estabelecidos pelo Modelo das Imagens, ressalvadas as alterações nas magnitudes das fontes de corrente imagem. A Figura 2.19 ilustra que a superposição do objeto e imagem resulta no deslocamento desejado para as linhas de corrente. Para uma fonte de corrente na segunda camada, o procedimento é análogo.

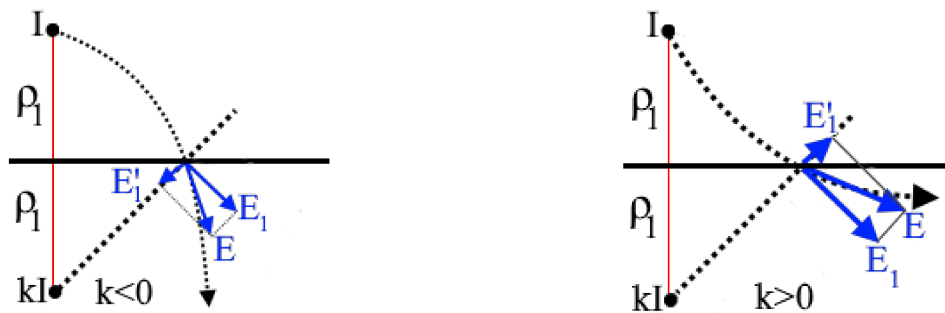


Figura 2.19: Modelo das Imagens para uma fonte de corrente na primeira camada – solo heterogêneo

Portanto, para levar em consideração o efeito das duas camadas horizontais de resistividade ρ_1 e ρ_2 , respectivamente, basta utilizar um solo homogêneo e infinito de resistividade ρ_1 considerando a fonte I e sua imagem kI .

Assim sendo, com o objetivo de analisar simultaneamente o efeito das duas camadas e da superfície do solo (Figura 2.15), o MI é modificado de acordo com a posição da fonte de corrente e e do ponto onde se deseja obter o valor do potencial devido à fonte.

Para o caso da fonte de corrente I na primeira camada e o ponto de cálculo desejado para o cálculo seja J , também na primeira camada (Figura 2.20), pode-se representar o sistema como um solo de resistividade infinita, de valor ρ_1 , e adicionar as fontes kI conforme a Figura 2.21. O procedimento detalhado para obtenção da amplitude das fontes de correntes é esclarecido em [116]. Vale destacar que esta situação, denominada por 1, representa uma primeira de quatro passíveis de cálculo.

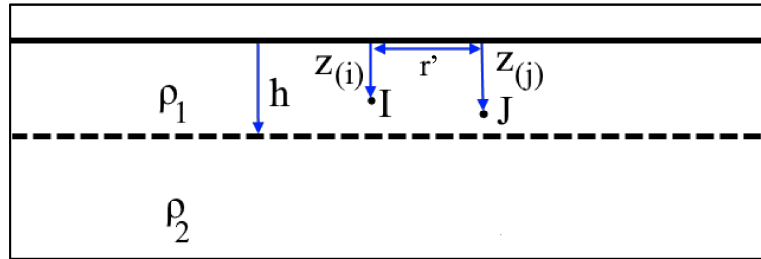


Figura 2.20: Fonte de corrente e ponto de cálculo desejado na primeira camada – Situação 1

Onde:

- $Z_{(j)}$ - Profundidade do ponto J em (m);
- $Z_{(i)}$ - Profundidade da fonte de corrente em (m);
- h - Espessura da primeira camada em (m);
- r' - Distância entre a fonte de corrente I e o ponto J , em (m).

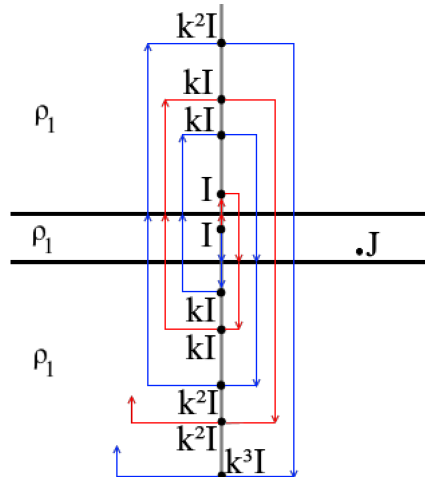


Figura 2.21: Amplitude das fontes de corrente imagem para a situação 1

Baseando-se na Figura 2.21, obtém-se a expressão (2.93), que permite calcular o potencial V_{ji} para a situação em foco.

$$V_{ji} = \frac{I_i \rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{(r^2 + (z_j \pm z_i)^2)}} + \sum_{m=1}^{\infty} k^m \left[\frac{1}{\sqrt{(r^2 + (\pm z_j \pm z_i + 2mh)^2)}} \right] \right) \quad (2.93)$$

Um outro procedimento de cálculo refere-se ao que denomina por situação 2. Nesta, a fonte de corrente se encontra na primeira camada e o ponto focado para o cálculo do potencial encontra-se na segunda camada. Novamente, para representação pelo MI, se faz necessária modificações das amplitudes das fontes de corrente imagem, como destacado na Figura 2.22.

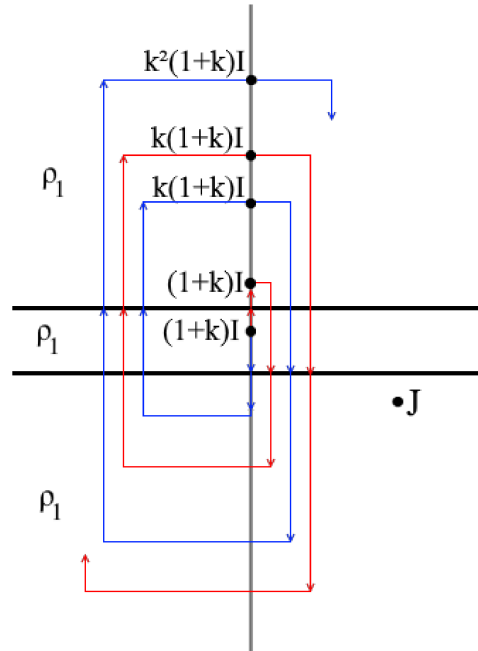


Figura 2.22: Amplitude das fontes de corrente imagem para a situação 2

Analogamente ao procedimento anterior, chega-se a:

$$V_{ji} = \frac{I_i \rho_1 (1 + k)}{4\pi} \left(\sum_{m=0}^{\infty} \frac{k^m}{\sqrt{(r^2 + (z_j \pm z_i + 2mh)^2)}} \right) \quad (2.94)$$

A denominada situação 3 compreende uma condição tal que a fonte de corrente e o ponto desejado de cálculo se encontram, ambos, na segunda camada. A obtenção das amplitudes das fontes de correntes imagens é ilustrada na Figura 2.23.

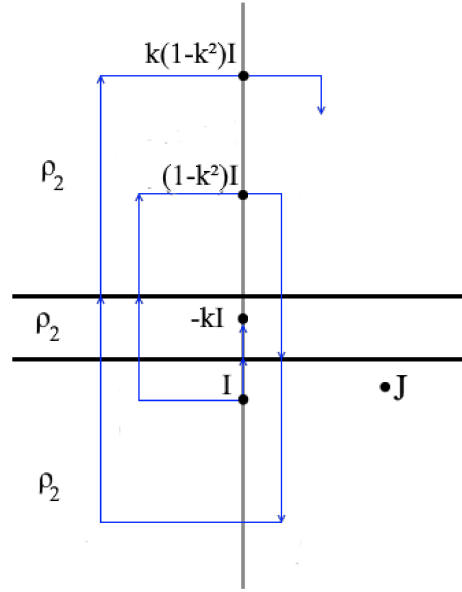


Figura 2.23: Amplitude das fontes de corrente imagem para a situação 3

Para esta condição deve-se empregar a expressão (2.95).

$$V_{ji} = \frac{I_i \rho_2}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{(r^2 + (z_j - z_i)^2)}} - \frac{k}{\sqrt{(r^2 + (z_j + z_i - 2h)^2)}} + (1 - k^2) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{k^m}{\sqrt{(r^2 + (z_j + z_i + 2mh)^2)}} \right) \quad (2.95)$$

Finalmente, quando a fonte de corrente se encontra na segunda camada e o ponto de cálculo desejado na primeira, aqui identificado como situação 4, a obtenção da amplitude das fontes de correntes imagens se apresenta consonante com a Figura 2.24.

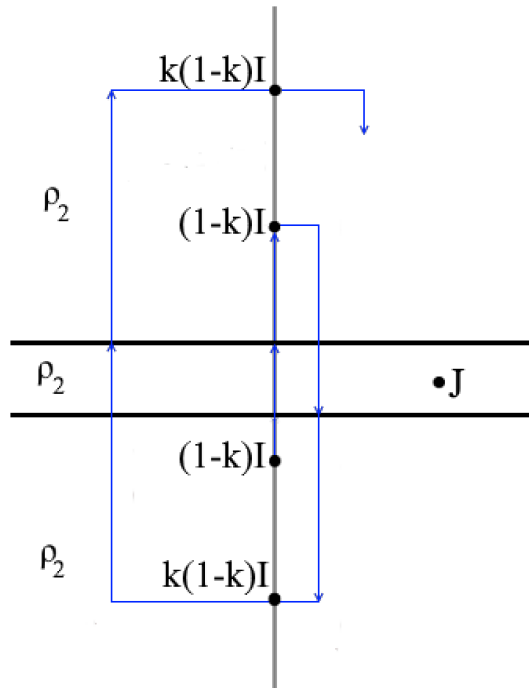


Figura 2.24: Amplitude das fontes de corrente imagem para a situação 4

A expressão (2.96) permite calcular o potencial no ponto J para este último caso.

$$V_{ji} = \frac{I_i \rho_2 (1 - k)}{4\pi} \left(\sum_{m=0}^{\infty} \frac{k^m}{\sqrt{(r^2 + (z_i \pm z_j + 2mh)^2)}} \right) \quad (2.96)$$

As expressões (2.93), (2.94), (2.95) e (2.96) se apresentam pois como meios para os cálculos dos potenciais, em substituição ao proposto pela expressão (2.77). Assim procedendo torna-se possível realizar os cálculos da resistência de aterramento.

Para a inserção do efeito de ionização do solo heterogêneo de 2 camadas horizontais, torna-se imperativo o cálculo dos campos elétricos nas vizinhanças do aterramento. Para tanto, a modelagem é a mesma já descrita para um solo homogêneo, bastando substituir a expressão (2.87) pelas expressões (2.93), (2.94), (2.95) e (2.96), dependendo da posição do ponto onde se deseja calcular o potencial.

As equações (2.97), (2.98), (2.99) e (2.100) permitem, respectivamente às situações 1, 2, 3 e 4, os correspondentes cálculos dos campos elétricos:

$$E_N(P_j) = \frac{I_e \rho_1 P_i}{4\pi} \left(\frac{r_f}{(r_f^2 + (z_j \pm z_i)^2)^{1.5}} + \sum_{m=1}^{\infty} k^m \left[\frac{r_f}{(r_f^2 + (\pm z_j \pm z_i + 2mh)^2)^{1.5}} \right] \right) \quad (2.97)$$

$$E_N(P_j) = \frac{I_e \rho_1 P_i}{4\pi} (1 + k) \left(\sum_{m=0}^{\infty} k^m \left[\frac{r_f}{(r_f^2 + (z_j \pm z_i + 2mh)^2)^{1.5}} \right] \right) \quad (2.98)$$

$$E_N(P_j) = \frac{I_e \rho_2 P_i}{4\pi} \left(\frac{r_f}{(r_f^2 + (z_j - z_i)^2)^{1.5}} - \frac{(rf)(k)}{(r_f^2 + (z_j + z_i - 2h)^2)^{1.5}} \right. \\ \left. + (1 - k)^2 \left(\sum_{m=0}^{\infty} k^m \left[\frac{r_f}{(r_f^2 + (z_j + z_i + 2mh)^2)^{1.5}} \right] \right) \right) \quad (2.99)$$

$$E_N(P_j) = \frac{I_e \rho_2 P_i}{4\pi} (1 - k) \left(\sum_{m=0}^{\infty} k^m \left[\frac{r_f}{(r_f^2 + (\pm z_j + z_i + 2mh)^2)^{1.5}} \right] \right) \quad (2.100)$$

2.4 Análise crítica dos modelos de aterramento

Os modelos contemplados anteriormente, que totalizaram 13 possíveis propostas para implementação no APR, podem, ainda, ser agrupados em duas grandes categorias: aqueles que necessitam de constantes de correlação e os demais que não requerem tal imposição.

O primeiro grupo (G1) necessita, para seus procedimentos de cálculo, parâmetros oriundos de experimentos realizados *à priori*. Tais constantes são obtidas através de ajustes feitos nas equações de cada método e, posteriormente, estes resultados são então empregados como dados de entrada para os métodos. Os modelos 6, 7, 8, 9, 10 e 11 se encontram inseridos neste contexto.

O segundo (G2) não exige tais informações, sendo assim independentes de experimentos prévios. Os modelos 1, 2, 3, 4, 5, 12 e 13 fazem parte deste conjunto.

A Tabela 2.1 exemplifica as constantes de correlação para todos os modelos explorados nesta tese.

Tabela 2.1: Constantes de correlação requeridas pelos modelos de aterramento

Constantes de correlação	Modelos												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
τ_1	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	-	-
τ_2	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	-	-
α	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-
λ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-
β_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-
β_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-

Deste modo, para a realização de estudos de desempenho à luz de resultados experimentais diversos, a parametrização dos modelos que dependem de constantes de correlação se mostra mais complexa devido à dificuldade de obtenção de informações ou dados de entrada para atender as demandas das formulações. Tendo em vista tais limitações, optou-se pela utilização dos modelos do segundo grupo (G2).

2.5 Avaliação de desempenho dos modelos de sistemas de aterramento

Uma vez apresentado o conjunto de modelagens encontradas na literatura resta, para o momento, realizar estudos de desempenho das mesmas visando, sobretudo, a constatação do grau de aderência dos modelos à realidade do campo. Para tanto, a estratégia empregada neste trabalho se apoiou nos seguintes princípios:

- Identificação e estabelecimento de uma base de dados fundamentada em experimentos conduzidos em campo, a qual será adotada como padrão para os estudos avaliativos, e que contém as informações requeridas pelos modelos matemáticos e resultados numéricos que permitam uma pronta correlação com os desempenhos computacionais das representações em foco;
- Implementação dos modelos supra descritos numa plataforma computacional utilizando técnicas de modelagem no domínio do tempo, em consonância com os requisitos impostos por alguns procedimentos estabelecidos. Para tanto, a opção aqui feita recaiu sobre duas plataformas. O simulador ATP, o qual, conjuntamente com seus recursos disponibilizados através da rotina MODELS e sua estrutura já adequada para os estudos de PIDs se apresenta fortemente atrativa. Complementarmente, os trabalhos são também conduzidos através da plataforma MATLAB, em conjunto com o ATP;
- Realização de estudos, nos termos definidos pela base de dados, através dos quais é possível o estabelecimento de meios comparativos objetivando a constatação do grau de aderência entre os desempenhos computacionais e experimentais, afim da definição da melhor estratégia de modelagem a ser utilizada para os fins do presente trabalho.

2.5.1 Resultados experimentais

Para o estabelecimento da base de dados foram empregados os resultados de estudos experimentais conduzidos em [61], [117]–[121]. Estes oferecem respostas experimentais alicerçadas numa estrutura física composta por uma haste de aterramento vertical, com as características apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Características do aterramento utilizado nos ensaios experimentais

Experimento	Resistividade do solo [Ω .m]	Raio do eletrodo [mm]	Comprimento do eletrodo [m]	Resistência inicial [Ω]	Campo Elétrico Crítico [kV/m]	Referência
1	87,2	12,7	3,05	23,2	127	[119]
2	157	7,94	2,16	65	200	[120]
3	310	7,94	2,44	133,7	70	[121]
4	42	25	1	27,3*	350	[117]
5	87,2	12,7	3,05	21,9	127	[118]

*Valor não medido, apenas calculado.

Nas mencionadas referências, através da imposição de um impulso de corrente, obtido em laboratório ou em medições de campo, obteve-se os resultados para a tensão e corrente. A partir destas

grandezas chega-se a variação da resistência do sistema de aterramento à medida que a corrente se altera. Os resultados derivados dos experimentos 1, 2, 3, 4 e 5 são indicados nas figuras subsequentes

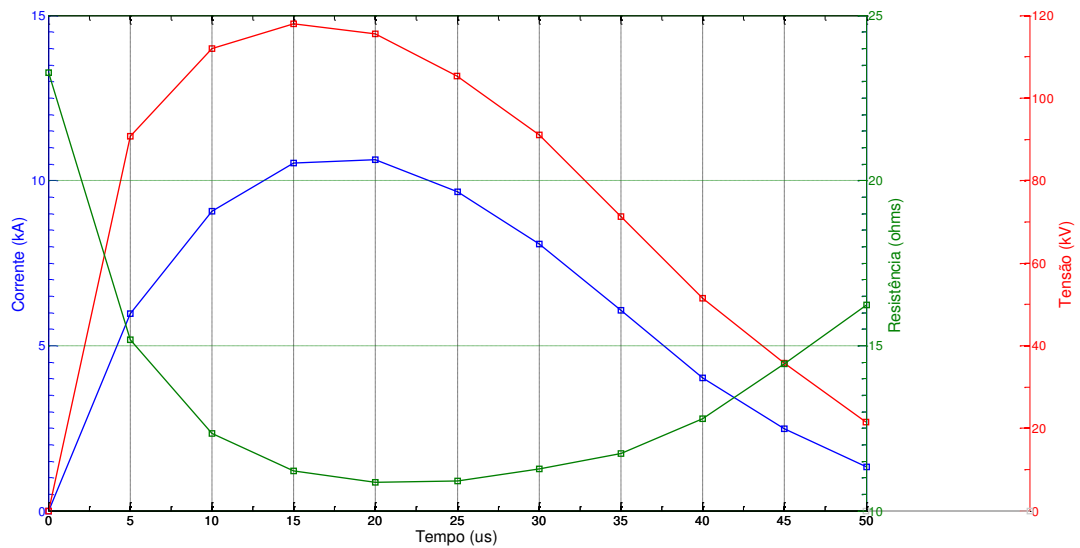


Figura 2.25: Tensão, corrente e resistência – Experimento 1

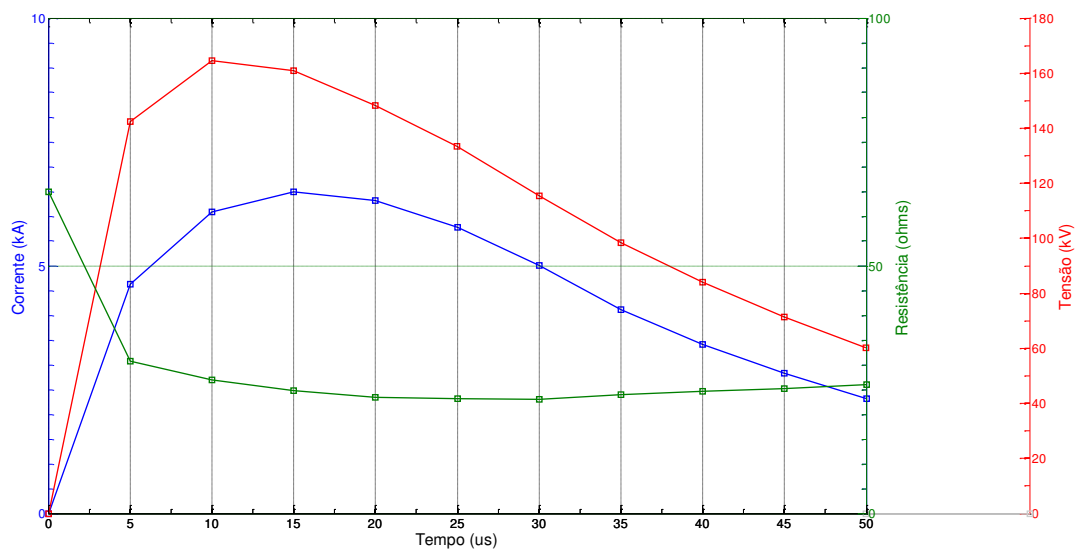


Figura 2.26: Tensão, corrente e resistência – Experimento 2

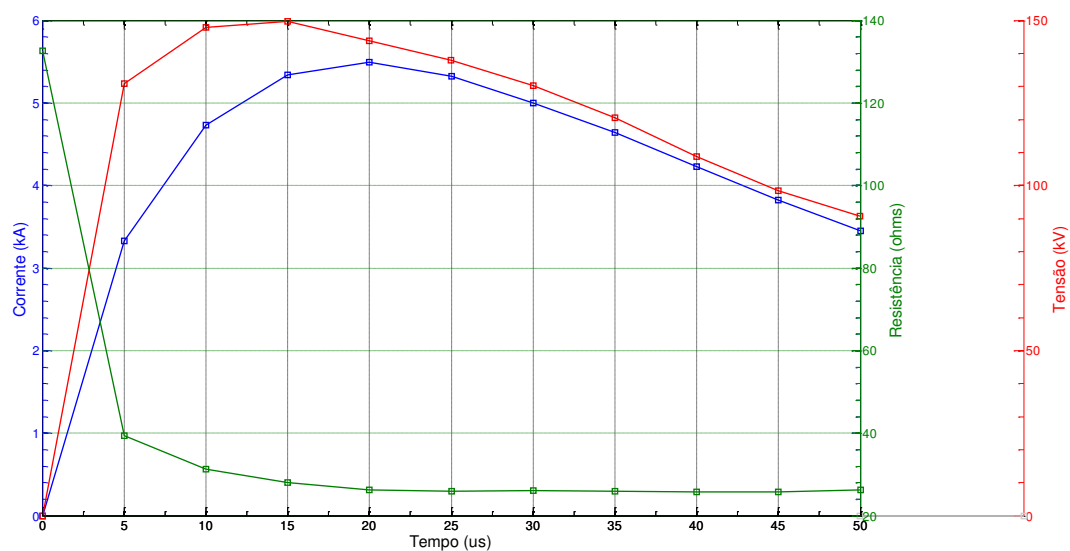


Figura 2.27: Tensão, corrente e resistência – Experimento 3

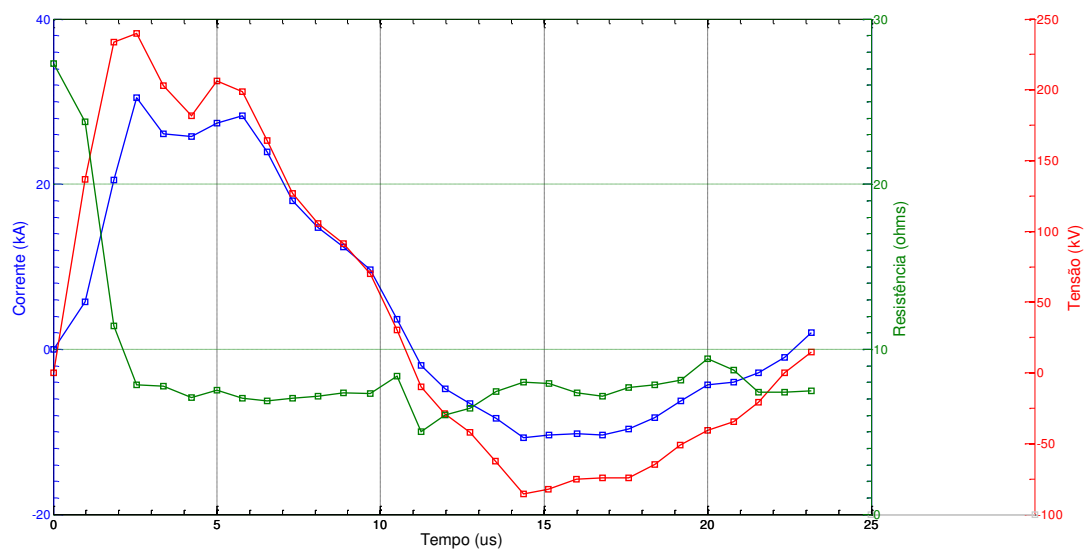


Figura 2.28: Tensão, corrente e resistência – Experimento 4

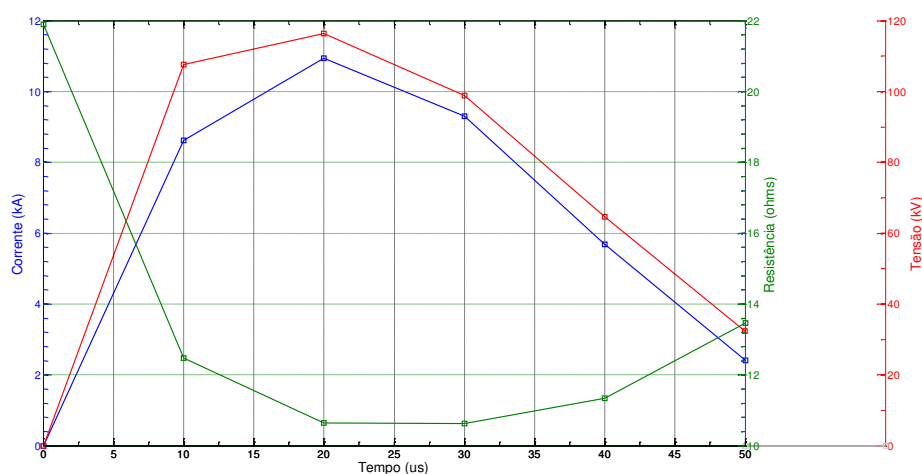


Figura 2.29: Tensão, corrente e resistência – Experimento 5

2.5.2 Resultados computacionais

As implementações computacionais dos modelos encontram-se no Anexo A e no Apêndice A, onde os modelos pertencentes ao grupo G2 foram parametrizados, empregando das informações constantes na Tabela 2.2.

No que tange aos resultados obtidos, devido a longa extensão de informações gráficas, optou-se por apresentá-los no Apêndice B. Não obstante a isto, apresenta-se, na seção subsequente, uma síntese dos desempenhos obtidos e uma correlação com os valores esperados.

2.5.3 Análise comparativa dos modelos

• Modelos 1, 2, 3 e 4

Os resultados das simulações relativas aos cinco experimentos, para os quatro primeiros modelos, podem ser analisados através das figuras apresentadas na sequência.

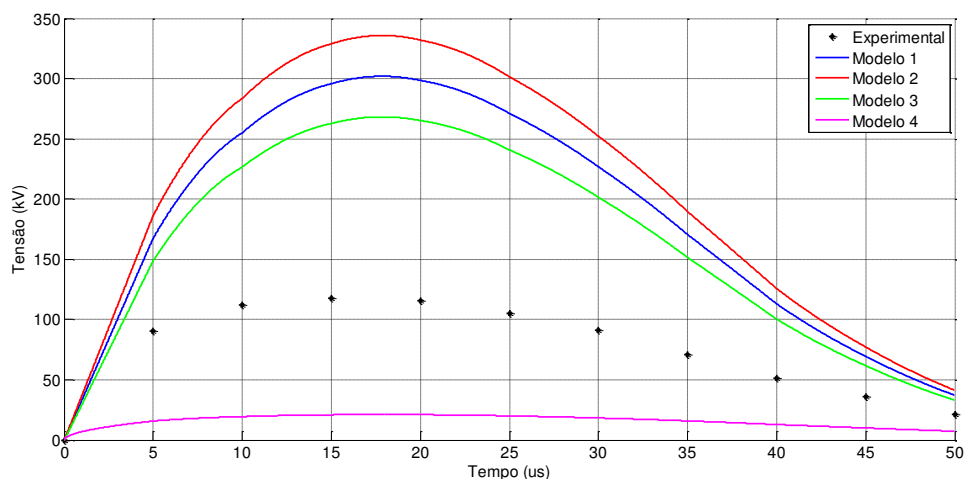


Figura 2.30: Tensão no aterramento – Experimento 1 – Modelos 1, 2, 3 e 4

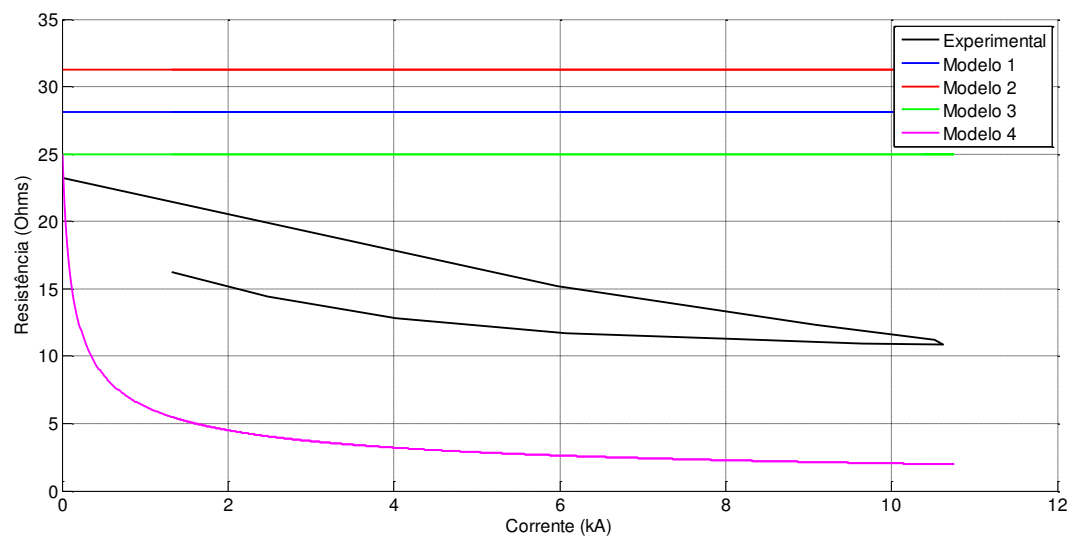


Figura 2.31: Corrente vs Resistência – Experimento 1 – Modelos 1, 2, 3 e 4

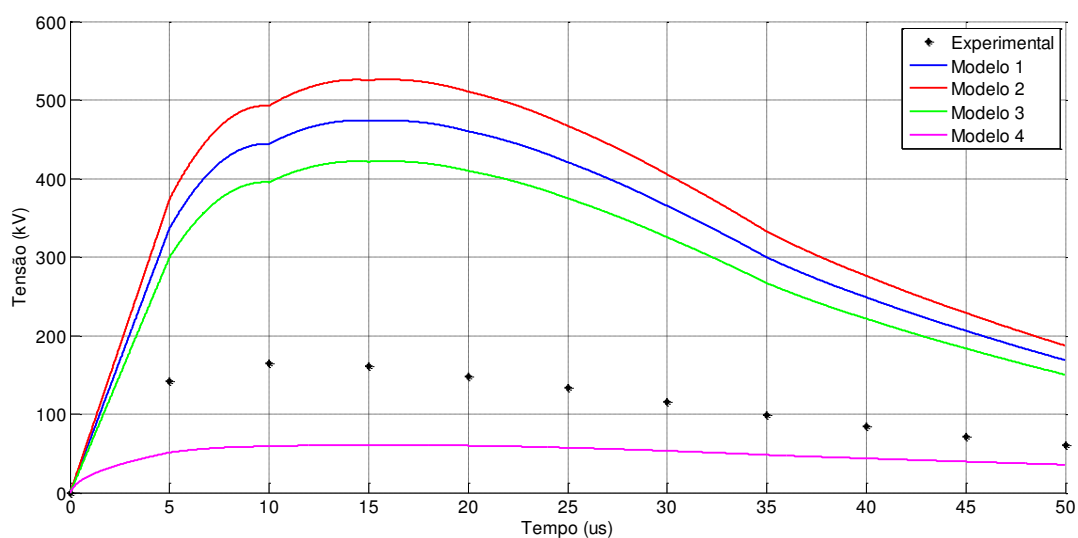


Figura 2.32: Tensão no aterramento – Experimento 2 – Modelos 1, 2, 3 e 4

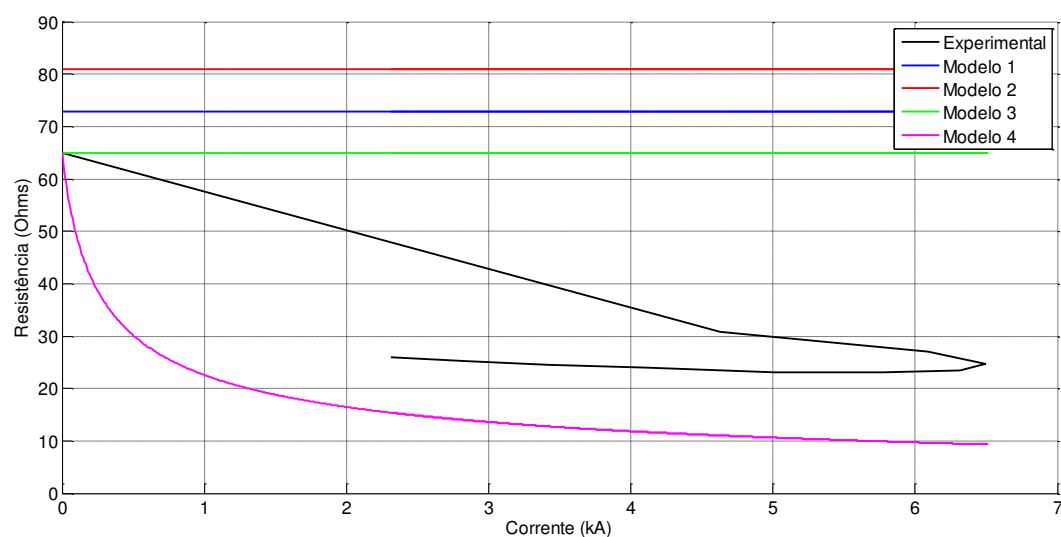


Figura 2.33: Corrente vs Resistência – Experimento 2 – Modelos 1, 2, 3 e 4

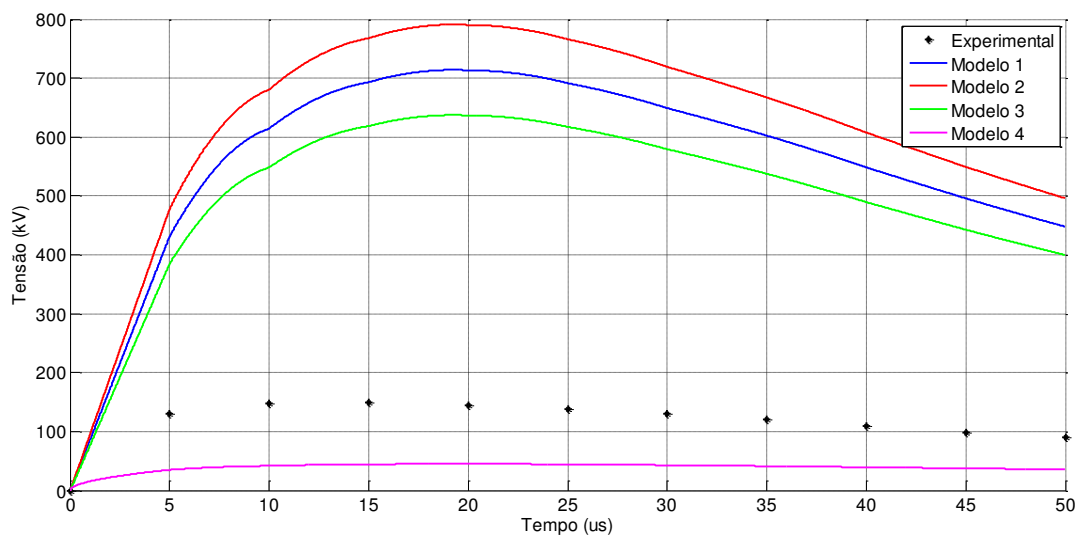


Figura 2.34: Tensão no aterramento – Experimento 3 – Modelos 1, 2, 3 e 4

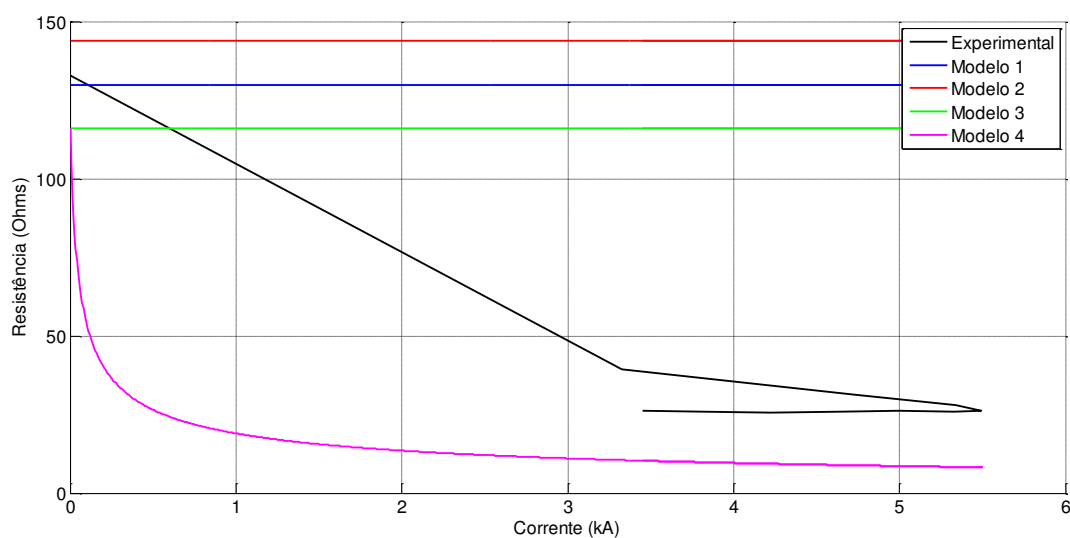


Figura 2.35: Corrente vs Resistência – Experimento 3 – Modelos 1, 2, 3 e 4

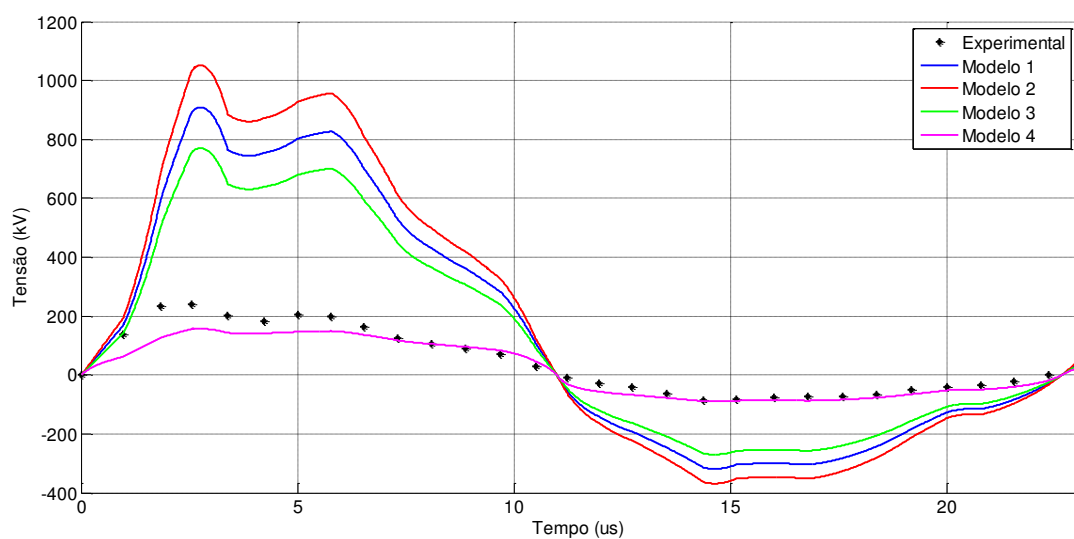


Figura 2.36: Tensão no aterramento – Experimento 4 – Modelos 1, 2, 3 e 4

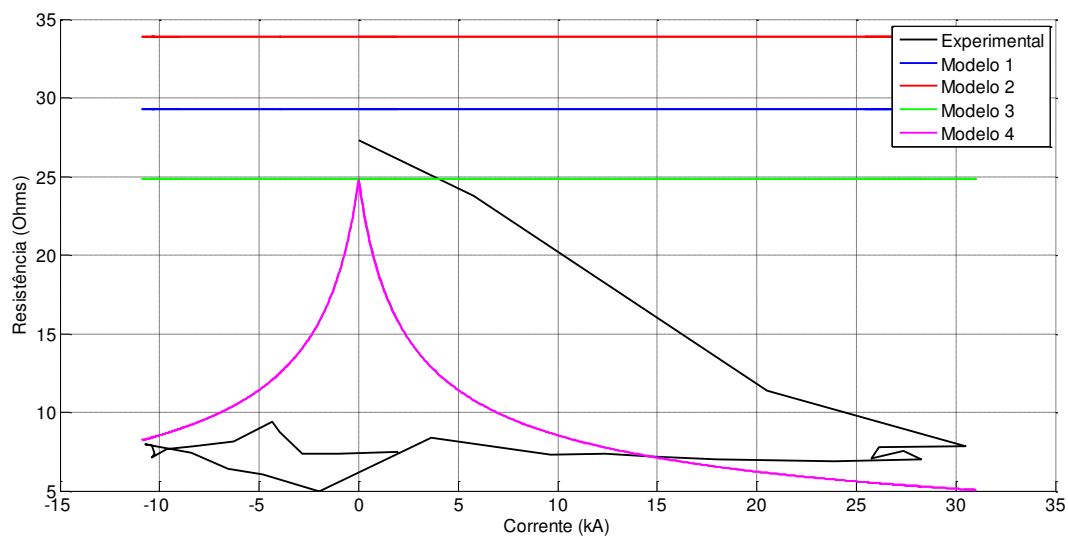


Figura 2.37: Corrente vs Resistência – Experimento 4 – Modelos 1, 2, 3 e 4

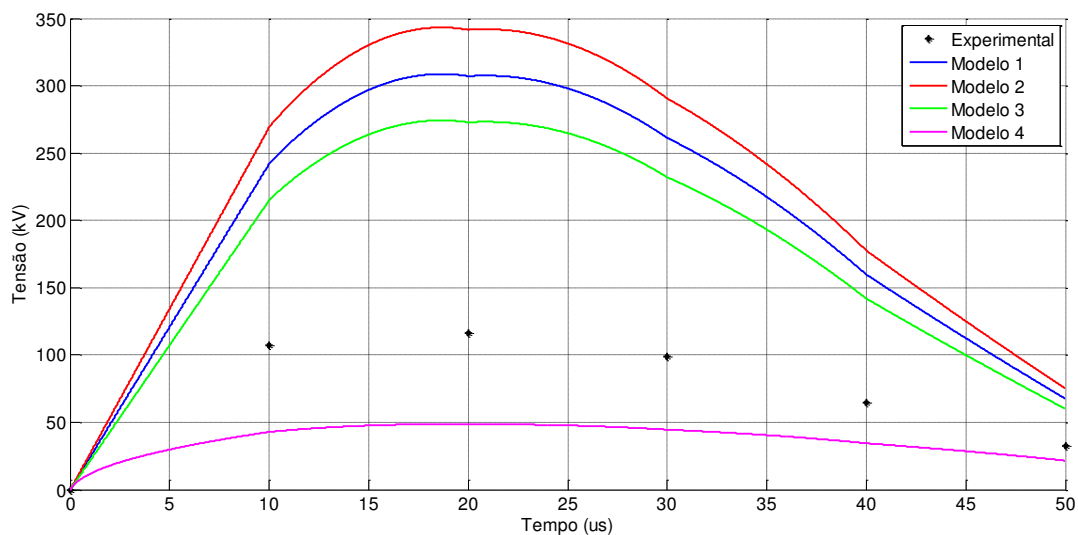


Figura 2.38: Tensão no aterramento – Experimento 5 – Modelos 1, 2, 3 e 4

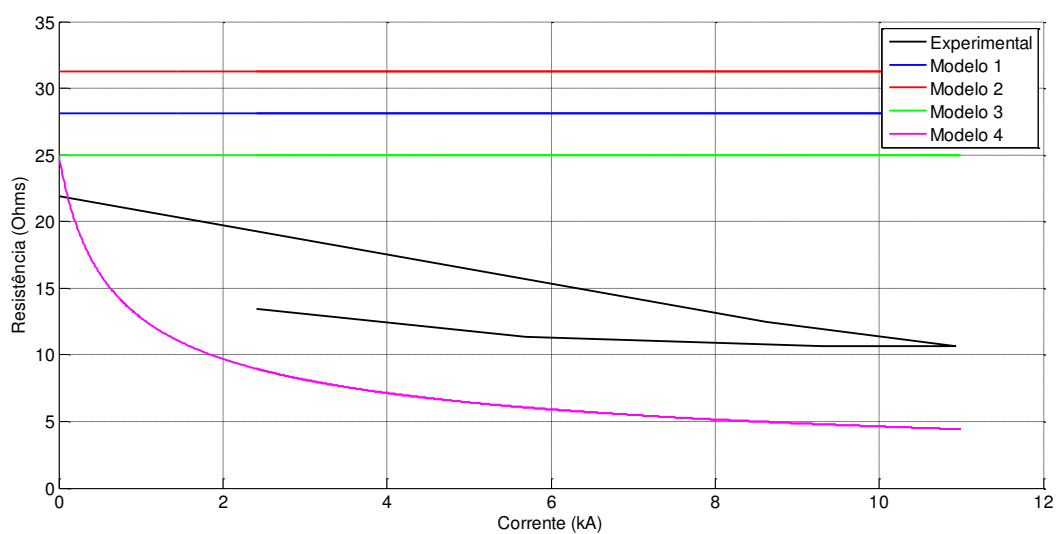


Figura 2.39: Corrente vs Resistência – Experimento 5 – Modelos 1, 2, 3 e 4

- **Modelos 5, 12 e 13**

Os modelos que apresentaram maior aderência, quando comparados aos resultados experimentais, foram os modelos 5, 12 e 13. É importante ressaltar que os modelos simulados nesta etapa foram os que não possuíam constantes de ajuste. Os resultados das simulações dos modelos, para cada experimento, podem ser obtidos na sequência.

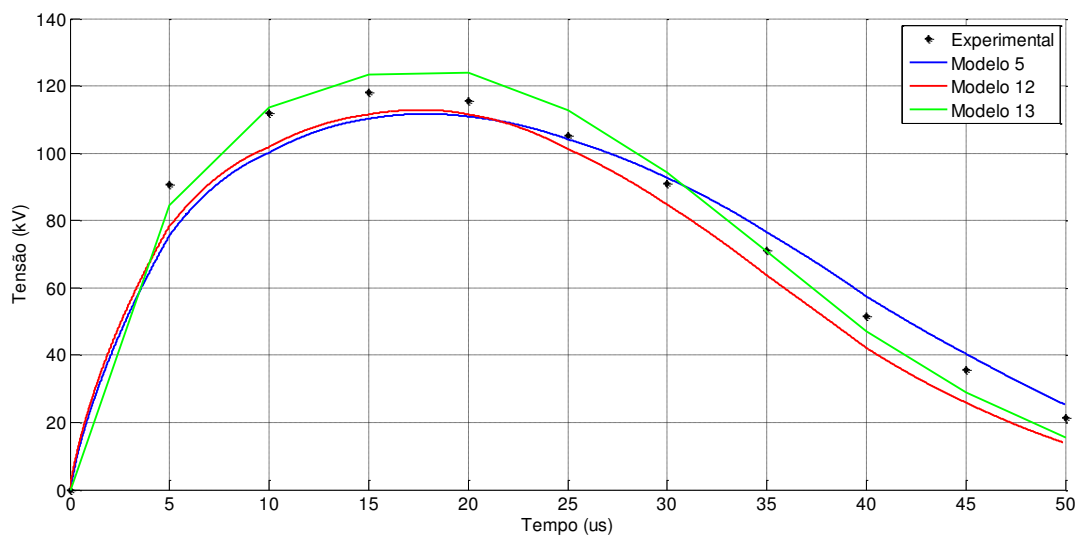


Figura 2.40: Tensão no aterramento – Experimento 1 – Modelos 5, 12 e 13

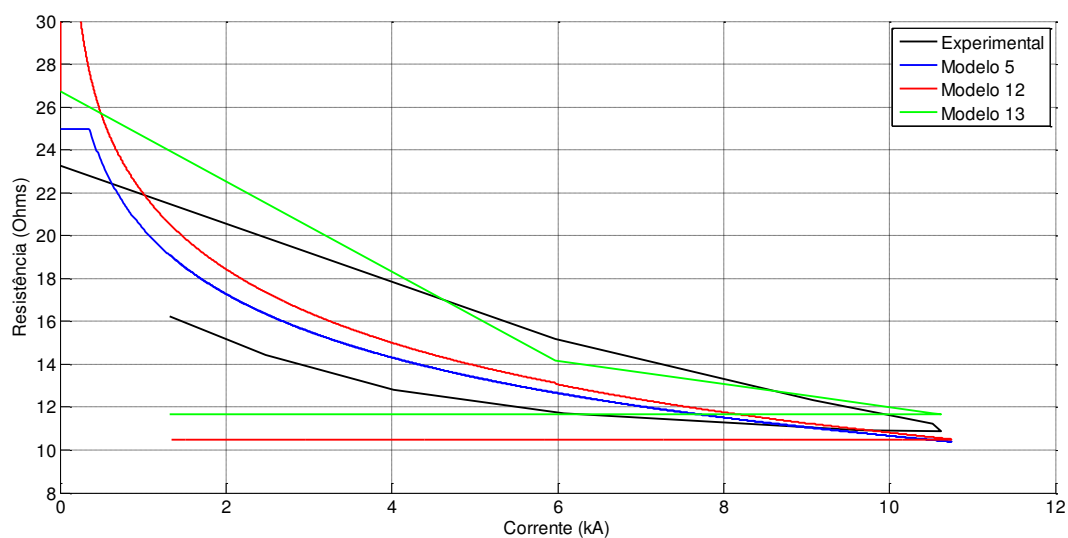


Figura 2.41: Corrente vs Resistência – Experimento 1 – Modelos 5, 12 e 13

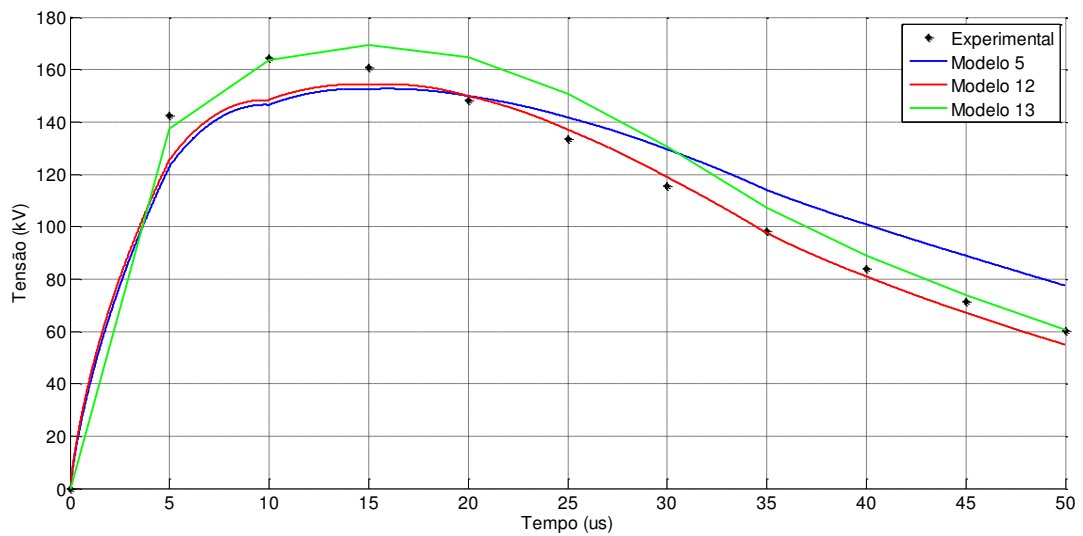


Figura 2.42: Tensão no aterramento – Experimento 2 – Modelos 5, 12 e 13

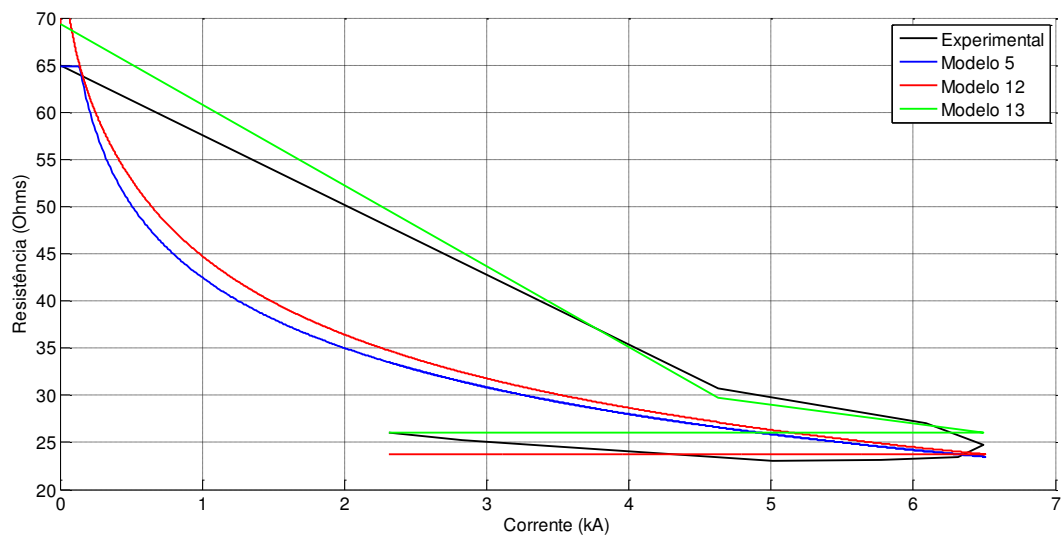


Figura 2.43: Corrente vs Resistência – Experimento 2 – Modelos 5, 12 e 13

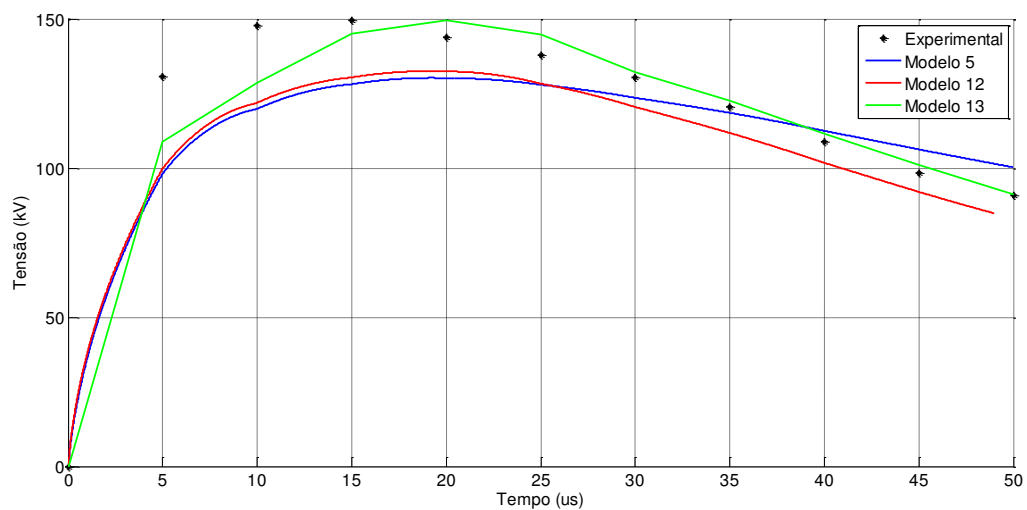


Figura 2.44: Tensão no aterramento – Experimento 3 – Modelos 5, 12 e 13

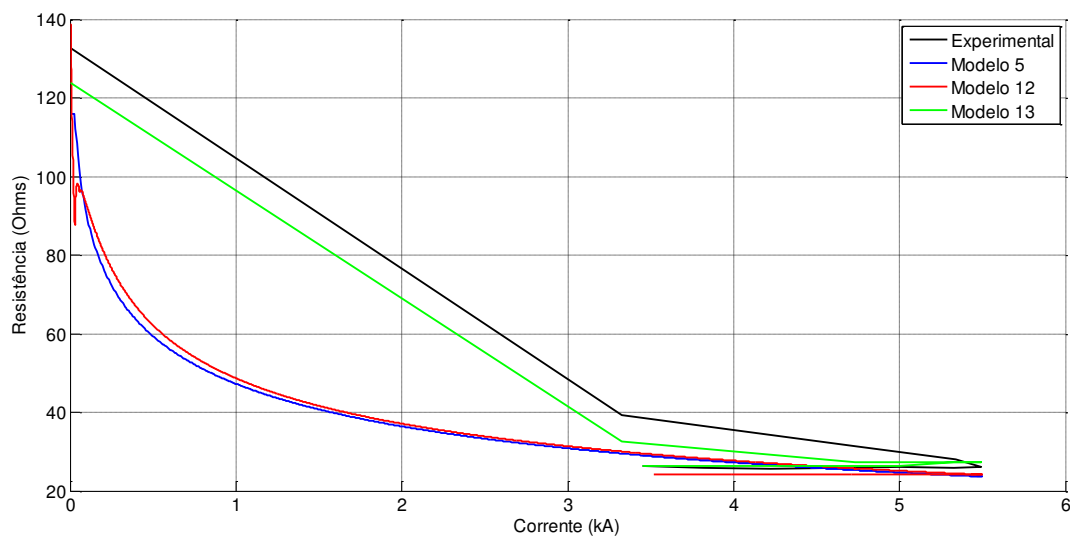


Figura 2.45: Corrente vs Resistência – Experimento 3 – Modelos 5, 12 e 13

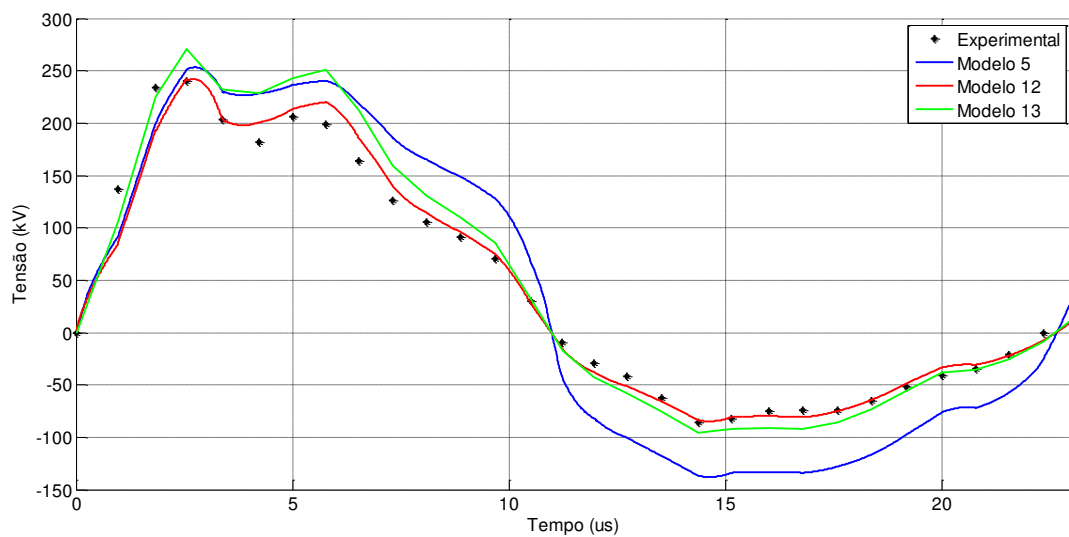


Figura 2.46: Tensão no aterramento – Experimento 4 – Modelos 5, 12 e 13

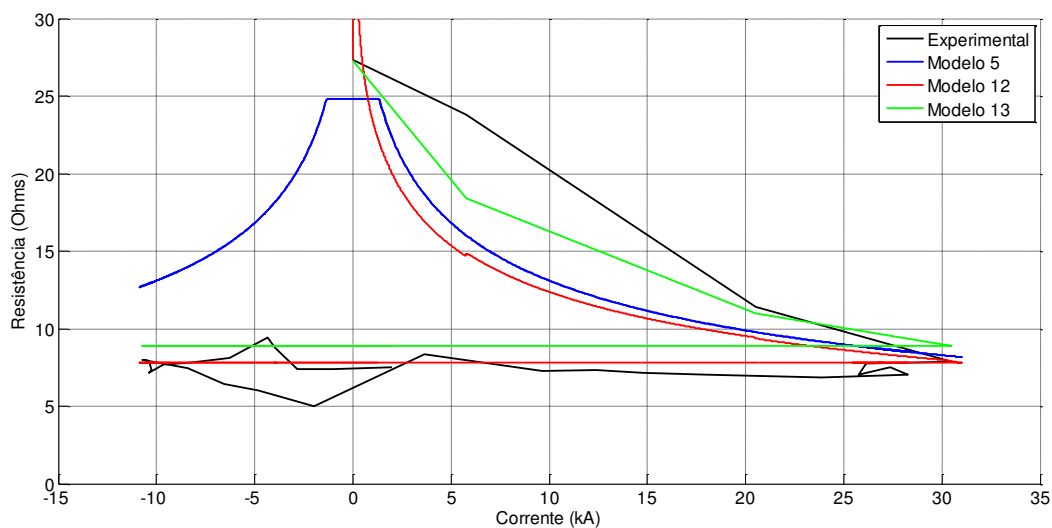


Figura 2.47: Corrente vs Resistência – Experimento 4 – Modelos 5, 12 e 13

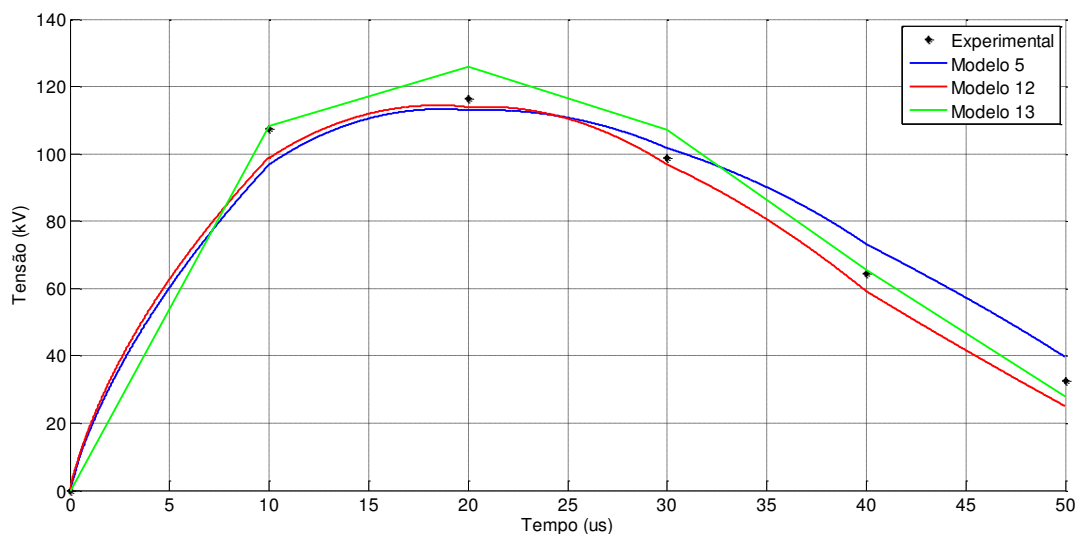


Figura 2.48: Tensão no aterramento – Experimento 5 – Modelos 5, 12 e 13

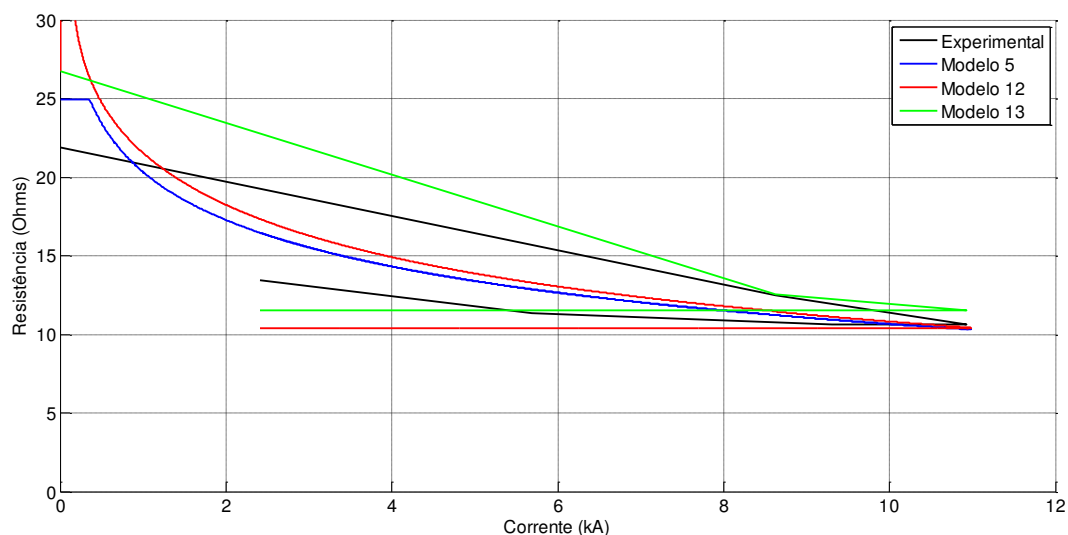


Figura 2.49: Corrente vs Resistência – Experimento 5 – Modelos 5, 12 e 13

De maneira adicional, os resultados das simulações computacionais, para cada experimento empregado como base de dados, encontram-se destacados nas tabelas encontradas no Apêndice B. Nestas, pode-se identificar, tomando por base as medições, os desvios de grandezas típicas e pontuais (maior nível de tensão atingido, valor da tensão no pico da corrente, resistência do aterramento no pico da corrente e a resistência inicial), e também, os desvios médios das resistências encontradas computacionalmente e experimentalmente.

Os desempenhos obtidos evidenciam que o Modelo 13 se mostra com maior aderência aos propósitos aqui almejados sendo, portanto, a opção utilizada para os estudos subsequentes, respeitada a similaridade dos sistemas de aterramento. Complementarmente, os demais modelos, de uma maneira geral, se mostraram mais sensíveis à pequenas mudanças dos parâmetros de entrada em

diferentes simulações realizadas, apresentando resultados bastante distoantes dos valores esperados. Tal característica não foi encontrada no Modelo 13, onde pequenas mudanças nos parâmetros de entrada impactavam em uma mesma proporção nos resultados das simulações obtidas.

Adicionalmente, a Tabela 2.3 resume e permite uma pronta correlação entre a qualidade dos resultados obtidos pelo Modelo 13 com os todos os experimentais utilizados como referência para as investigações conduzidas nesta pesquisa.

Tabela 2.3: Quadro comparativo dos resultados computacionais (Modelo 13) e experimentais

Ensaio		Tensão máxima [kV]	Tensão no instante do pico da corrente [kV]	Resistência no instante do pico da corrente [Ω]	Resistência inicial [Ω]
1	Experimental	118,00	115,50	10,87	23,26
	Computacional	124,00	124,00	11,67	26,72
2	Experimental	164,49	160,90	24,78	65,00
	Computacional	169,39	169,39	26,08	69,39
3	Experimental	149,66	143,82	26,18	132,68
	Computacional	149,44	149,44	27,20	123,81
4	Experimental	239,87	239,87	7,86	27,32*
	Computacional	270,88	270,88	8,88	27,26
5	Experimental	116,36	116,36	10,64	21,89
	Computacional	126,01	126,01	11,53	26,72

*Valor não medido, apenas calculado.

2.6 Considerações finais

Inicialmente, vale ressaltar que este capítulo foi centrado na descrição do estado da arte sobre a modelagem de sistemas de aterramento, explorando aspectos gerais associados com: definições, conceitos sobre a dependência dos parâmetros do solo com a frequência, mecanismos físicos sobre a propagação de ondas no aterramento e, o fenômeno da ionização.

Uma vez realizados estes trabalhos, de cunho didático, foram então consideradas as distintas estratégias encontradas na literatura e voltadas para a representação dos sistemas de aterramento, cujos modelos foram enquadrados nas seguintes categorias: analíticas, empíricas e numéricas. Adicionalmente, foram ainda tecidas considerações diversas sobre os fundamentos que norteiam as representações lineares e não-lineares e, sobretudo, as motivações para o emprego de um ou outro procedimento.

Como ressaltado, representações do sistema de aterramento via modelos lineares, apesar de oferecerem o benefício da simplicidade e velocidade de processamento, implicam em limitações relacionadas a inserção dos fenômenos caracterizados pela ionização do solo. De fato, dentro da filosofia aqui posta, admite-se que os eventos manifestados no sistema não proporcionam correntes circulantes nos eletrodos de aterramento com magnitudes suficiente para a ocorrência do processo de

ionização aqui referido. Ressalta-se que os modelos enquadrados nesta categoria são amplamente utilizados pelas concessionárias de energia, fato este atribuído a sua simplicidade, facilidade de obtenção de dados e rapidez da análise. Vale lembrar que foram três os modelos lineares considerados: o de Rüdenberg, o proposto por Dwight e o apresentado por Liew e Darveniza.

Objetivando a melhoria destas representações, foram, sequencialmente, apresentados aqueles denominados por modelos baseados em componentes constituídos por parâmetros não-lineares. Naturalmente, ficou evidenciado que, à medida que os modelos incrementam em qualidade, os mesmos se tornam mais complexos e passam a requerer informações mais elaboradas e detalhadas. Por outro lado, os ganhos obtidos quanto as exatidões de suas respostas passam a compensar as dificuldades e desafios impostos. Neste contexto, foram contempladas as seguintes propostas:

- Modelo empírico: o qual se apoia em curvas experimentais para sua formulação, advindas de ensaios em campo;
- Modelo de geometria variável: baseado numa estratégia analítica para a inclusão da não-linearidade do sistema de aterramento através do aumento da seção transversal do eletrodo;
- Modelo de resistividade variável: neste cenário foram seis as propostas consideradas aplicáveis:
 - ✓ Liew e Darveniza, o qual considera que a resistividade do solo é alterada caso o valor crítico da densidade de corrente seja ultrapassado;
 - ✓ IST, que, distintamente da anterior, considera que a resistividade do solo é modificada caso o campo elétrico ultrapasse um valor crítico;
 - ✓ Wang, Liew e Darveniza, para a qual, além das regiões de ionização, desionização e não-ionização, presentes nos modelos de resistividade variável anteriores, ainda adiciona uma região de descarga, para a qual o valor da resistividade do solo é nula;
 - ✓ Modificado, representando avanços visando, sobretudo, contemplar situações envolvendo hastes de aterramento cilíndricas colocadas verticalmente no solo, considerando os fenômenos da ionização e manifestação de regiões de descargas.
 - ✓ Modelo usando TLM, o qual encontra-se fundamentado na teoria clássica para linhas de transmissão, considera o solo homogêneo e com uma camada horizontal, representando o sistema de aterramento através de uma associação de elementos indutivos, resistivos, condutivos e capacitivos, alterando-os de forma a considerar a ionização do solo.

Por fim, combinando propriedades associadas com a variação da geometria e ionização do solo, heterogeneidade do solo, simplicidade quando aos princípios e dados requeridos, foi considerado o que se denominou por Modelo das Imagens. Este encontra-se alicerçado na adoção de uma superfície equipotencial ao longo do eletrodo, a partir do qual calcula-se a distribuição de corrente sobre o mesmo. Aumentando de maneira fictícia o diâmetro da haste, de acordo com o cálculo do campo elétrico da superfície do condutor, esta proposta contempla, também, a ionização do solo e o fato que este possa se apresentar caracterizado em até duas camadas horizontais.

Uma vez estabelecidos os princípios físicos atrelados com cada modelo e suas respectivas formulações matemáticas, foram então realizados trabalhos voltados para a implementação das propostas nas plataformas computacionais ATP e MATLAB, visando uma análise comparativa de desempenho das mesmas diante de situações consideradas como referências ou bases para os estudos, já que a opção aqui feita, como destacado, foi pela utilização de resultados de experimentos reportados na literatura.

Os bancos de dados utilizados como referência para o processo de validação dos métodos apresentados foram extraídos de cinco diferentes publicações, todas atreladas com estudos experimentais conduzidos em ambientes controlados ou em medições de campo. Os trabalhos foram realizados injetando-se correntes impulsivas e medições das respostas obtidas para um sistema de aterramento constituído por uma haste. Além da corrente, os trabalhos compreenderam também registros das tensões no ponto de incidência da mesma, fato este que permitiu uma determinação do comportamento da impedância do sistema de aterramento em pauta.

Os modelos lineares, como esperado, conduziram tão somente a valores constantes para a resistência de aterramento, os quais se apresentaram consideravelmente destoantes dos experimentais.

No que tange aos desempenhos dos modelos não-lineares, através da análise numérica das grandezas típicas pontuais, (maior nível de tensão atingido, valor da tensão no pico da corrente, resistência do aterramento no pico da corrente e a resistência inicial), bem como, seus correspondentes desvios médios e a análise gráfica dos resultados, ficou evidenciado que, dentre as propostas consideradas nos estudos, o Modelo das Imagens (Modelo 13), foi o que apresentou a melhor aderência dos resultados computacionais com os esperados. Isto ratifica pois que, dentro do universo de testes feitos, este se apresenta como o mais adequado aos propósitos desta tese.

CAPÍTULO 3

ESTRATÉGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA ELEVAÇÃO DO POTENCIAL DE TERRA

3.1 Considerações iniciais

Uma vez tecidos comentários e realizados estudos de desempenho das estratégias para a representação dos sistemas de aterramento, os trabalhos de pesquisa desta tese avançam na direção de uma efetiva correlação entre a manifestação dos fenômenos associados com as descargas atmosféricas e respectivos impactos sobre os potenciais elétricos manifestados nas regiões circunvizinhas aos pontos de aterramento propriamente ditos. Isto, como posto ao longo do texto, encontra ressonância no objetivo maior do trabalho, qual seja, o de promover meios para a determinação dos esforços dielétricos e térmicos sobre equipamentos, eventualmente afetados por anomalias nas redes de suprimento e na região no entorno.

De fato, focando especificamente a questão da incidência de descargas atmosféricas, há de se reconhecer que as mesmas interagem com os propósitos dos estudos de ressarcimento por danos elétricos através de diferentes vias, a saber:

- Incidências diretas nas redes de alimentação;
- Incidências indiretas, por ocorrências em equipamentos na região vizinha ao ponto de aterramento das instalações elétricas, a exemplo de: antenas, cercas, árvores, etc.

Na primeira hipótese, os impactos sobre os mais diversos componentes eletroeletrônicos podem ser determinados através de uma mera propagação de efeitos sobre os condutores e demais acessórios constituintes das redes de transmissão e distribuição, o que dispensaria maiores comentários sobre o tema.

Numa segunda possibilidade, reconhece-se que, mesmo não impactando diretamente sobre os condutores fase ou neutro, há efeitos na forma de elevação da tensão ou potencial de terra nas imediações e, diante desta conjuntura, quer seja através desta correlação ou mesmo por induções eletromagnéticas, pode-se identificar uma outra natureza para os esforços passíveis de manifestação sobre eventuais equipamentos danificados.

É, pois, dentro deste cenário que se encontra o cerne do presente capítulo, o qual tem por meta os seguintes pontos focais:

- Proposição de um modelo analítico, considerando solos homogêneos e estratificados, para a determinação de eventuais aumentos de potencial de terra quando da incidência de descargas atmosféricas sobre a região no entorno de consumidores afetados;
- Implementação computacional do modelo supra posto na plataforma ATP e através dos recursos disponibilizados pelo MATLAB, promover meios para um interfaceamento com o simulador APR, viabilizando, assim, uma nova frente de estudos voltados para a análise dos PIDs diante de elevações do potencial de terra;
- Estabelecer meios e promover a validação da proposta através de ensaios experimentais, assim como também considerar aspectos complementares vinculados com a regionalidade e sazonalidade do solo, obtendo assim parâmetros de referência para os modelos desta tese.

3.2 Fundamentação física

De um modo geral, os problemas aqui considerados, se apresentam consonantes com as indicações de possibilidades de incidências e efeitos ilustrados na Figura 3.1 [76].

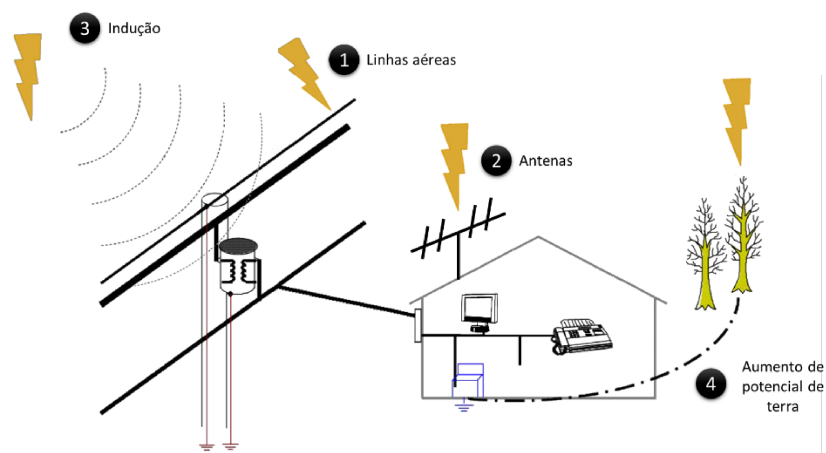


Figura 3.1: Classificação das descargas atmosféricas, baseada no caminho a ser percorrido

Como indicado, podem ser identificadas na figura as seguintes possibilidades:

1. Incidência direta da descarga atmosférica sobre a linha de transmissão e/ou distribuição;
2. Incidência em antenas de telecomunicações, próximas ou na própria unidade consumidora;
3. Propagação dos efeitos advindos de descargas via indução eletromagnética;
4. Incidência em estruturas metálicas, árvores, cercas, etc. e propagada via terra.

Vários estudos relativos aos danos advindos da incidência de descargas atmosféricas sobre linhas aéreas ou em antenas têm sido reportados quanto aos seus efeitos, metodologias para análise, proteção, etc. [18], [65], [71], [75], [76], [122], [123]. Entretanto, em se tratando especificamente da matéria relacionada com os efeitos e correlações provocadas por tensões induzidas e aumento de potencial de terra, o assunto se mostra extremamente carente dentro do contexto da documentação encontrada. Isto, novamente, resultou nos interesses estabelecidos por esta proposta de pesquisa, a qual se encontra centrada na questão das elevações do potencial de terra, nos termos já postos.

Em se tratando deste efeito, vale observar que o fenômeno se apresenta fortemente dependente das características do solo da região sob análise, com destaque a resistividade da mesma, e também, das propriedades físicas e geométricas dos sistemas de aterramento.

Todavia, tendo em mente que as questões envolvendo a composição física das malhas de terra já foram consideradas anteriormente, resta, para o momento, tecer considerações a respeito da interdependência da resistividade do solo propriamente dito. Para tanto, é importante lembrar que esta grandeza encontra expressiva dependência com o tipo de solo e composição geológica. Desta última correlação surgem possibilidades como [95]:

- Influência de camadas estratificadas com profundidades e propriedades distintas;
- Teor de umidade;
- Temperatura;
- Compactação;
- Pressão;
- Composição química dos sais dissolvidos na água retida.

De fato, esses fatores, isoladamente ou em conjunto, interferem nas características e na resistividade do solo, impactando sobre os parâmetros requeridos pelos modelos explorados no Capítulo II.

3.3 Aumento do potencial de terra

Os valores de resistividade elétrica dos materiais que compõem a estrutura física de um condutor elétrico são extremamente pequenos, comparados aos menores valores de resistividade elétrica do solo. Nestas circunstâncias, a diferença de potencial interna entre pontos físicos da haste propriamente dita pode ser desprezada, fato este que determina que a superfície lateral do mesmo se configura como uma região equipotencial.

3.3.1 Formulação

A partir da imposição do potencial constante ao longo de toda a extensão do eletrodo de aterramento, a distribuição de corrente oriunda do mesmo para a região circunvizinha ou terra propriamente dita, pode ser determinada idealizando-se, a partir do condutor enterrado, sucessivas fontes pontuais de corrente, cada qual representando uma parcela da corrente total que se dispersa no solo. Nestes termos, cada fonte de corrente pontual contribui para uma parcela do potencial na superfície do condutor, em consonância com a expressão (3.1).

$$dV = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot x} \cdot dI \quad (3.1)$$

Onde:

- dI é a corrente elementar devido a uma fonte incremental de corrente num determinado ponto físico da haste;
- dV é o potencial incremental em um ponto da superfície do condutor devido a corrente supra mencionada e;
- x é a distância entre a fonte de corrente pontual e um ponto genérico da superfície do condutor.

Para se obter o potencial V , representando a diferença de tensão total entre o eletrodo e um ponto da terra infinitamente distante, para o qual é possível admitir-se um potencial nulo para a tensão local, a equação (3.2) representa o resultado da integração da grandeza incremental acima referida.

$$V = \frac{\rho}{4 \cdot \pi} \int_I \frac{dI}{x} \quad (3.2)$$

Disto desprende que, uma vez conhecido ou adotado um valor para a tensão V , resta que a equação (3.2) permite o cálculo da corrente que estaria diretamente associada à elevação do potencial ora referido. Não obstante essa aparente simplicidade para se efetuar analiticamente o cálculo em questão, a forma física do eletrodo de aterramento aponta para a necessidade de uma subdivisão deste componente em infinitos elementos pontuais (ou um grande número para que se possa obter uma precisão aceitável).

Diante deste contexto, e também que o Modelo das Imagens, requerido para os procedimentos de cálculo, se fazem necessários, ressalta-se que estes dois fatores, em conjunto, determinam uma grande morosidade para os estudos. Visando, pois, contornar tais dificuldades, duas estratégias se apresentam atrativas aos fins aqui postos. Uma delas baseada em procedimentos tradicionais associados com cálculos numéricos, e outra, apoiada em uma estratégia analítica simplificada.

Conforme abordado na seção 2.3.2 , a adoção pela estratégia baseada em cálculo numérico, além de ser, do ponto do vista físico, mais condizente, traz consigo a estabilidade de convergência do método.

Para adequação da estratégia e consequente cálculo do potencial da superfície do solo, a representação geométrica indicada no Capítulo 2 - Figura 2.16, é então readequada e resulta na proposta contemplada a seguir e ilustrada pela Figura 3.2.

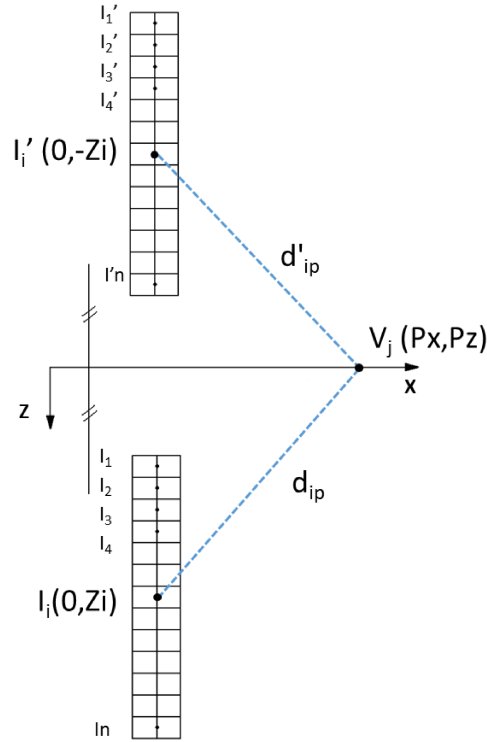


Figura 3.2: Representação geométrica do aterramento para cálculo do aumento de potencial de terra

Neste contexto, para um solo homogêneo, basta modificar a expressão (2.77) e (2.78) adotando-se, ao invés do ponto de cálculo na superfície do condutor, um outro, pertencente à superfície do solo, conforme (3.3) e (3.4), respectivamente. A grandeza P_z corresponde a coordenada que identifica o ponto em questão e é importante ressaltar que esta etapa é realizada após o cálculo da distribuição de corrente ao longo do eletrodo.

$$V_{pi} = \frac{I_e \rho_{soil}}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{(P_z - z_i)^2 + P_x^2}} + \frac{1}{\sqrt{(P_z + z_i)^2 + P_x^2}} \right) P_i \quad (3.3)$$

$$V_{pi} = \frac{I_e \rho_{soil}}{4\pi} \left(\frac{1}{d_{ip}} + \frac{1}{d'_{ip}} \right) P_i \quad (3.4)$$

Para se considerar as várias fontes de correntes pontuais, utiliza-se a expressão (3.5). Deste modo, e ainda de posse dos resultados da distribuição de corrente ao longo do eletrodo, é possível calcular o aumento de potencial de terra em um ponto qualquer no solo, incluindo a superfície do mesmo.

$$V_p = \frac{I_e \rho_{soil}}{4\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{1}{d_{ip}} + \frac{1}{d'_{ip}} \right) P_i \quad (3.5)$$

De maneira análoga, a consideração do fenômeno da ionização do solo, bem como a utilização do modelo para solo heterogêneo de duas camadas, pode ser contemplada deslocando o ponto para o qual se deseja efetuar o cálculo para a superfície do solo.

Vale ressaltar que os desenvolvimentos conduzidos anteriormente consideraram a incidência da descarga atmosférica diretamente sobre a extremidade da haste enterrada no solo. A partir desta premissa são realizados os cálculos dos potenciais nos pontos mais distantes do solo. Todavia, esta particularidade não se apresenta como uma situação única, visto que as descargas podem, efetivamente, ocorrer em locais outros que não a haste propriamente dita.

Sob tais circunstâncias, para a obtenção dos potenciais de superfície admite-se uma estrutura semi-esférica fictícia, composta por um material de condutividade zero e um raio de tamanho Δr . Feito isto, o Modelo das Imagens é então utilizado e o campo elétrico na superfície da estrutura é prontamente determinado.

Caso o campo elétrico seja maior que o campo elétrico crítico do solo (de maneira análoga ao efeito de ionização anteriormente abordado), procede-se a um incremento Δr e novos cálculos são realizados. Isto avança até que a condição imposta pelo campo elétrico crítico seja atingida, determinando assim a região de ionização do solo. A partir deste ponto, o Modelo das Imagens é empregado de maneira clássica, sendo possível obter o aumento de potencial de terra em um local físico qualquer.

É importante ressaltar que, conforme elucidado no item 2.3.2 do Capítulo 2, o método pode ser utilizado tanto para 1 camada homogênea quanto para 2 camadas heterogêneas.

3.3.2 Implementação Computacional do Método de Cálculo do Aumento do Potencial de Terra

Conforme ilustra a Figura 3.3, o algoritmo implementado, inicialmente, requer os seguintes dados de entrada: campo elétrico crítico, distância entre o ponto a ser estudado e a posição física da superfície onde ocorreu o evento e resistividade do solo.

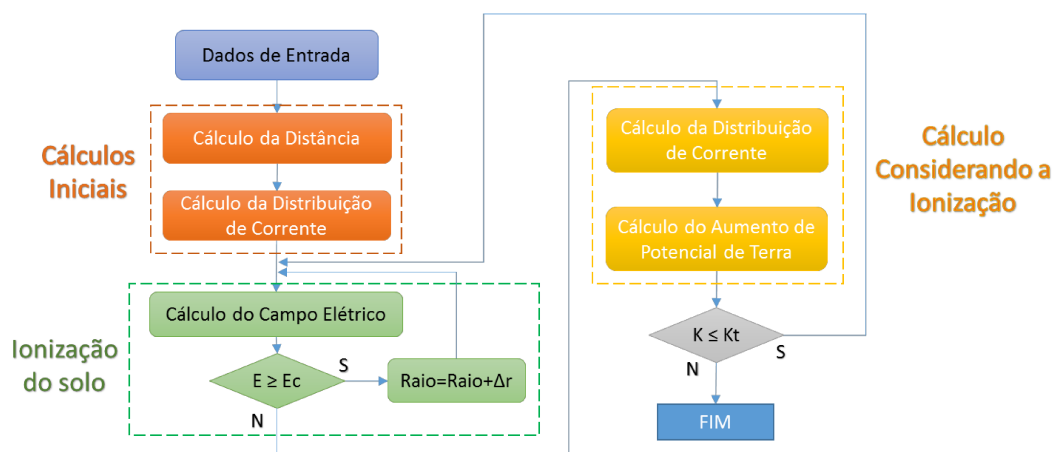


Figura 3.3: Algoritmo para cálculo do Aumento de Potencial de Terra

Uma vez fornecidas as informações requeridas pelo Modelo das Imagens, são então obtidas as matrizes de distância e a distribuição de corrente no solo.

Após esta etapa, o algoritmo calcula o campo elétrico E na superfície do condutor fictício (neste caso, uma estrutura semi-esférica) e o compara com o campo elétrico crítico do solo (E_c). Caso este possua um valor superior ao limite estabelecido, o raio do condutor fictício é então incrementado, iterativamente, em passos Δr até que esta condição seja desfeita.

Uma vez conhecida a região de ionização, o algoritmo então calcula a nova distribuição de corrente no solo e o aumento de potencial de terra em um ponto desejado.

O algoritmo, em sua última etapa, verifica se o vetor da corrente de entrada chegou ao último elemento e, em caso negativo, repete o processo de cálculo.

Complementarmente, a Figura 3.4 representa o algoritmo do cálculo do aumento de potencial de terra considerando duas camadas homogêneas de solo.

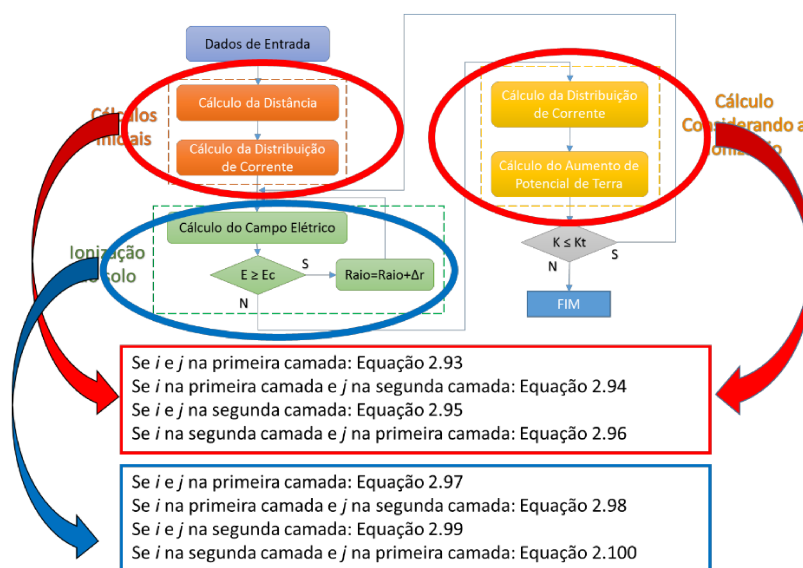


Figura 3.4: Algoritmo para cálculo do Aumento de Potencial de Terra para solo de 2 camadas

Dentro das condições postas, o algoritmo utilizará a equação adequada para cada situação de cálculo, dependendo da posição da fonte pontual de corrente i e o ponto desejado de cálculo j . O restante da execução do algoritmo segue a mesma estrutura para o solo com apenas 1 camada.

O código computacional associado com as tarefas supra postas é apresentado no Apêndice C.

3.4 Valores típicos de campo elétrico crítico do solo

Com vistas a consubstanciar os estudos, foram realizados vários ensaios experimentais objetivando a determinação de valores típicos para os campos elétricos críticos para diferentes tipos de solo. Para tanto, amostras de solo advindas de algumas regiões do país foram coletadas, conforme ilustra a Figura 3.5.

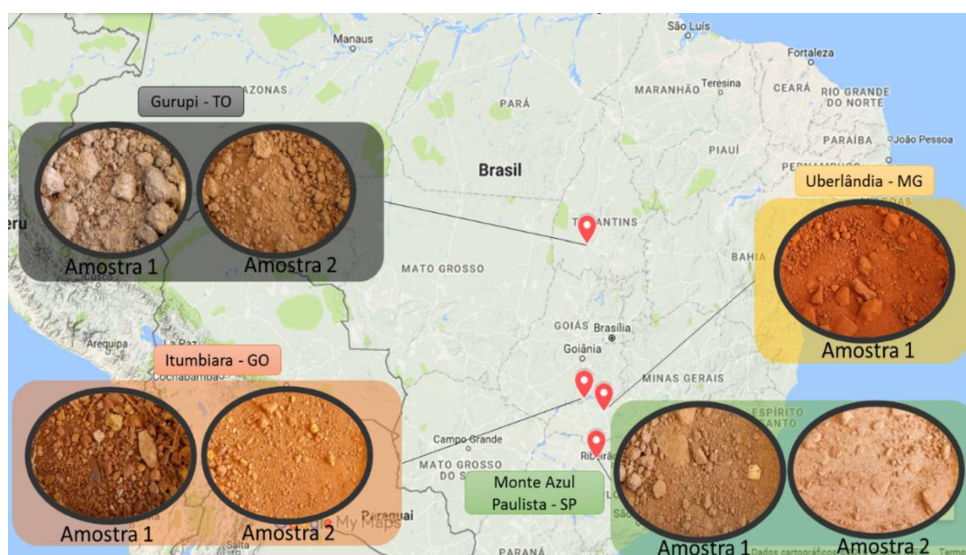


Figura 3.5: Localização física de alguns pontos de coleta de amostras de solo

Quanto aos ensaios propriamente ditos, estes foram caracterizados pela inserção das amostras numa cuba (10 x 9,5 x 9,5 cm) e, entre os terminais desta, aplicada uma tensão para uma situação tal que os eletrodos se encontrassem espaçados de 3,7 cm, conforme representa a Figura 3.6. [114]. Tal tensão foi objeto de sucessivos aumentos até que fosse estabelecido um canal de ionização na amostra. É importante ressaltar que o tempo entre cada ensaio foi de cinco minutos.

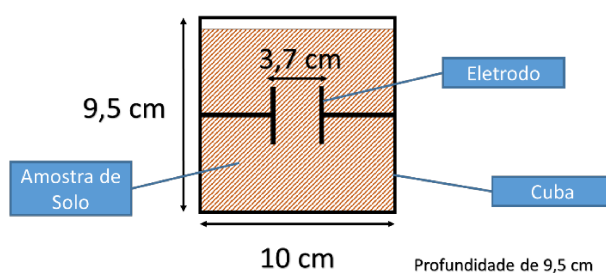


Figura 3.6: Dimensões da cuba utilizada nos ensaios experimentais

A Figura 3.7 ilustra uma das amostras de terra submetida ao ensaio e o equipamento para teste dielétrico utilizado, o qual é de fabricação Triel, Modelo ST-42906, 220V, 60 Hz, 0-60 kV, Gradiente de aumento de 0,5 kV/s; 2 kV/s e 3 kV/s.



Figura 3.7: Amostra de solo submetida ao ensaio de obtenção do campo elétrico crítico

A Tabela 3.1 fornece os resultados experimentais obtidos para o conjunto de amostras coletadas.

Tabela 3.1: Resultados experimentais do campo elétrico crítico

Campo Elétrico Crítico [kV/m]			
Amostra	Elevação de 0,5 kV/s	Elevação de 2 kV/s	Elevação de 3 kV/s
Itumbiara 1	173,0	175,7	189,2
Itumbiara 2	527,0	532,4	527,0
Monte Azul Paulista 1	756,8	756,8	783,8
Monte Azul Paulista 2	759,5	783,8	783,8
Uberlândia 1	702,7	710,8	705,4
Gurupi 1	123,0	124,6	121,2
Gurupi 2	108,2	110,4	106,2

Para fins comparativos, a Tabela 3.2 fornece resultados de ensaios similares relatados em [114]. Os valores representam o desempenho de amostras de solo das cidades de Uberlândia-MG e Paracatu-MG.

Tabela 3.2: Valores experimentais do campo elétrico crítico fornecidos em [114]

Amostra	Campo Elétrico Crítico [kV/m]
Uberlândia 2	807
Uberlândia 3	866
Uberlândia 4	913
Paracatu 1	463
Paracatu 2	889

3.5 Estudo Computacional de Aumento do Potencial de Terra

De modo a elucidar e avaliar a consistência da resposta do algoritmo proposto, um estudo de caso, compreendendo uma averiguação do perfil do aumento de potencial de terra na região vizinha ao impacto de uma descarga atmosférica é realizado na sequência.

Para tanto foi adotada uma fonte de corrente impulsiva caracterizada por uma amplitude A_0 , uma constante de tempo T_1 , relacionada ao tempo de subida da curva e uma constante de tempo T_2 , relacionada por sua vez com o tempo de descida. Esta última correspondente a 50% do valor de pico. Esta onda pode ser modelada com base na expressão (3.6) (dupla exponencial padrão) utilizada no *software* ATP ou pelas equações (3.7) e (3.8) propostas por [124].

$$I(t) = A_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3.6)$$

Onde A_0 é o valor de pico da corrente, α é $1/T_2$ e β é $1/T_1$.

$$I(t) = \frac{A_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})}{e^{-\alpha w} - e^{-\beta w}} \quad (3.7)$$

$$w = \frac{\ln\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)}{\alpha - \beta} \quad (3.8)$$

Utilizando a segunda proposta de formulação e considerando um pico de 30 kA, com constantes de tempo iguais a 5 μ s e 12 μ s, obteve-se a corrente impulsiva da Figura 3.8. Estas evidenciam a reprodução de fenômenos atmosféricos ou outros no padrão 8x20 μ s, como recomendado por [125]–[127].

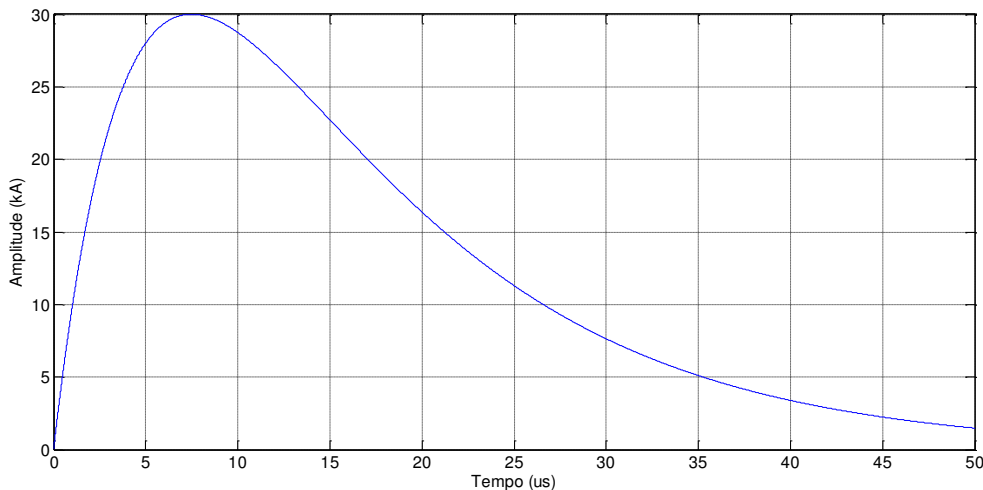


Figura 3.8: Corrente impulsiva utilizada na simulação

A partir da corrente assim obtida aplicou-se o algoritmo proposto, considerando o impacto diretamente no solo (sem a presença de haste de aterramento), e, iterativamente, foram determinados os valores dos potenciais de terra para vários pontos na região vizinha do impacto. O solo considerado neste estudo se apresentou com resistividade de $293 \Omega\text{m}$, valor típico encontrado na cidade de Uberlândia-MG [114] e campo elétrico crítico de 708 kV/m (valor médio obtido nos experimentos realizados).

A Figura 3.9 ilustra o perfil do potencial elétrico no solo obtido sob as condições acima postas. Ressalta-se que o quadrante da simulação, nos termos dos eixos x e z , pode ser replicado no entorno do eixo y , desde que a simetria seja mantida. A região em vermelho forte representa o local da incidência do fenômeno perturbador e o decaimento dos efeitos sobre os potenciais de terra podem ser prontamente observados.

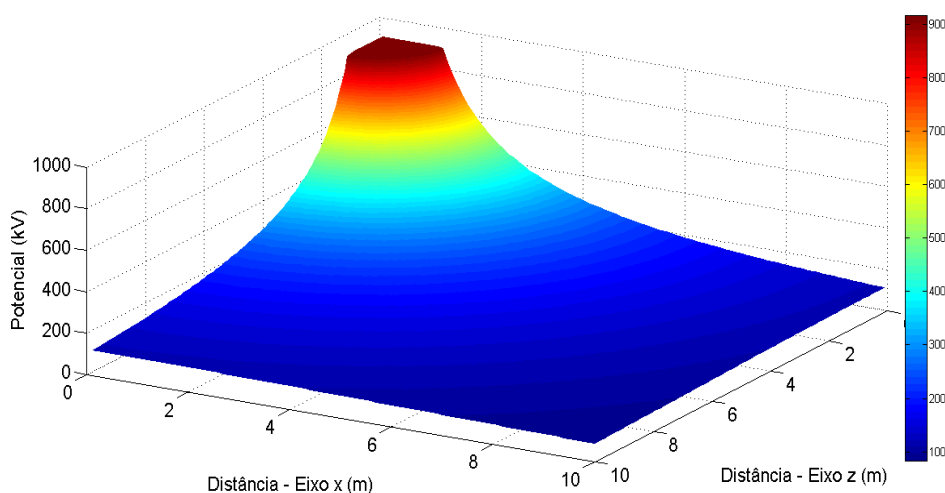


Figura 3.9: Perfil do aumento de potencial de terra

A Figura 3.10 sintetiza a performance do decaimento do potencial da superfície de acordo com a distância, o comportamento dos valores do potencial elétrico para $z=0$.

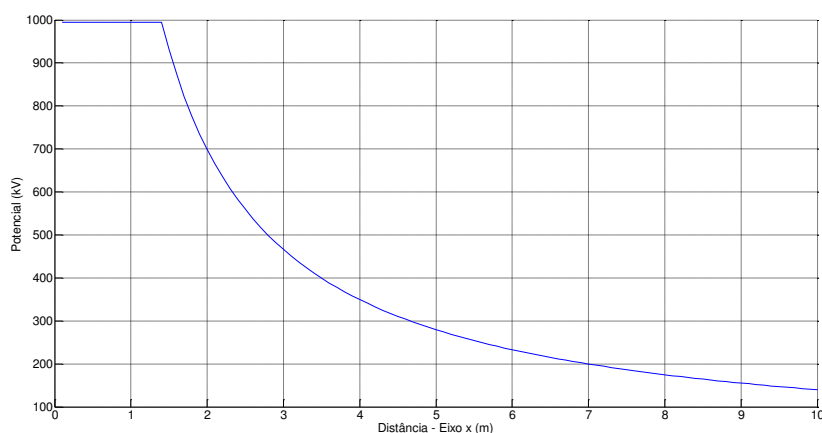


Figura 3.10: Perfil do decaimento do potencial ao longo do eixo x

3.6 Considerações finais

Sintetizando, as contribuições feitas neste capítulo foram centradas no estabelecimento da correlação entre a incidência de descargas atmosféricas indiretas e respectivas correlações com o tema central desta pesquisa. Tais desenvolvimentos se apoiaram na busca de meios para a melhoria dos recursos atualmente disponibilizados pelo simulador APR, visando o seu uso como processo sistematizado para a emissão de pareceres consubstanciados para a análise dos pedidos de indenização por danos elétricos, requeridos por consumidores com equipamentos supostamente afetados por fenômenos anômalos nas redes de distribuição.

Tendo, pois, em vista que no atual estágio de desenvolvimento dos trabalhos, apenas as descargas atmosféricas incidentes de forma direta sobre os produtos se fazem representar, e diante do fato que os fenômenos atrelados com as incidências indiretas representam um volume considerável de ocorrências, isto motivou os estudos ora feitos. De fato, registros diversos têm enfatizados que eventuais danos físicos em produtos pertencentes às instalações dos consumidores podem ocorrer na forma de elevações da tensão ou potencial de terra nas imediações das instalações do consumidor reclamante ou via induções eletromagnéticas, em decorrência das denominadas descargas indiretas.

Visando contemplar estes últimos aspectos, de forma pontual, este capítulo foi centrado na proposição de um modelo computacional, considerando solos homogêneos e estratificados, para a determinação de eventuais aumentos de potencial de terra quando da incidência de descargas atmosféricas sobre a região no entorno de consumidores afetados.

Tecidas considerações gerais sobre a matéria, a determinação dos níveis dos potenciais de terra foi estabelecida através de formulações analíticas que contemplaram o fenômeno da ionização do solo, bem como a utilização do modelo para solos heterogêneos de duas camadas, baseando na premissa que a incidência da descarga atmosférica ocorre diretamente sobre o solo. Sob tais circunstâncias, a obtenção dos potenciais de superfície foi baseada numa estrutura semi-esférica fictícia e, através do método das imagens apresentado, os níveis de campo elétrico na superfície da estrutura puderam ser prontamente determinados. Estes, sendo superiores ao valor crítico do solo, determinam a região de ionização do solo, condição esta que, através do método das imagens, conduz ao desejado valor para o aumento de potencial de terra, quer seja para um solo caracterizado por uma ou duas camadas heterogêneas.

Com vistas a consubstanciar os estudos, e devido a carência de informações sobre os limites críticos de suportabilidade dielétrica dos solos, foram então realizados vários ensaios experimentais objetivando a determinação de informações próprias a diferentes tipos de solo. Para tanto, amostras de solo advindas de algumas regiões do país foram coletadas, e os ensaios feitos em laboratório

propiciaram dados relevantes à aplicação da metodologia apresentada de forma consistente com a realidade nacional.

Uma vez estabelecidos, tanto a metodologia quanto os meios para o fornecimento dos dados requeridos por esta, foram então realizados trabalhos de cunho computacional, destinados a obtenção de recursos para os processamentos dos cálculos das desejadas elevações de potencial, diante da ocorrência de descargas indiretas. Para tanto a representação estabelecida foi implementada na plataforma MATLAB, a qual foi empregada para a avaliação do desempenho da estratégia de cálculo para situações típicas passíveis de ocorrência e interesse. Os resultados obtidos ratificaram as expectativas físicas esperadas para o comportamento do fenômeno aqui contemplado.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTAÇÃO DO FENÔMENO DO AUMENTO DO POTENCIAL DE TERRA NO APR

4.1 Considerações iniciais

Não obstante as propriedades atuais disponibilizadas pelo aplicativo computacional desenvolvido no âmbito da UFU para fins dos estudos de consistência dos nexos causais envolvendo a polêmica área conhecida por Ressarcimento por Danos Elétricos a consumidores, devido a anomalias operacionais manifestadas nas redes de suprimento, como ressaltado ao longo desta tese, ainda se reconhece a existência de importantes desafios a serem investigados e incorporados à ferramenta de análise dos PIDs.

De fato, ao se observar levantamentos feitos sobre as origens dos principais fenômenos, supostamente responsáveis pelos efeitos sobre os mais distintos dispositivos eletroeletrônicos, os registros associados com a incidência de descargas atmosféricas se apresentam como preponderantes. E dentro deste contexto particular, há ainda a se destacar a presença das propagações das sobretensões e sobrecorrentes, na forma de impulsos, quer via direta ou indireta.

Tendo em mente que as representações destes distúrbios já se fazem presente quanto aos impactos diretos sobre os cabos de alimentação, resta, como já informado, complementar os trabalhos através da inserção de mecanismos que permitam correlacionar as causas e efeitos quando os fenômenos atmosféricos se propagam via outras vias que não a mencionada. Estas, como tem sido classicamente denominada nesta proposta de trabalho, passou a ser designada por incidências indiretas, cujo meio de propagação se faz através dos sistemas de aterramento, provocando, por fim, elevações de potencial de terra e seus efeitos correspondentes.

Uma vez que o assunto supra mencionado foi considerado quanto aos aspectos mais diversos associados com conceitos, modelagem, avaliação e implementação computacional na plataforma ATP, a sequência dos trabalhos, conforme aqui focada, encontra-se dirigida para a incorporação dos recursos obtidos no Aplicativo APR propriamente dito.

Diante desta conjuntura, o presente capítulo se apresenta com os seguintes pontos focais:

- Apresentar uma síntese do aplicativo APR nos termos atuais;

- Implementar os recursos complementares objetivando a viabilização de estudos computacionais sobre a manifestação e incidência dos efeitos das descargas atmosféricas indiretas;
- Realizar testes de avaliação de desempenho do novo produto obtido.

4.2 Considerações gerais sobre o aplicativo APR

Objetivando um aplicativo computacional de fácil manuseio, focado na análise de consistência de pedidos de ressarcimento por danos elétricos, a estrutura do APR foi desenvolvida de modo tal a contemplar as seguintes premissas:

- Permitir uma interação amigável entre o usuário e o ATP;
- Viabilizar a caracterização da rede elétrica através da configuração e edição dos parâmetros elétricos da mesma ou por acesso a banco de dados;
- Disponibilizar os diversos modelos de equipamentos eletroeletrônicos, alvos das avaliações;
- Oferecer as fontes responsáveis pelos distúrbios típicos em redes de distribuição;
- Realizar a montagem e arquivamento dos dados de entrada para a execução do ATP;
- Executar e, posteriormente, importar os arquivos de saída do ATP;
- Fazer o tratamento dos resultados para fornecer subsídios técnicos que permitam a tomada de decisão e emissão do parecer final sobre o pedido de ressarcimento.

Tendo como base nestes princípios, através de diversos trabalhos de pesquisa realizados na UFU, quer seja na forma de dissertações, teses, publicações científicas, e outros meios, atingiu-se um *software* de análise (APR), cujas principais propriedades é sintetizada através dos blocos representando ações específicas indicadas na Figura 4.1.

De um modo geral, a estrutura representa uma macro visão dos módulos do sistema, onde o usuário, através da interface gráfica, tem acesso ao módulo de configuração, podendo inserir elementos para análise. Ainda, o usuário tem a possibilidade de acesso ao módulo de edição, no qual consiste em uma plataforma de configuração manual ou via importação geo-referenciada. Após a inserção do sistema a ser estudado, o usuário, através do módulo de cálculo dos indicadores, realiza a análise das curvas de suportabilidade dielétrica e térmica.

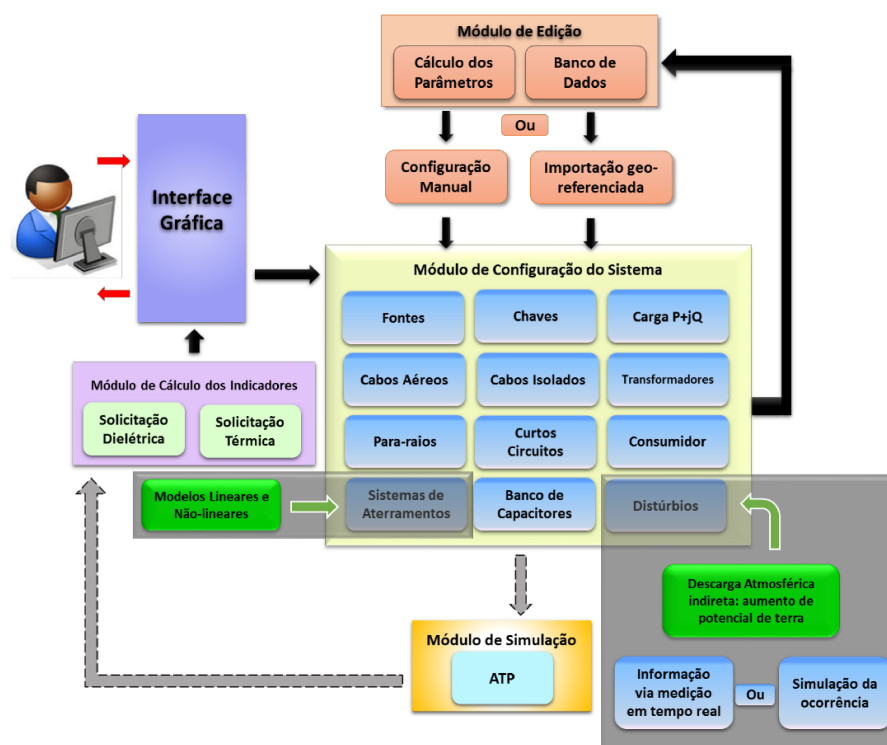


Figura 4.1: Nova estrutura do aplicativo APR

Na estrutura da figura anterior, as setas em preto representam as ações diretas do operador, utilizando a interface gráfica do APR, enquanto que aquelas na cor cinza indicam processos de comunicação interna do *software*, independentemente da interferência do usuário. Desta forma, o usuário é responsável por apenas executar os módulos de configuração e edição do sistema em questão.

Os blocos da cor verde representam as inserções sugeridas por esta tese, relacionadas à seleção adequada do modelo a ser utilizado no processo de simulação e à inserção das descargas atmosféricas indiretas (devido ao aumento de potencial de terra) como novas fontes perturbadoras ou distúrbios, capazes de promover esforços dielétricos e térmicos que possam violar os limites de tolerância admissíveis pelos equipamentos dos consumidores.

Resumindo sua ação, o aplicativo computacional busca reproduzir, propagar e correlacionar os distúrbios factíveis de manifestações nas redes elétricas e seus impactos sobre os equipamentos supridos pelos alimentadores de distribuição, ou outros. Neste sentido, ocorrências do tipo: descargas atmosféricas, curtos-circuitos, atuação dos dispositivos de proteção, manobras diversas, etc., podem ser realizados através de uma base computacional sólida e amplamente aceita pelas empresas de energia elétrica do Brasil e do mundo (ATP-EMTP).

No que tange a lógica operacional e de análise, os impactos causados pelos fenômenos são propagados até o ponto de conexão do consumidor reclamante, onde os equipamentos supostamente

danificados são representados através de modelos compatíveis com cada produto considerado. Analisando as tensões e as correntes incidentes sobre os produtos reclamados, correlaciona-se então os esforços dielétricos e térmicos com estas grandezas e, torna-se então possível a comparação destas solicitações com os padrões de suportabilidade dos dispositivos, constatando-se ou não a existência do nexo causal e, conclusivamente, emite-se um parecer sobre a solicitação feita. Maiores detalhes sobre o mencionado aplicativo podem ser encontrados em [34], [40], [128].

A interface gráfica do APR foi desenvolvida em DELPHI, sendo composta por uma área de desenho para a representação do diagrama unifilar do sistema de energia. Nela, todos os comandos e campos são dispostos de forma direta e prática onde o usuário visualiza facilmente os instrumentos ou opções de trabalho, conforme indica a Figura 4.2.

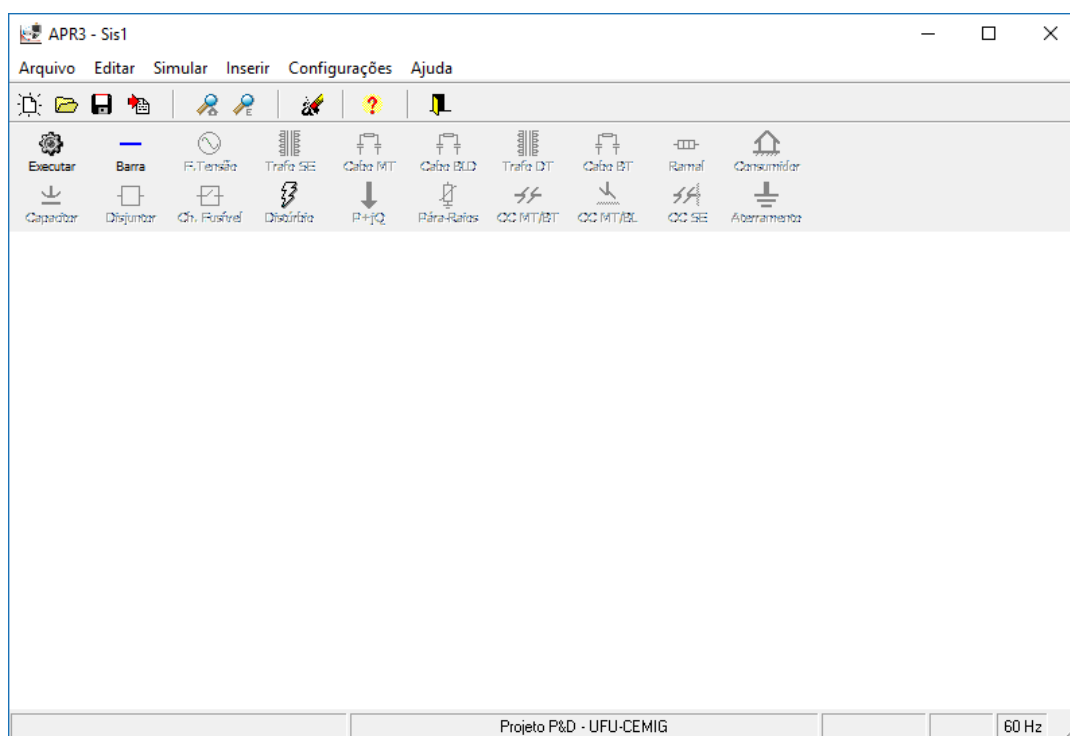


Figura 4.2: Interface gráfica do APR

4.3 Implementação dos modelos de sistemas de aterramento no APR

Para a implementação dos modelos de sistemas de aterramento, nos termos explorados e concluídos nos capítulos anteriores, a estratégia a ser seguida para os trabalhos compreendeu as seguintes etapas:

- Criação de um cartão que incorpora detalhes da programação realizada pela rotina do *software* MATLAB e a rotina MODELS;
- Criação de um cartão que estabeleça uma interligação do circuito elétrico configurado no ATPDraw com o cartão MODELS;

- Estabelecimento de meios para a migração do modelo computacional desenvolvido no ambiente MATLAB para a plataforma ATP e, posteriormente, para a base apropriada do aplicativo APR.

4.3.1 Desenvolvimento do cartão

De modo a integrar os *softwares* MATLAB/ATP/APR, o cartão desenvolvido possui características únicas quanto à sua concepção. Inicialmente a rotina implementada na plataforma MATLAB realiza o cálculo para a corrente impulsiva submetida ao estudo desejado. Nesta etapa, o solo pode ser parametrizado como homogêneo ou heterogêneo com duas camadas, sendo que em ambos os casos a ionização do solo é levada em conta.

Todavia, devido a quantidade de cálculos requeridos por esta estratégia, a implementação de forma direta na rotina MODELS acarretaria em um tempo de execução computacional não compatível com o propósito do aplicativo APR. De modo a diminuir o tempo de execução e manter um grau de aderência aceitável com os requisitos mínimos da análise, após o cálculo da resistência de aterramento realizado na plataforma MATLAB, a rotina define três regiões distintas:

- Região 1 – associada com valores de corrente inferiores à corrente mínima capaz de provocar o fenômeno da ionização do solo (I_M), ocasionando, assim uma resistência de terra que permanece constante ao longo do processo de análise;
- Região 2 – esta compreende o período entre o instante em que a amplitude da corrente é superior a I_M e inferior ao valor máximo $I_{M\acute{a}x}$. Ao longo desta, a resistência de terra possui um comportamento representado por um polinômio contemplando os valores encontrados durante o intervalo em pauta;
- Região 3 – relacionada com um valor mínimo para a resistência de terra, que ocorre quando a amplitude da corrente é máxima, permanecendo neste patamar até o final do estudo.

A Figura 4.3 sintetiza as mencionadas regiões e os respectivos comportamentos da resistência em função da corrente.

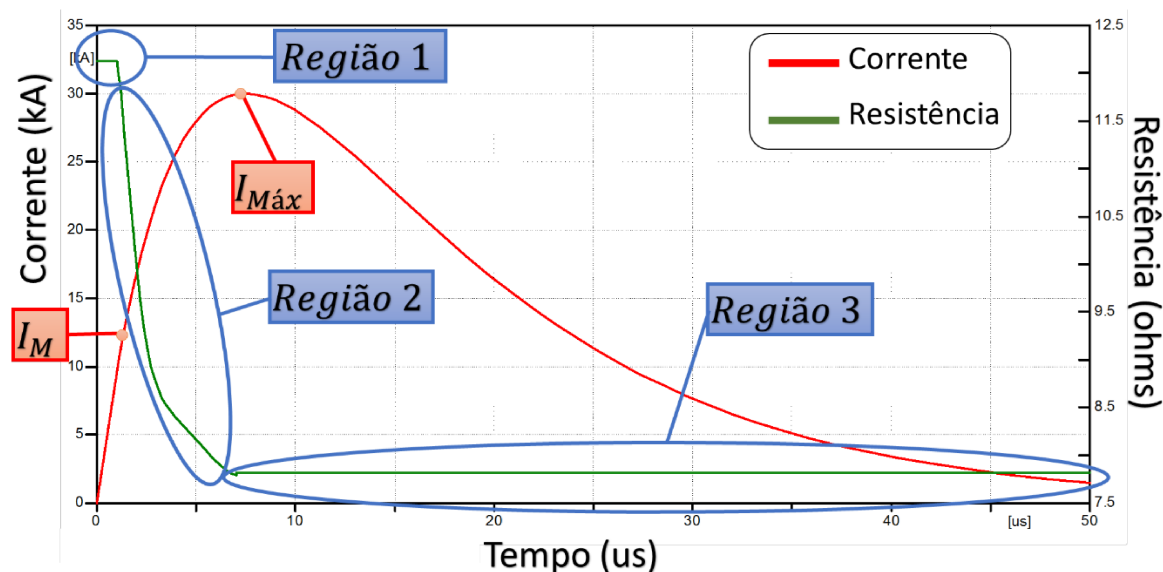


Figura 4.3: Valores da resistência de aterramento em função da corrente incidente

Com base nos fundamentos estabelecidos foi então desenvolvido o algoritmo computacional e a criação do cartão do ATP, nos termos requeridos para a execução no APR. Este encontra-se indicado na Figura 4.4.

```

KARD 3 5140141142143151
KARG 1 2 3 4 5 6 2
KBEG 11 3 8 11 7 9 3
KEND 16 8 15 18 14 16 8
KTEX 1 1 0 0 0 0 1
$ERASE
INPUT
MM0001 {i(MOD__1)}
OUTPUT
MOD__2
MODEL Modific
{.....ENTRADA DA MODELS MODIFICADA.....}
ENDMODEL
USE Modific AS Modific
INPUT
i:= MM0001
DATA
Ec:= CPELETCR
raio0:= RAIOELET
l:= COMPELET
ro0:= RESISTIV
OUTPUT --155
MOD__2:=r_temp
ENDUSE
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
$EOF User-supplied header cards follow. 16-Oct-09 10:16:50
ARG,MOD__1,MOD__2,CPELETCR,RAIOELET,COMPELET,RESISTIV
NUM,CPELETCR,RAIOELET,COMPELET,RESISTIV

```

Figura 4.4: Cartão base do APR/ATP

4.3.2 Interface para o usuário

A Figura 4.5 é ilustrativa da interface gráfica criada, no contexto da plataforma MATLAB, com o intuito de tornar mais amigável a entrada de dados do usuário. Como indicado, o usuário simplesmente fornece os parâmetros nos campos requeridos e executa o programa. Contando com os resultados assim obtidos procede-se a conexão com o APR.

Figura 4.5: Interface gráfica na plataforma MATLAB

De uma maneira geral, objetivando representar o processo descrito, a Figura 4.6 representa o fluxograma desde a inserção de dados na plataforma MATLAB, sua transição com o APR até a execução de cálculos efetuados pelo ATP.

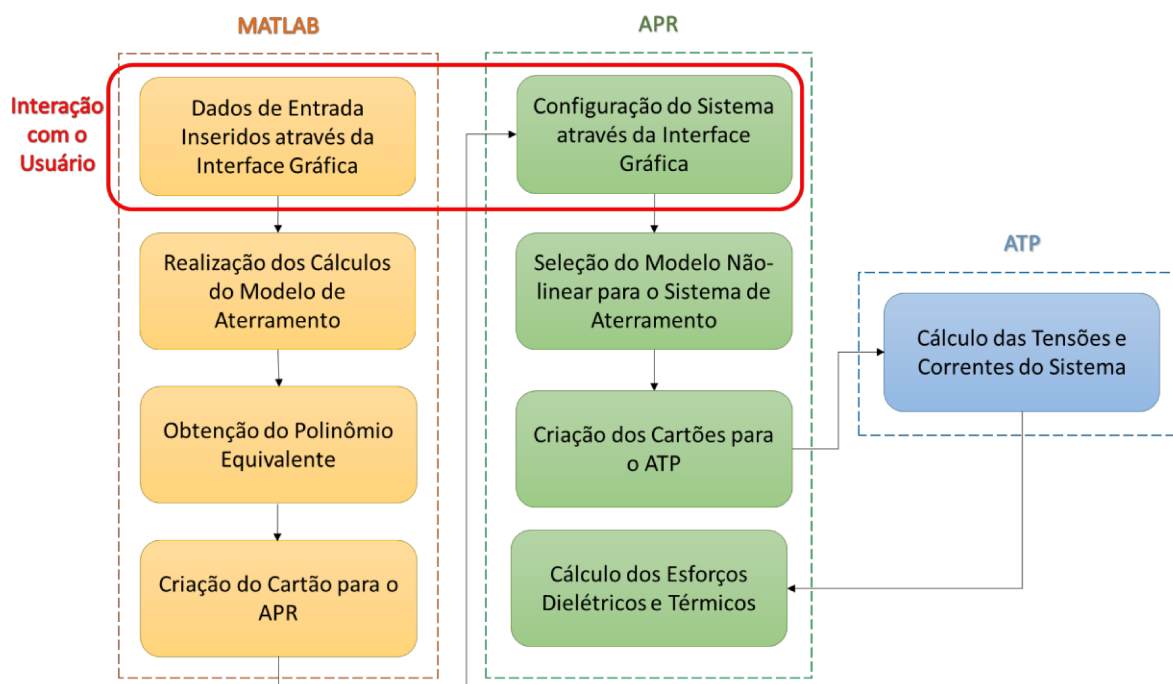


Figura 4.6: Fluxograma da interação entre MATLAB, APR e ATP - Modelo de Aterramento

Por fim, o aplicativo APR pode ser executado normalmente, bastando selecionar a modelagem não-linear visando contemplar, nos estudos de análise, a metodologia aqui proposta. O resultado da implementação da interface, bem como a geração dos cartões do ATP/APR, é fornecido no Apêndice D.

4.4 Implementação do fenômeno do aumento do potencial de terra no APR

No que tange aos valores de tensão nos terminais do consumidor após a ocorrência do fenômeno do aumento de potencial de terra, em conformidade com as descrições feitas, o APR utilizará, como entrada, o arquivo de dados de tensão já previsto na versão original do *software* (denominado por “medição”). A Figura 4.7 ilustra, de maneira genérica, o formato do arquivo a ser criado pela rotina em MATLAB.

```
(0.00e+00,0.0000e+00) (0.00e+00,0.0000e+00) (0.00e+00,0.0000e+00)
(1.00e-06,1.3514e+04) (1.00e-06,0.0000e+00) (1.00e-06,0.0000e+00)
(2.00e-06,2.3497e+04) (2.00e-06,0.0000e+00) (2.00e-06,0.0000e+00)
(3.00e-06,3.0677e+04) (3.00e-06,0.0000e+00) (3.00e-06,0.0000e+00)
```

Figura 4.7: Formato do arquivo com os valores de entrada da fonte de medição

Para tanto faz-se necessário adequar o cartão relativo à fonte de medição de modo a compatibilizar tal entrada de dados com o arquivo criado no MATLAB. A Figura 4.8 ilustra o trecho a ser alterado pela rotina do MATLAB do cartão da fonte de medição.

```
Vmf -- valor máximo da tensão de fase
A0 -- ângulo inicial da tensão da fase A
B0 -- ângulo inicial da tensão da fase B
C0 -- ângulo inicial da tensão da fase C
Atd1 -- ângulo da tensão no início do evento
t1 -- intervalo de tempo entre amostras de tensão
td2 -- instante de tempo do último ponto amostrado
flag -- variável de controle de cálculos iniciais
FUNCTION fonte_f(Vmf,freqf,A0f):=Vmf*sin(2*pi*freqf*t+A0f)
FUNCTION vamed POINTLIST
$INCLUDE, C:\Users\Isaque\Desktop\Sergio\faseA.lst
FUNCTION vbmed POINTLIST
$INCLUDE, C:\Users\Isaque\Desktop\Sergio\faseB.lst
FUNCTION vcmed POINTLIST
$INCLUDE, C:\Users\Isaque\Desktop\Sergio\faseC.lst
INIT
flag:=0
tref:=0
t1:=5.000000E-05
td2:=t1+td1
Vmf:=sqrt(2)*Vrmsff/sqrt(3)
Atd1:=deg(asin(vamed(0)/Vmf))
ENDINIT
EXEC
IF t < t1 OR t > td2 THEN
IF flag = 0 THEN
IF vamed(0) >= 0 THEN
IF vamed(0) > vamed(t1) THEN
Atd1:=rad(180-Atd1)
ELSE
Atd1:=rad(Atd1)
ENDIF
ELSIF vamed(0) < 0 THEN
IF vamed(0) > vamed(t1) THEN
Atd1:=rad(180-Atd1)
ELSE
Atd1:=rad(Atd1)
ENDIF
ENDIF
```

Figura 4.8: Cartão relativo à fonte de medição

De modo análogo à inserção do modelo de aterramento, o aplicativo APR, em conjunto com o ATP, pode então ser executado normalmente.

Do exposto segue que a rotina implementada cria dois arquivos: um contendo os valores para a fonte de distúrbio, e outro, contendo os parâmetros relativos ao tempo do distúrbio e sua inserção na simulação a ser realizada pelo APR. Quanto a interface gráfica, esta é consoante com a mesma estratégia estabelecida no item 4.3.2. A Figura 4.9 é ilustrativa do processo a ser realizado pelas plataformas computacionais.

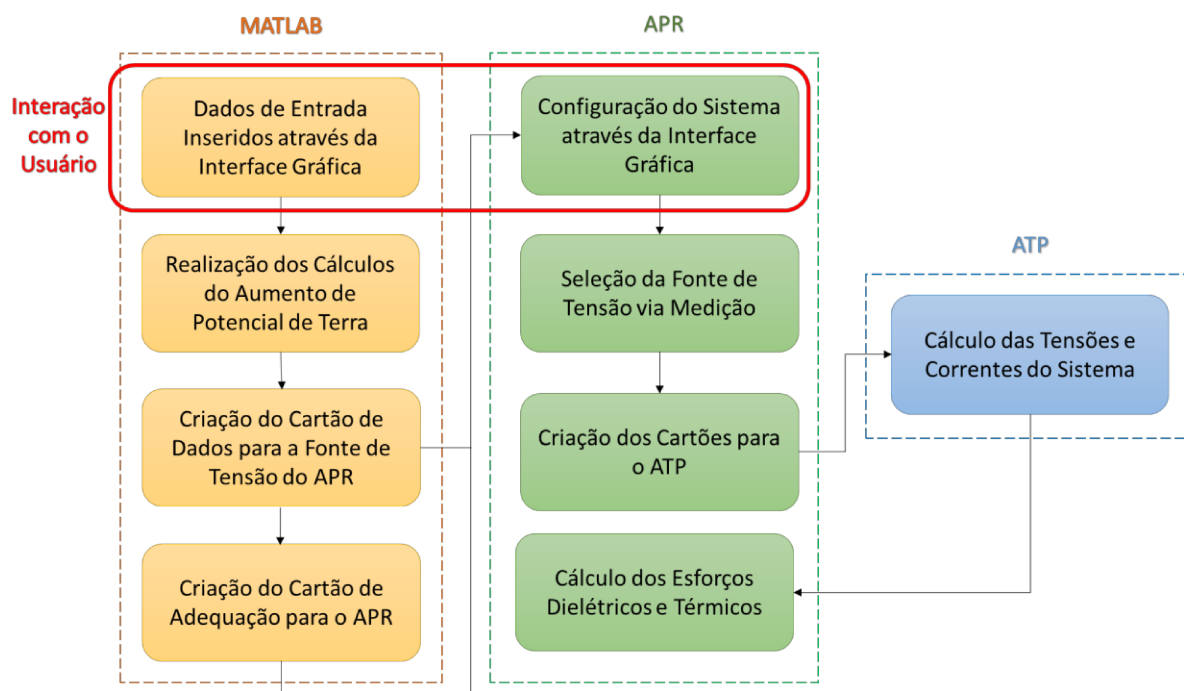


Figura 4.9: Fluxograma da interação entre MATLAB, APR e ATP - Aumento de Potencial de Terra

4.5 Considerações finais

Visando correlacionar os estudos investigativos conduzidos nesta tese com a ferramenta de análise de pedidos de indenização por danos elétricos, aqui denominado por aplicativo APR, os trabalhos introdutórios consistiram em caracterizar o estágio atual do mencionado *software*, ressaltando seus recursos previamente existentes e lacunas a serem contempladas, com especial atenção ao problema focado nesta pesquisa.

Dentro desta lógica, uma vez que os conceitos físicos voltados para correlacionar os fenômenos advindos da incidência das descargas atmosféricas indiretas e o aumento do potencial de terra na região circunvizinha ao do impacto, foram, ao longo do presente capítulo, utilizados os modelos matemáticos citados e que se apresentam como base para a representação do efeito em pauta na plataforma computacional escolhida. Diante das facilidades apresentadas pela plataforma MATLAB, esta foi a ferramenta empregada para a modelagem do fenômeno aqui considerado.

Ressaltando, todavia, que esta se apresentou como uma fase intermediária até a obtenção do produto final, materializado na forma de um novo recurso disponibilizado pelo APR.

Com vistas ao atendimento a este requisito foi, inicialmente, criado um cartão destinado a incorporar a rotina do *software* MATLAB com a MODELS, seguido de ações para a interligação do circuito elétrico configurado no ATPDraw com o cartão MODELS e, ao final, a migração do modelo computacional desenvolvido no ambiente MATLAB para a plataforma ATP.

Por fim, tendo por foco o APR propriamente dito, foram feitas as devidas adequações para o interfaceamento dos recursos obtidos com o *software* de análise propriamente dito, o qual será, na sequência, explorado quanto a sua potencialidade para os estudos aos quais a ferramenta foco da pesquisa se apresenta.

CAPÍTULO 5

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO APR ATRAVÉS DE ESTUDOS DE CASOS REAIS

5.1 Considerações iniciais

Uma vez obtida uma versão atualizada do aplicativo APR, em que pese as contribuições ressaltadas ao longo desta pesquisa de doutorado, este capítulo encontra-se revestido do objetivo de realizar estudos avaliativos sobre a operacionalidade, eficácia, consistência e outros atributos intrínsecos a um aplicativo profissional.

À luz do exposto segue que os trabalhos conduzidos nesta seção têm por cerne a realização de estudos de desempenho de situações reais de solicitações de PIDs, vivenciadas por uma distribuidora de energia. Para se atingir tais metas, foi estabelecida a seguinte estratégia para as análises:

- Identificação e caracterização de casos de pedidos de ressarcimento que possuam correlação com o tema desta tese;
- Simulação e análise dos resultados utilizando o aplicativo APR, para distintas possibilidades associadas com as fontes de distúrbios associados com incidências de descargas atmosféricas;
- Comparação dos resultados dos estudos quando de alterações topológicas do sistema elétrico utilizado e implementado no aplicativo APR.

5.2 Caracterização dos estudos de casos

Para ilustrar a potencialidade e aplicabilidade dos estudos conduzidos nesta pesquisa, a partir do produto final representado por uma nova versão do APR, foram consideradas, dentre um grande universo de situações, dois casos particulares:

- Caso 1 – referente a danos ocorridos em um microcomputador devido à uma descarga atmosférica com incidência direta sobre o alimentador do transformador da unidade consumidora. Este estudo de caso objetiva a avaliação do impacto dos modelos de aterramento contemplados nesta tese, a saber: o linear (Caso 1.1) e o não-linear (Caso 1.2).

- Caso 2 – destinado a avaliar o efeito do aumento de potencial de terra devido a uma descarga próxima ao consumidor, em que pese valores distintos para a localização física da unidade consumidora e o ponto de impacto da descarga atmosférica.

No que tange a localização da unidade consumidora considerada para os estudos, com destaque a rede de distribuição compreendida desde a subestação de onde origina o alimentador ao qual se encontrava conectado o consumidor, a Figura 5.1 detalha o arranjo físico em questão. O sistema de distribuição em questão refere-se a um caso ocorrido na cidade de Uberlândia-MG.



Figura 5.1: Posicionamento físico do consumidor reclamante e da subestação de onde deriva se alimentador

Utilizando a opção de “importação” oferecida pelo APR, a caracterização física e paramétrica do consumidor é realizada de forma automática através do sistema geo-referenciado disponível pela empresa. Assim agindo, informações de ordem topológica, constituição física, parte dos parâmetros, etc., são diretamente transferidas para o aplicativo de análise, evitando-se, assim, configurações e parametrizações manuais [128].

Em consonância com o procedimento supra mencionado, o caso em questão passa a ser reconhecido pelo APR em conformidade com o diagrama unifilar indicado na Figura 5.2.

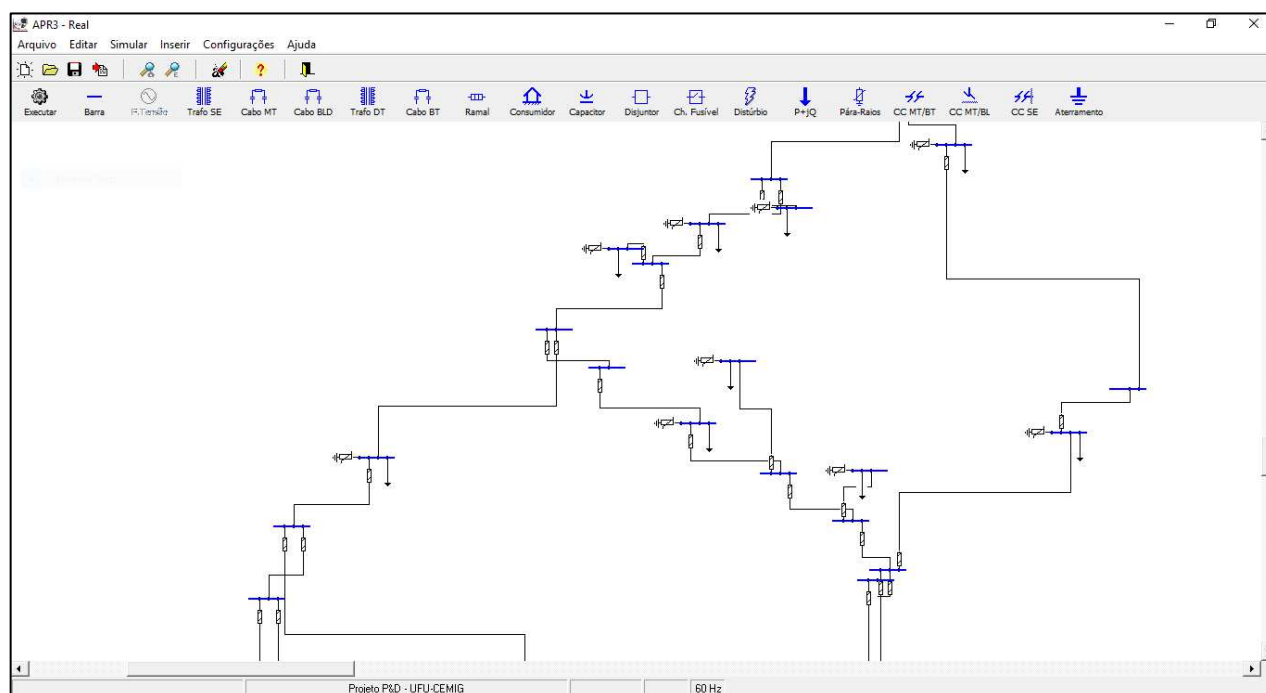


Figura 5.2: Sistema elétrico importado para o APR

Vale lembrar que, tão logo esta etapa seja concluída, torna-se imperativo que a fonte de distúrbio, supostamente responsável pelo dano reclamado, seja imposta e parametrizada, conforme detalhado nas seções subsequentes.

5.3 Implementação no Aplicativo APR e Estudos de Desempenho

A seguir são apresentados os estudos mencionados anteriormente e caracterizados através dos dois casos já identificados:

5.3.1 Caso 1.1 – Modelo de aterramento linear – Descarga atmosférica

Este estudo contempla um PID de um microcomputador, supostamente causado por uma descarga atmosférica incidente no barramento de alta do transformador da unidade consumidora. Neste particular, utilizou-se do modelo de aterramento linear para todos os pontos de aterramento, inclusive o do consumidor reclamante.

Para as hastes de aterramento empregadas na rede de distribuição, foram utilizados parâmetros típicos baseados em um eletrodo de 3 metros de comprimento e 5/8 polegadas de diâmetro. No que se refere à caracterização do solo ao redor destas hastes, o mesmo foi considerado com uma resistividade de $293 \, \Omega\text{m}$. O cálculo da resistência estática de aterramento, para estes parâmetros, resultou em um valor de $98,3 \, \Omega$, utilizando o Modelo das Imagens. O esquema de aterramento adotado foi o TN-S e a alimentação do consumidor via condutores fase e neutro.

No que se refere a parametrização do distúrbio em pauta, qual seja, a incidência da descarga atmosférica junto ao ponto destacado, a Figura 5.3 é indicativa dos procedimentos tradicionalmente utilizados pelo APR para a configuração do distúrbio ora tratado.

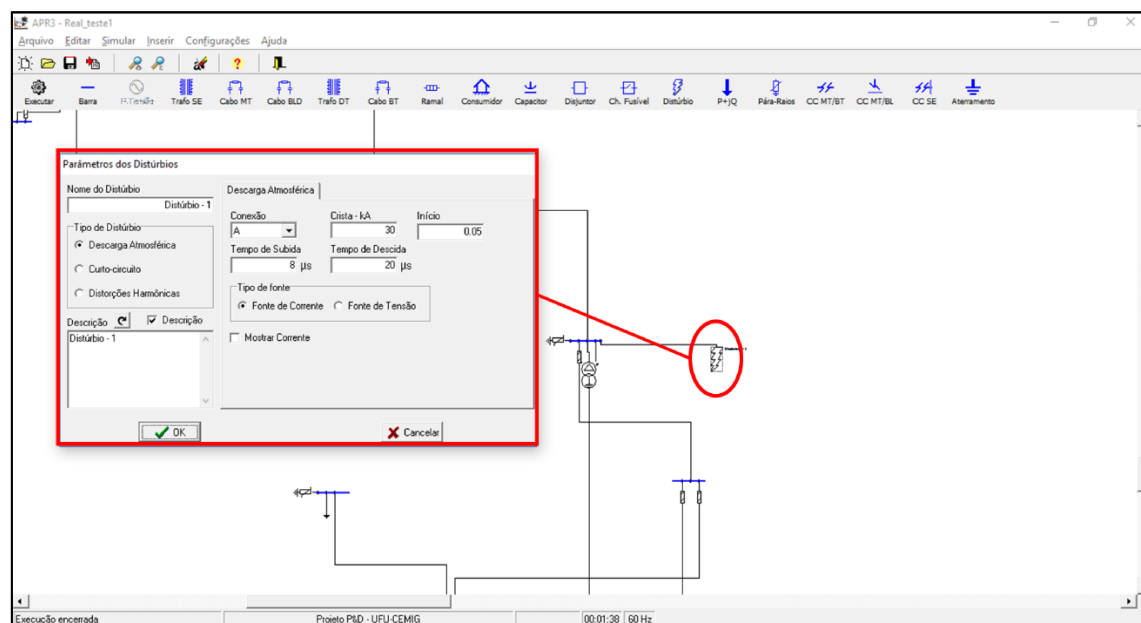


Figura 5.3: Parametrização do distúrbio – Caso 1.1

A Figura 5.4 e a Figura 5.5 ilustram, respectivamente, as formas de onda de tensão e corrente observadas no ponto de conexão do microcomputador com a rede de distribuição. O distúrbio ocorre em 0,5s, e conduziu a um pico de tensão de 39,5 kV e um pico de corrente de 196,1A.

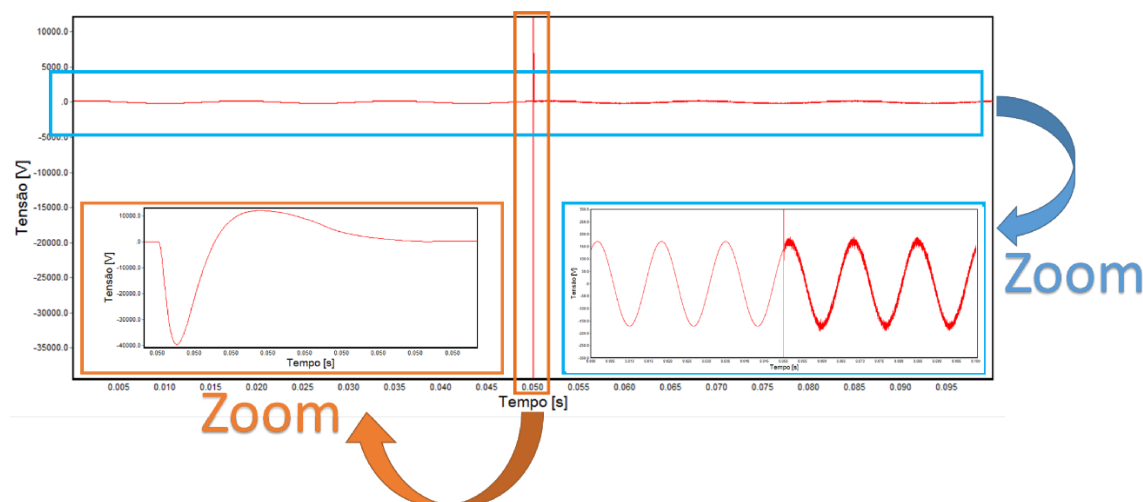


Figura 5.4: Tensão no ponto de conexão do equipamento – Caso 1.1

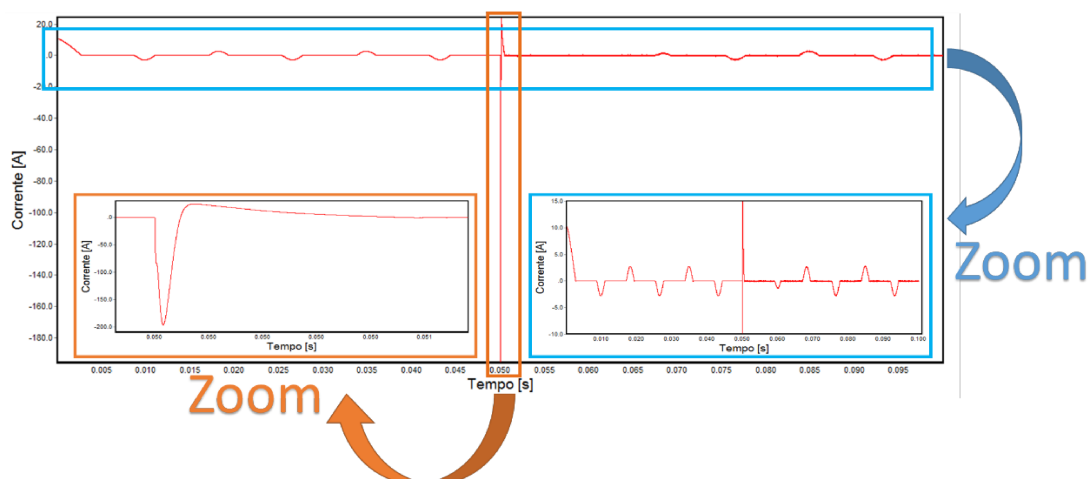


Figura 5.5: Corrente no ponto de conexão do equipamento – Caso 1.1

Com o intuito de associar os resultados obtidos com as curvas de suportabilidade dielétrica e térmica do microcomputador, o APR apresenta o resultado final, expresso através da Figura 5.6 e da Figura 5.7. É importante ressaltar que as curvas de suportabilidade térmica e dielétrica utilizadas nesta pesquisa foram obtidas em [128].

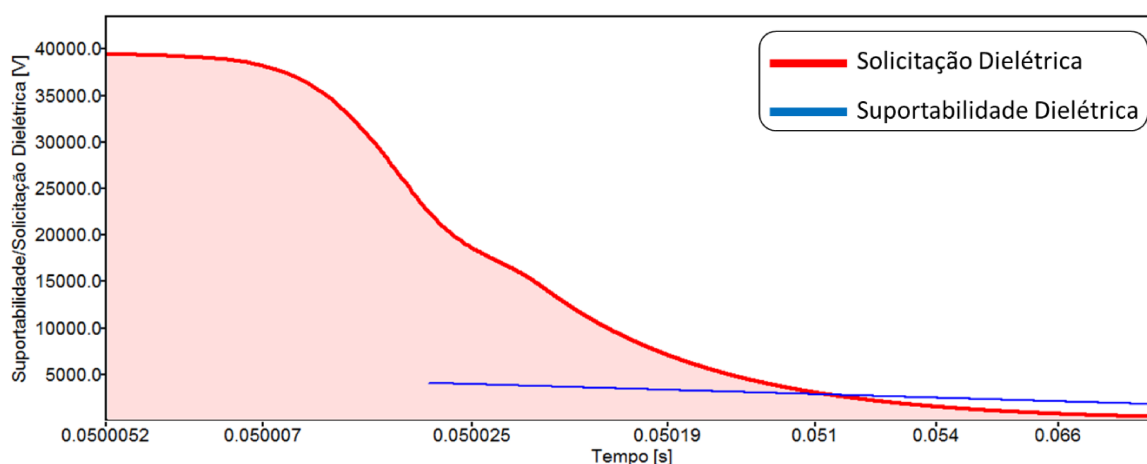


Figura 5.6: Solicitação dielétrica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador – Caso 1.1

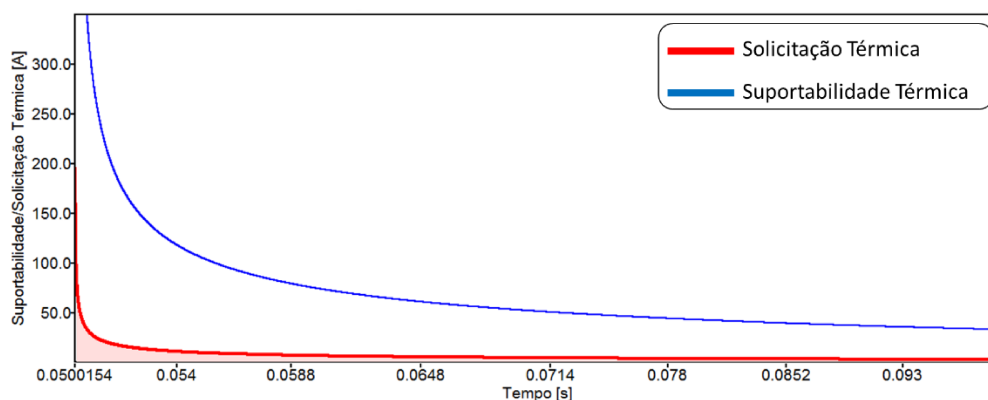


Figura 5.7: Solicitação térmica versus suportabilidade térmica do microcomputador – Caso 1.1

À luz dos resultados obtidos fica evidenciado que os estudos computacionais apontam para as seguintes constatações:

- Há claras evidências de violação dos níveis de tensão admissíveis pelo equipamento. Portanto, do ponto de vista dielétrico, há possibilidade de danos físicos, na forma de rompimento da isolação do microcomputador;
- Com relação ao limite térmico, não há indicativos que o fenômeno seja capaz de produzir danos no equipamento analisado;
- Parecer final: solicitação de PID procedente.

5.3.2 Caso 1.2 – Modelo de aterramento não-linear – Descarga atmosférica

Este caso é parametrizado de maneira similar ao anterior exceto pela utilização do modelo não-linear para a representação do sistema de aterramento da unidade consumidora. Os mesmos parâmetros foram adotados e, adicionalmente para este modelo, foi considerado um campo elétrico crítico de 708 kV/m, conforme dados advindos dos experimentos previamente realizados. O solo considerado foi do tipo homogêneo.

Para inserção dos parâmetros do modelo de aterramento se faz necessário a utilização da interface implementada na plataforma MATLAB, estratégia esta já esclarecida no capítulo anterior.

A Figura 5.8 ilustra a entrada de dados, bem como a execução da rotina de geração do cartão para o modelo não-linear.

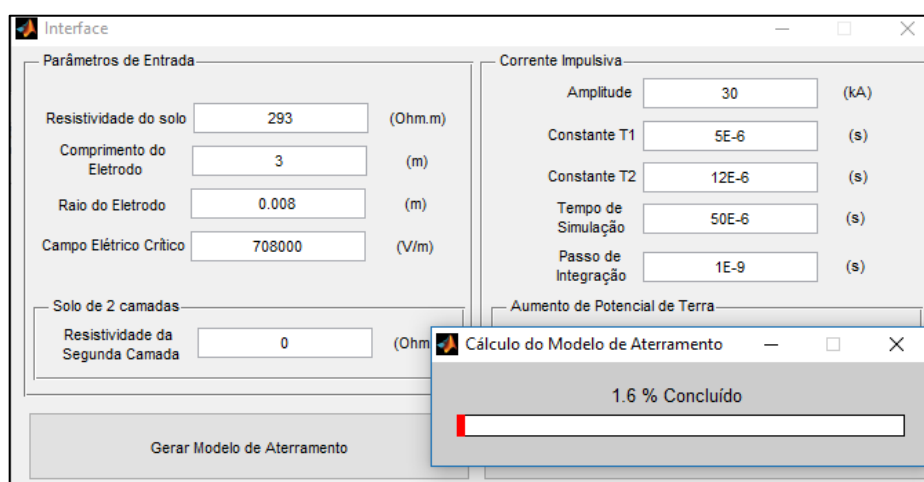


Figura 5.8: Entrada de dados do modelo não-linear – Caso 1.2

Adicionalmente, pode-se visualizar, através da Figura 5.9, o comportamento de decaimento da resistência de aterramento a partir do instante para o qual ocorre a ionização do solo. Após este momento, a resistência decai de seu valor estático de 98,3 Ω para o valor mínimo de 87,1 Ω .

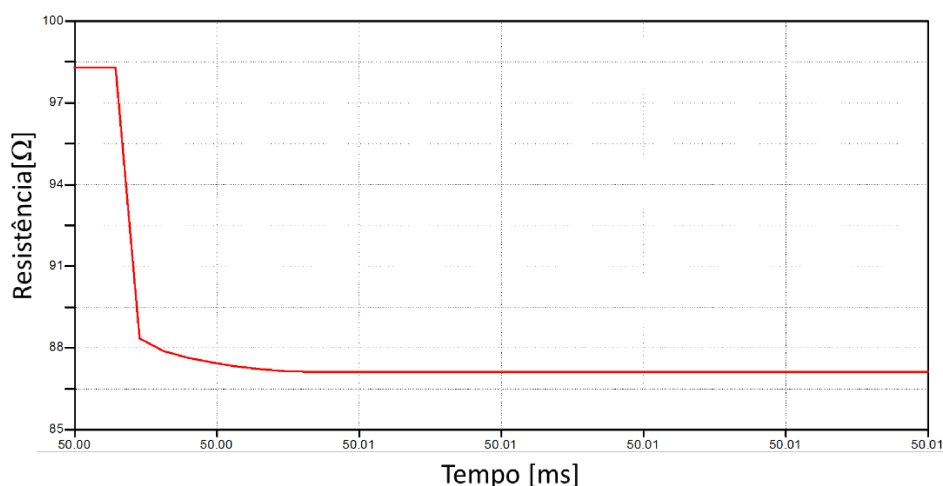


Figura 5.9: Variação da resistência com o tempo – Caso 1.2

A Figura 5.10 e a Figura 5.11 representam, respectivamente, as formas de onda de tensão e corrente observadas no ponto de conexão do televisor com a rede de distribuição. O distúrbio também ocorre em 0,5s, apresentando pico de tensão de 39,0kV e pico de corrente de 195,3A.

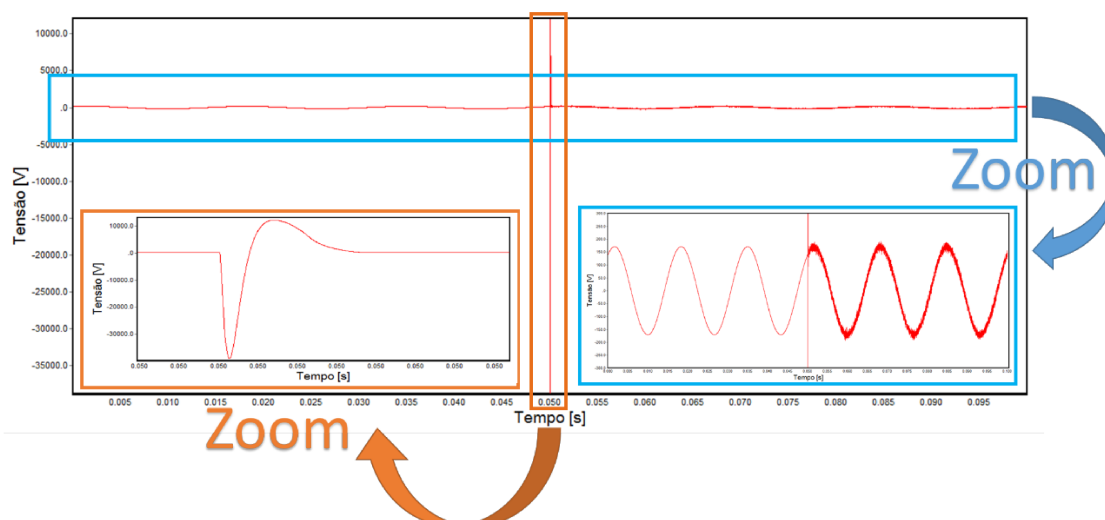


Figura 5.10: Tensão no ponto de conexão do equipamento – Caso 1.2

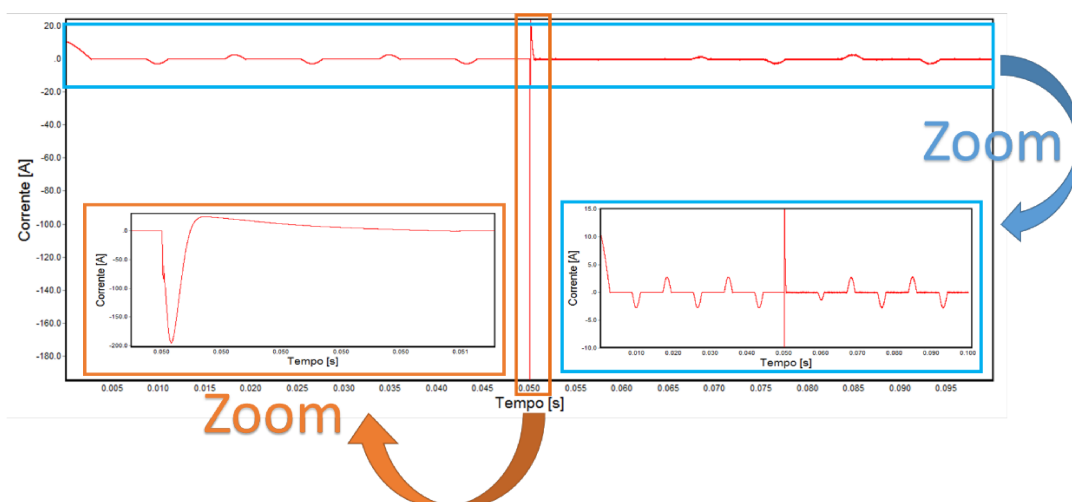


Figura 5.11: Corrente no ponto de conexão do equipamento – Caso 1.2

A Figura 5.12 e a Figura 5.13 apresentam os resultados associados com a correlação entre os esforços dielétricos e térmicos, com relação as respectivas curvas de suportabilidade para o equipamento sob análise.

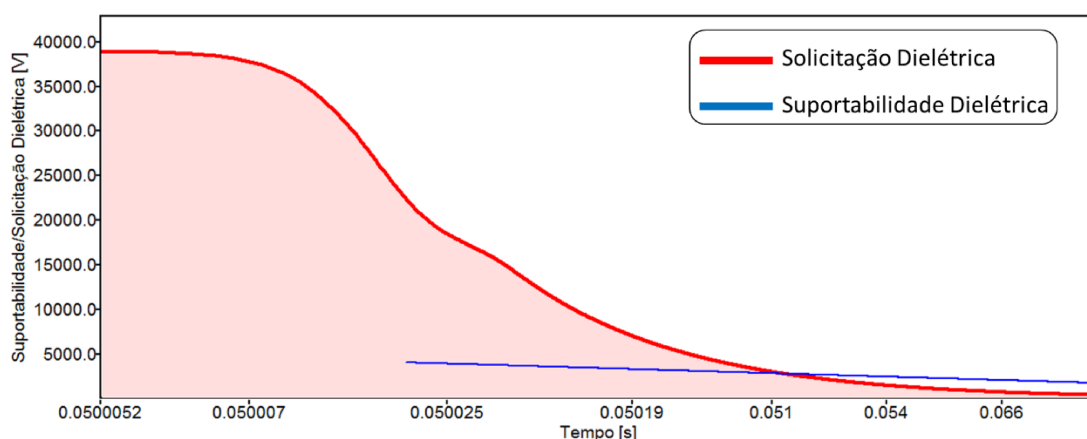


Figura 5.12: Solicitação dielétrica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador – Caso 1.2

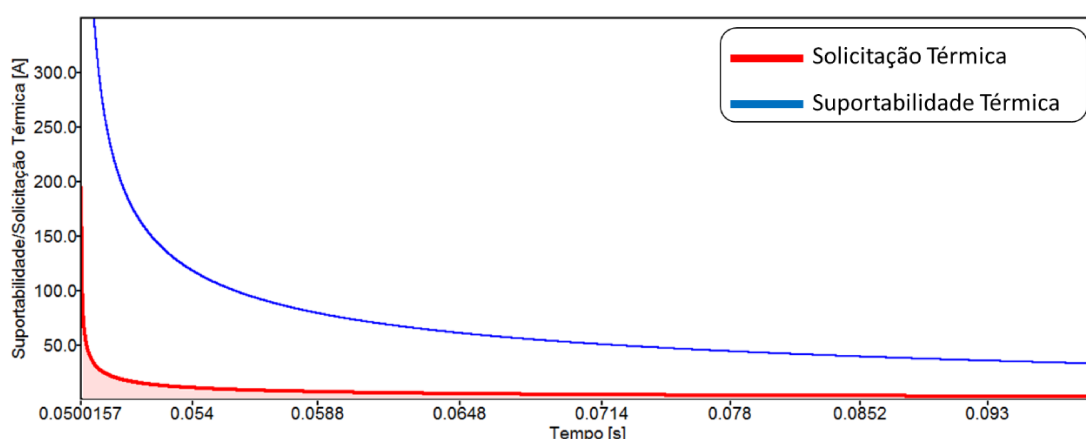


Figura 5.13: Solicitação térmica versus suportabilidade térmica do microcomputador – Caso 1.2

De maneira similar ao caso 1.1, os resultados obtidos apontam as seguintes conclusões:

- Há claras evidências de violação dos níveis de tensão admissíveis pelo equipamento. Portanto, do ponto de vista dielétrico, há possibilidade de danos físicos, na forma de rompimento da isolamento do microcomputador;
- Com relação ao limite térmico, não há indicativos que o fenômeno seja capaz de produzir danos no equipamento analisado;
- Parecer final: solicitação de PID procedente.

É pertinente ressaltar a diferença, mesmo que em pequena escala, dos resultados do caso 1.1 e caso 1.2. Observa-se que, como esperado, o efeito da ionização do solo atenuou a solicitação dielétrica no equipamento. Desta forma, adotando um modelo que se mostra mais fidedigno com a

situação real, sem perda de performance computacional, pode-se ter mais confiabilidade nos resultados emitidos pelo aplicativo.

5.3.3 Caso 2 – Aumento de potencial de terra

Este estudo de caso se apresenta com características físicas, topológicas e paramétricas, similares para a rede de distribuição até o consumidor reclamante. Todavia, a grande distinção é que, para a presente situação, a incidência da descarga ocorre de forma indireta. Em assim sendo, o ponto de impacto do fenômeno e o ponto físico de localização do eletrodo de terra se apresentam distantes, fato este que determina que o tema ora tratado se apresenta consonante com uma das principais contribuições oferecidas por esta tese.

Dentro das premissas postas, resta que, para a avaliação agora feita, os estudos são conduzidos para pontos de impacto da descarga em posições físicas não coincidentes com o eletrodo e para distâncias variáveis, conservando-se, todavia, o solo com formação homogênea.

A Figura 5.14 indica a parametrização da fonte de distúrbio na interface implementada na plataforma MATLAB.

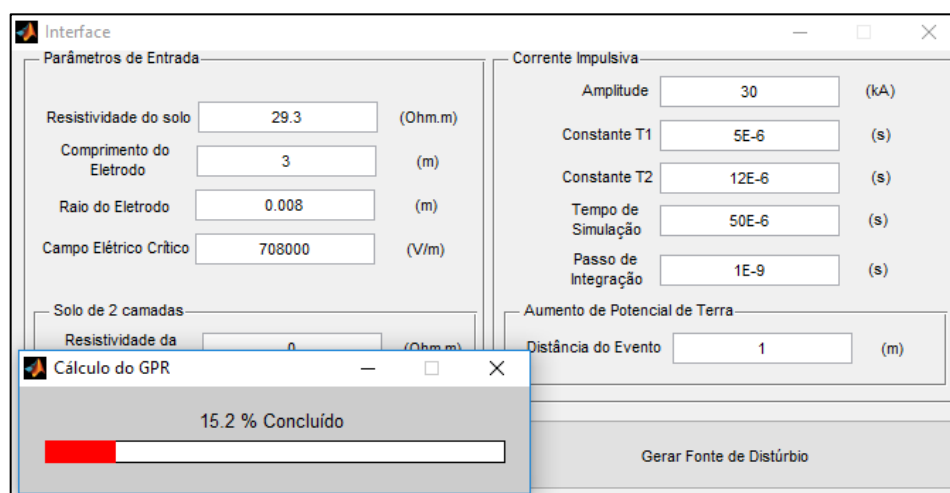


Figura 5.14: Entrada de dados da fonte de distúrbio – Caso 2

Como já esclarecido, o interfaceamento dos estudos no MATLAB com o APR é feito meramente através da seleção da entrada “fonte de medição” deste último, os quais recebe os resultados relativos ao arquivo dos dados do aumento de potencial de terra calculados anteriormente. Visando eventuais inconsistências para os processos, estes são inseridos após 0,1s de simulação.

Para uma distância de 1m (incidência da descarga e eletrodo), a Figura 5.15 e a Figura 5.16 representam, respectivamente, as ondas de tensão e corrente impostas no microcomputador.

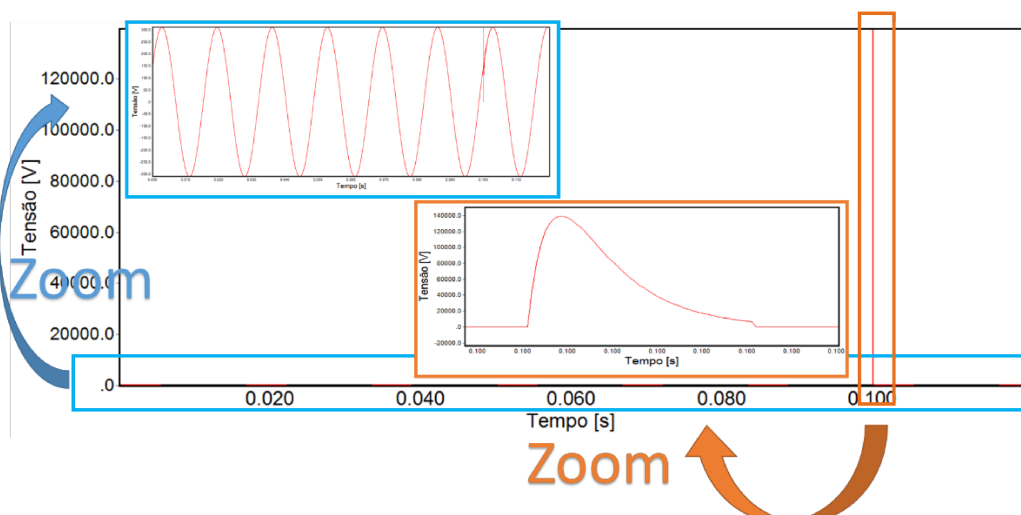


Figura 5.15: Tensão no ponto de conexão do equipamento – 1m – Caso 2

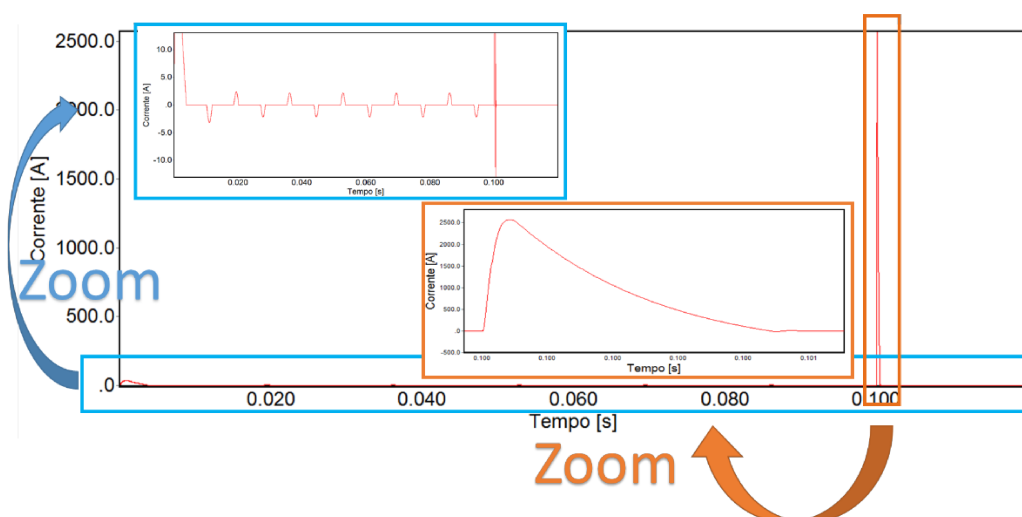


Figura 5.16: Corrente no ponto de conexão do equipamento – 1m – Caso 2

Associando tais resultados com as curvas de suportabilidade dielétrica e térmica, a Figura 5.17 e a Figura 5.18 representam os resultados para o aumento de potencial de terra para o caso em estudo.

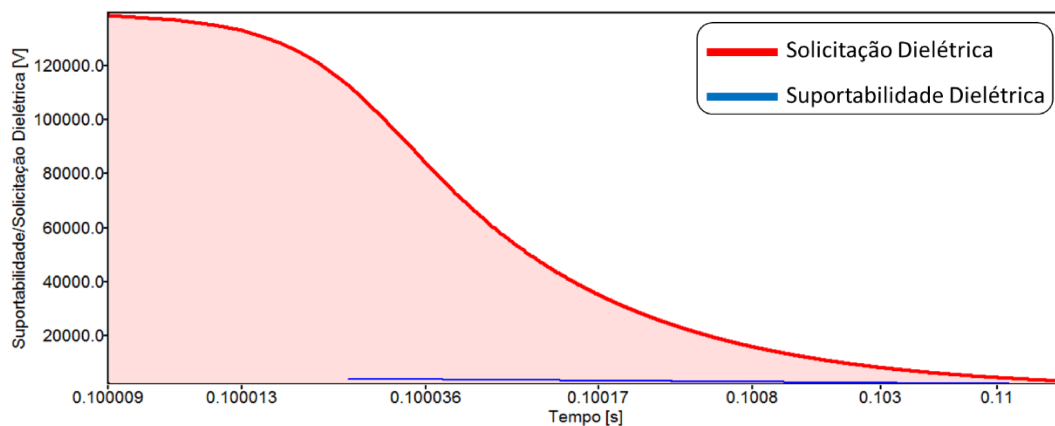


Figura 5.17: Solicitação dielétrica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador – 1m - Caso 2

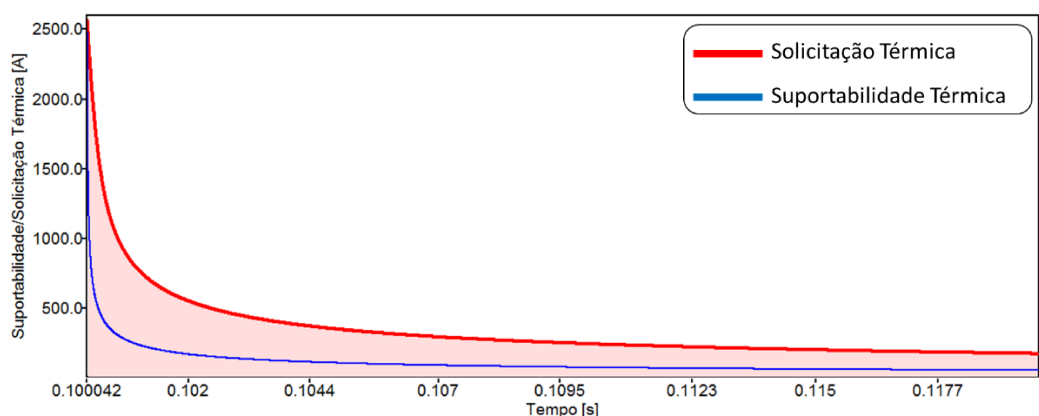


Figura 5.18: Solicitação térmica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador – 1m - Caso 2

Os resultados obtidos apontam para as seguintes constatações:

- Há claras evidências de violação dos níveis de tensão admissíveis pelo equipamento. Portanto, do ponto de vista dielétricos, há possibilidade de danos físicos, na forma de rompimento da isolamento do microcomputador;
- Com relação ao limite térmico, há indicativos que o fenômeno é capaz de produzir danos no equipamento analisado;
- Parecer final: solicitação de PID procedente.

De maneira complementar, com o intuito de averiguar outras situações relacionadas com valores distintos para a distância entre o ponto da descarga e o eletrodo, outras simulações foram realizadas. Assim sendo, para distâncias de 15, 25 35 e 45 metros, os resultados das solicitações dielétricas e térmicas podem ser visualizados na Figura 5.19 e na Figura 5.20, respectivamente.

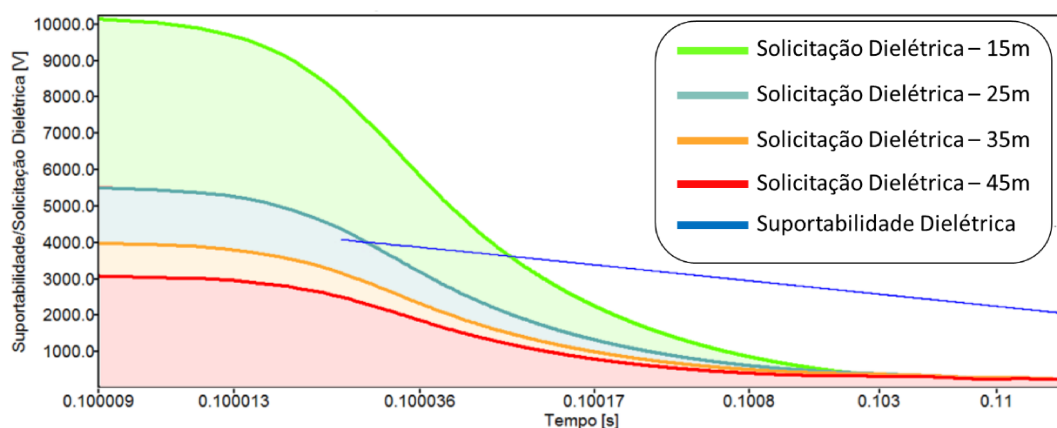


Figura 5.19: Solicitação dielétrica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador para diferentes distâncias - Caso 2

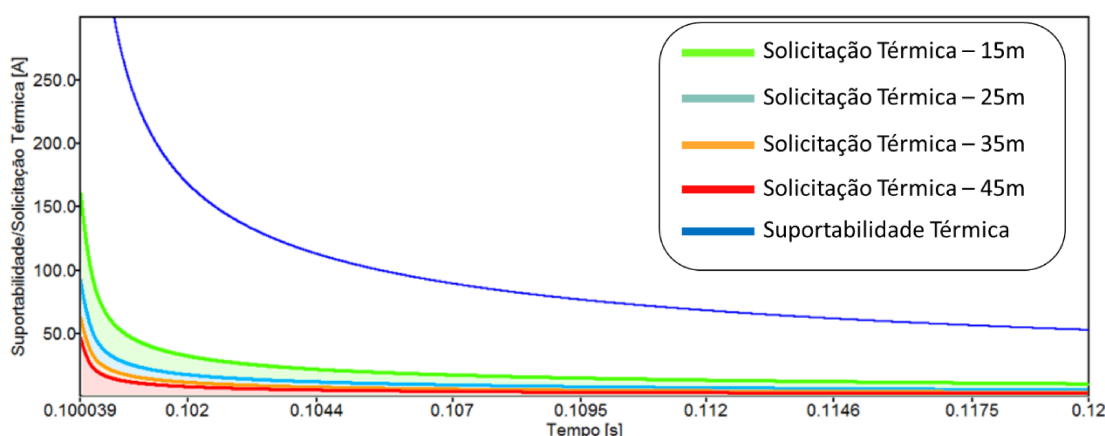


Figura 5.20: Solicitação térmica versus suportabilidade dielétrica do microcomputador para diferentes distâncias - Caso 2

Observa-se que para distâncias superiores a aproximadamente 25 metros, no que tange a suportabilidade dielétrica, o aumento de potencial de terra não apresenta evidências de violações dielétricas capazes de produzir danos no equipamento. Por outro lado, do ponto de vista térmico, nenhuma das simulações apresentou indícios de possibilidade de danos causados por solicitações térmicas.

5.4 Considerações finais

Objetivando a avaliação do desempenho da metodologia desenvolvida e implementada no aplicativo APR, o qual passa a viabilizar a correlação entre as incidências indiretas das descargas atmosféricas e as elevações dos potenciais de terra, procedeu-se, neste capítulo a realização de estudos típicos visando evidenciar a nova potencialidade do aplicativo APR.

Nos termos originais, este *software*, como esclarecido ao longo da tese, se apresentava, dentre outras limitações, com uma representação não-linear, condicionada a constantes de correlação, para a resistência do sistema de aterramento, e ainda, apenas impactos diretos sobre o suprimento elétrico dos consumidores se faziam disponíveis.

Diante dos avanços oferecidos por esta tese, o *software* de análise de PIDs passa, a partir de agora, a contemplar meios para as investigações associadas com os fenômenos atrelados com as variações das resistências dos sistemas e aterramento, e ainda, dos efeitos das descargas indiretas sobre os potenciais de terra, os quais podem se mostrar como vias de acesso para resultar em danos físicos nos equipamentos das instalações consumidoras.

Para tais fins foram definidos, dentre um grande universo passíveis de estudos práticos, uma situação vinculada com uma solicitação de indenização feita por um consumidor suprido por uma empresa distribuidora de energia elétrica. O fato selecionado recaiu sobre um microcomputador,

supostamente danificado pela incidência de uma descarga atmosférica, a qual, à princípio, não fora identificada como direta ou indireta. A topologia e parametrização do caso exemplo quanto a rede elétrica física desde a subestação de alimentação até a unidade consumidora foram realizados através do recurso do APR denominado por “modo de importação”, o qual acessa o sistema geo-referenciado da empresa distribuidora.

Tomando por base este caso exemplo, foram então realizados dois grupos de análises através do aplicativo APR. Um grupo de estudos contemplou a incidência direta de uma descarga atmosférica e duas condições para a resistência do eletrodo de aterramento existente na entrada da instalação consumidora. Uma primeira admitindo-se que este parâmetro foi adotado como invariável com os níveis de tensão e corrente da descarga (Caso 1.1 – resistência de terra linear), e outra, para a qual foi considerado o fenômeno da ionização e respectivos impactos sobre a mencionada resistência de aterramento (Caso 1.2 – resistência de terra não-linear).

Almejando ilustrar a questão das manifestações dos fenômenos indiretos, uma outra condição foi utilizada para os estudos. Nesta, a descarga ocorreu para diferentes pontos físicos próximos ao do sistema de aterramento do consumidor, o qual foi tratado, para todos os casos considerados, como não-linear. Estes estudos foram identificados como Caso 2.

Os resultados oferecidos pelo APR para os Casos 1.1 e 1.2 ilustraram que ambas as situações ocasionaram violações dos limites de suportabilidade dielétrica do equipamento considerado, todavia, o emprego da metodologia que considera o efeito da ionização na região circunvizinha do eletrodo de terra, como seria esperado, conduziu a valores quantitativos significativamente mais atenuados que aqueles encontrados quando tal efeito não fora contemplado.

Por fim, as avaliações conduzidas para o Caso 2, também com indicativos condizentes com as expectativas, ratificaram que o processo de análise se apresenta com impactos fortemente influenciados à medida que a distância entre o ponto de incidência do fenômeno atmosférico varia em relação ao local físico da haste de aterramento. De fato, os resultados mostraram que, em consonância com as distâncias adotadas, uma mesma descarga pode ser considerada como provável causa para os supostos danos ocorridos, enquanto que, com o aumento dos espaçamentos físicos, estes serão suficientes para eximir o nexo-causal. Não obstante tais constatações, fica aqui o reconhecimento que uma plena identificação do exato local do impacto em relação ao do eletrodo de terra é, para muitas aplicações, de difícil constatação. Dentro desta lógica, é de se recomendar que, na ausência de informações concretas sobre o fato, que seja adotada a situação mais drástica para a correlação ora em foco.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 Considerações Finais

Muito embora ao longo do texto elaborado tenha-se sintetizado, na forma de cinco capítulos, as principais informações voltadas para: a caracterização do estado da arte sobre o tema e sua relevância para o atual estágio de desenvolvimento das técnicas de análise de PIDs, as lacunas ainda existentes e os desafios ainda oferecidos, os métodos de análise aplicáveis ao tema central da pesquisa e contribuições próprias deste trabalho, as novas potencialidades que passaram a incorporar o atual aplicativo APR, dentre outras questões, considera-se essencial, neste momento, condensar as principais contribuições e avanços atingidos.

Iniciando pelo Capítulo 2, este foi centrado na descrição do estado da arte sobre os modelos em prática para os sistemas de aterramento, explorando aspectos gerais associados com: definições, conceitos sobre a dependência dos parâmetros do solo com a frequência, mecanismos físicos sobre a propagação de ondas no aterramento e, o fenômeno da ionização. Muito embora o reconhecimento que o conteúdo desta unidade tenha sido caracterizado com cunho didático e de caracterização do estado da arte, em que pese aspectos associados com a representação dos sistemas de aterramento através de métodos analíticos, empíricos e numéricos, foram ainda tecidas considerações sobre as representações lineares e não-lineares e, sobretudo, as motivações para o emprego de um ou outro procedimento.

Como ressaltado, representações do sistema de aterramento via modelos lineares, não obstante suas simplicidades, os resultados apresentam-se com significativas limitações advindas do fenômeno da ionização do solo. Ressalta-se que os modelos enquadrados nesta categoria são amplamente utilizados pelas concessionárias de energia, fato este atribuído a sua simplicidade, facilidade de obtenção de dados e rapidez da análise.

Objetivando a melhoria destas representações, surgem os modelos baseados em componentes não-lineares. Naturalmente, à medida que os modelos incrementam em qualidade, os mesmos se tornam mais complexos e passam a requerer informações mais elaboradas e detalhadas. Por outro lado, tais opções resultam em maiores exatidões de suas respostas.

Combinando propriedades associadas com a variação da geometria e ionização do solo, heterogeneidade do solo, simplicidade quando aos princípios e dados requeridos, foi explorado e

estabelecido o Modelo das Imagens como metodologia de cálculo para os propósitos desta tese. Adicionalmente, de modo a validar o modelo, análises comparativas, com dados derivados de cinco diferentes experimentos, foram realizadas.

Prosseguindo, o capítulo 3 focou, sobremaneira, o estabelecimento da correlação entre a incidência de descargas atmosféricas indiretas e respectivos impactos sobre o processo de análise dos pedidos de indenização por danos elétricos. Para tanto foi proposto um modelo para a determinação dos níveis dos potenciais de terra através de formulações analíticas que contemplaram o fenômeno da ionização do solo e solos heterogêneos de duas camadas, baseando na premissa que a incidência da descarga atmosférica ocorre diretamente sobre a superfície do solo. Visando consubstanciar a modelagem e diante da carência de informações sobre os limites críticos de suportabilidade dielétrica dos solos, foram então realizados vários ensaios experimentais objetivando a determinação de informações próprias a diferentes tipos de solo. Para tanto, amostras de solo advindas de algumas regiões do país foram coletadas, e os ensaios feitos em laboratório propiciaram dados relevantes à aplicação da metodologia apresentada de forma consistente com a realidade nacional.

Uma vez estabelecidos, tanto a metodologia quanto os meios para o fornecimento dos dados requeridos por esta, foram então realizados trabalhos de cunho computacional, destinados a obtenção de recursos para os processamentos dos cálculos das desejadas elevações de potencial, diante da ocorrência de descargas indiretas.

O capítulo 4, por sua vez, foi imbuído do propósito de aprimorar o aplicativo APR. Com vistas ao atendimento a este requisito foram, inicialmente, criados cartões destinados a incorporar as propostas desta pesquisa na forma de uma rotina na plataforma MATLAB, que ainda realiza as modificações necessárias para a adequação das melhorias no contexto do aplicativo APR. Por fim, tendo por foco o APR propriamente dito, foram feitas as devidas adequações para o interfaceamento dos recursos obtidos com o *software* de análise.

Objetivando a avaliação do desempenho da metodologia desenvolvida e implementada no aplicativo APR, o qual passa a viabilizar a correlação entre as incidências indiretas das descargas atmosféricas e as elevações dos potenciais de terra, procedeu-se, neste capítulo a realização de estudos típicos visando evidenciar a nova potencialidade do produto final desta tese. Este *software*, diante dos desenvolvimentos aqui reportados, passa constituir uma nova versão com atributos para contemplar investigações associadas com os fenômenos atrelados com as variações das resistências dos sistemas e aterramento, e ainda, dos efeitos das descargas indiretas sobre os potenciais de terra, os quais podem se mostrar como vias de acesso para resultar em danos físicos nos equipamentos das instalações consumidoras.

Para a avaliação do desempenho do produto final foi utilizado um caso típico de PID, envolvendo um pedido de indenização. O fato selecionado recaiu sobre um microcomputador, supostamente danificado pela incidência de uma descarga atmosférica direta. Tomando por base este caso exemplo, foram então realizados dois grupos de análises através do aplicativo APR. Um grupo de estudos contemplou a incidência direta de uma descarga atmosférica e duas condições para a resistência do eletrodo de aterramento existente na entrada da instalação consumidora. Uma primeira admitindo-se que este parâmetro foi adotado como invariável com os níveis de tensão e corrente da descarga (Caso 1.1 – resistência de terra linear), e outra, para a qual foi considerado o fenômeno da ionização e respectivos impactos sobre a mencionada resistência de aterramento (Caso 1.2 – resistência de terra não-linear). Também, de modo a ilustrar situações associadas com fenômenos indiretos, uma outra condição foi utilizada para os estudos. Nesta, a descarga ocorreu para diferentes pontos físicos próximos ao do sistema de aterramento do consumidor, o qual foi tratado, para todos os casos considerados, como não-linear. Estes estudos foram identificados como Caso 2.

Os resultados oferecidos pela nova versão do APR, à luz dos Casos 1.1 e 1.2 ilustraram que ambas as situações ocasionaram violações dos limites de suportabilidade dielétrica do equipamento considerado, em que pese o fato que a inclusão do efeito da ionização na região circunvizinha do eletrodo de terra, como seria esperado, conduziu a valores quantitativos significativamente mais atenuados que aqueles encontrados quando tal efeito não fora contemplado. No que tange ao Caso 2, os resultados ratificaram que o processo de análise se apresenta com impactos fortemente influenciados à medida que a distância entre o ponto de incidência do fenômeno atmosférico varia em relação ao local físico da haste de aterramento.

Não obstante os avanços oferecidos pelas contribuições feitas por esta tese, fica aqui registrado o reconhecimento que os trabalhos pertinentes ao tema são ainda merecedores de estudos complementares, até que o aplicativo APR possa atingir um nível de segurança e confiabilidade que resulte na sua utilização como ferramenta de análise para a avaliação da consistência ou não do nexo causal associado com os pedidos de indenização por danos em consumidores.

A exemplo destas áreas ainda merecedoras de desenvolvimentos ressalta-se:

- A modelagem e estudos de desempenho dos solos heterogêneos com mais de duas camadas;
- A necessidade de maiores atenções às questões vinculadas com a determinação dos campos elétricos críticos, os quais, até o momento, foram tratados na forma de indicativos numéricos derivados de experimentos;

- Estabelecimento de meios experimentais para a obtenção dos potenciais de terra, visando correlacionar a efetividade do processo estabelecido com uma base de dados extraída de medições;
- Aprimoramento do *software* de análise, através de um processo sistematizado dispensando a intervenção humana na elaboração dos resultados, de modo a isentar possíveis equívocos e manipulações humanas, permitindo aos agentes fiscalizadores facilidade de acesso às informações, visando adequação ao padrão de arquivo proposto no Módulo 10 do PRODIST.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. Granaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2^a. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [2] M. H. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. Piscataway: IEEE Press, 2000.
- [3] K. Ermeler, W. Pfeiffer, D. Schoen, and M. Schocke, "Surge immunity of electronic equipment," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 12–16, 2000.
- [4] H. R. P. M. Oliveira, N. C. JESUS, and M. L. B. MARTINEZ, "Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodomésticos Durante Ensaio de Sobretensões," in *XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2005.
- [5] M. D. Teixeira, R. L. Araujo, N. S. R. Quorin, L. M. Ardjomand, A. R. Aoki, G. Paulillo, A. P. Sgobero, and I. Wunderlich, "Acceptable power quality limits to avoid damages in appliances," *WSEAS Trans. Circuits Syst.*, vol. 4, pp. 479–485, 2005.
- [6] ANEEL, "Resolução Normativa N^o 345," Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, Report, 2008.
- [7] A. S. Jucá, "Avaliação do Relacionamento entre Consumidores e Concessionárias na Solução de Conflitos por Danos Elétricos: Proposta de Adequação," Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [8] ANEEL, "Ouvidoria Setorial em números: 2016," Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2016.
- [9] I. N. Gondim, P. H. O. Rezende, J. C. Oliveira, J. R. Macedo Junior, A. C. O. Salomão, and N. Kagan, "Reimbursement Procedure due to Electrical Damages: the Subject Relevance, Juridical Fundamentals, Agency Standards, Analysis Procedures and Trends," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 10, p. 1/6, 2012.
- [10] A. C. O. Salomão, "Uma abordagem jurídica à questão do ressarcimento de danos elétricos pelas distribuidoras de energia," Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- [11] N. Watson and J. Arrillaga, *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*, vol. 39. Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [12] W. Kennedy, *Power Quality Primer*. McGraw-Hill, 2000.
- [13] A. Kusko and M. T. Thompson, *Power Quality in Electrical Systems*, 12th ed. Nova York: McGraw-Hill Professional, 2007.
- [14] ANEEL, "Resolução Normativa N^o 664," Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, Report, 2015.
- [15] ONS, "Submódulo 2.2 - Padrões de desempenho da rede básica," Operador Nacional do Sistema, 2002.
- [16] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST," Brasília/DF, 2011.
- [17] ITIC, "Curve Application Note." [Online]. Available: <http://www.itic.org/clientuploads>. [Accessed: 01-Jul-2014].
- [18] S. B. Smith and R. B. Standler, "The effects of surges on electronic appliances," *IEEE Trans.*

- [19] R. Arseneau and M. Ouellette, “The Effects Of Supply Harmomcs On The Performance Of Compact Fluorescent Lamps,” in *ICHPS V International Conference on Harmonics in Power Systems.*, 1992, vol. 8, no. 2, pp. 221–227.
- [20] A. C. D. Santos, “Desempenho de fontes lineares e chaveadas no contexto da qualidade da energia elétrica,” phdthesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- [21] A. C. Azevedo, “Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica,” Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- [22] R. N. Magalhães, “Controlador Lógico Programável no Contexto da Qualidade da Energia,” Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.
- [23] R. A. Peniche, “Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia – Enfoque: Aparelhos de DVD, Fax e Telefone sem fio,” Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [24] C. E. Tavares, “Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia – Enfoque: Televisores, VCR’s e Som,” Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [25] H. R. P. M. Oliveira, N. C. Jesus, and G. B. Vicili, “Sensibilidade de Equipamentos Eletrodomésticos Submetidos a Afundamentos de Tensão,” in *XVIII SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2005.
- [26] B. C. Carvalho, “Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica,” phdthesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- [27] E. F. Fuchs, D. J. Roesler, and K. P. Kovacs, “Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System’s Voltage. Part II: Television Sets, Induction Watthour Meters and Universal Machines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 2, no. 4, pp. 445–453, 1987.
- [28] L. M. Anderson and K. B. Bowes, “Effects of power-line disturbances on consumer electronic equipment,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 2, pp. 1062–1065, 1990.
- [29] J. C. Smith, J. Lamoree, P. Vinett, T. Duffy, and M. Klein, “The Impact of Voltage Sags on Industrial Plant Loads,” in *International Conference on Power Quality End-Use Applications and Perspectives*, 1991, pp. 171 – 178.
- [30] Y. Sekine, T. Yamonoto, S. Mori, N. Saito, and H. KuroKawa, “Presents State of Momentary Voltage Dip Interferences and the Countermeasure in Japan,” in *International Council on Large Electric Systems (CIGRE)*, 1992.
- [31] W. E. Reid, “Power quality issues-standards and guidelines,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, pp. 108–115.
- [32] K. J. Cornick and H. Q. Li, “Power quality and voltage dips: problem, requirements, responsibilities,” in *International Conference onAdvances in Power System Control, Operation and Management.*, 2000, vol. 1, pp. 149–156.
- [33] Electric Power Research Institute, “Ride-trough Performance of Programmable Logic Controllers,” *Power Qual. Test. Netw.*, vol. 39, 2007.
- [34] C. E. Tavares, “Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento de Danos a Consumidores,” Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

-
- [35] IEC, “Electromagnetic compatibility (EMC): Part 4-5: Testing and measurement techniques: Surge immunity test,” *IEC Std 61000-4-5*, 1995.
 - [36] IEEE, “IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances,” *IEEE Std 1250-1995*, vol. 1995, pp. 1–64, 2002.
 - [37] S. W. Meyer and T. Liu, *Alternative Transients Program (ATP) - Rule Book*. 1992.
 - [38] B. C. Carvalho, “Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica,” Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
 - [39] I. A. Bacca, “Modelagem para Análise de Desempenho de Equipamentos da Linha Branca diante de Distúrbios de Qualidade da Energia,” Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
 - [40] M. V. B. Mendonça, “Contribuições ao Processo Computacional para Análise de Pedidos de Indenização por Danos em Equipamentos Elétricos,” Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
 - [41] N. M. Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, “Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, pp. 353–361, 2006.
 - [42] S. Sekioka, M. I. Lorentzou, M. P. Philippakou, and J. M. Prousalidis, “Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, pp. 194–201, 2006.
 - [43] A. C. Liew and M. Darveniza, “Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 121, no. 2, p. 123, 1974.
 - [44] L. Grcev and F. Dawalibi, “An electromagnetic model for transients in grounding systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 4, pp. 1773–1781, 1990.
 - [45] M. Nayel, a. Ametani, Y. Baba, N. Nagaoka, and S. Sekioka, “A study on a mutual grounding impedance and its transient characteristic,” in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2002, vol. 2, pp. 1270–1275 vol.2.
 - [46] Y. Liu, N. Theethayi, and R. Thottappillil, “An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes: Nonuniform transmission-line approach,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 722–730, 2005.
 - [47] N. M. Nor, “Simulation of earthing systems under high impulse conditions,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2007, pp. 347–352.
 - [48] M. E. Almeida and M. T. C. De Barros, “Modelling of long ground electrodes for lightning studies,” in *High Voltage High Voltage Engineering Symposium*, 2004, vol. 2, p. 5.
 - [49] F. J. T. Teixeira, “Modelização de Eléctrodos de Terra em Sistemas Eléctricos de Energia,” Thesis, Universidade do Porto, Porto, 2000.
 - [50] L. Gonçalves Junior, “Estudo Teórico-experimental do Comportamento de Sistemas de Aterramento Percorridos por Correntes Impulsivas,” Thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
 - [51] N. Harid, H. Griffiths, and A. Haddad, “Computation model for ground potential and current distribution in ground impedance measurements at high-voltage towers,” in *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2007, pp. 806–811.
 - [52] R. Alipio and S. Visacro, “Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect of Frequency-Dependent Soil Parameters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 2, pp. 716–723, 2014.
-

-
- [53] S. Sekioka, H. Hayashida, T. Hara, and A. Ametani, "Measurements of grounding resistances for high impulse currents," *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 145, no. 6, p. 693, 1998.
- [54] S. Sekioka, T. Sonoda, and A. Ametani, "Experimental study of current-dependent grounding resistance of rod electrode," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 1569–1576, 2005.
- [55] S.-D. Chen, L.-H. Chen, C.-K. Cheng, and J.-F. Chen, "An Experimental Study on the Electrical Properties of Fly Ash in the Grounding System," *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 7, no. 2, Jan. 2006.
- [56] Z. Sun, J. Wang, X. Qie, N. Xiang, C. Fang, and J. Chen, "Observation of lightning current and ground potential rise in artificially triggered lightning experiment," in *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2008*, 2008, pp. 277–280.
- [57] S. Visacro, F. Almeida, A. L. Senna Filho, and W. L. P. Pinto, "Resposta de Aterramentos Eléctricos a Correntes de Raios: Uma Avaliação Experimental," in *Encuentro Regional Ibero-americano do CIGRÉ (eriac)*, 2009, pp. 1–6.
- [58] N. M. Guimarães, L. Araujo, R. V. Castro, L. F. D. Santos, M. H. Murta Vale, and S. Visacro, "Impulse response of grounding grids: Experimental versus simulated results," in *2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012*, 2012, pp. 1–4.
- [59] S. Visacro and R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, 2012.
- [60] R. Alipio and S. Visacro, "Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of grounding electrodes," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 1, pp. 132–139, 2013.
- [61] J. Wang, A. C. Liew, and M. Darveniza, "Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 3, pp. 2160–2165, 2005.
- [62] F. Jorge and T. Teixeira, "Aplicação do EMTP-ATP ao Estudo Comportamental dos Eléctrodos de Terra em Sistemas Eléctricos de Energia – Utilização de Diversos Modelos Bibliográficos," *Rev. Iberoam. del ATP*, pp. 1–28, 2002.
- [63] M. Carrescia and G. Molina, "Analysis of conductive interference, on electronic equipment, dueto low frequency currents flowing through the earthing installation," in *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996, vol. 3, pp. 1823–1827 vol.3.
- [64] D. Haluza, "Lightning, ground potential rise, and electrical damage; protecting wayside equipment on the MTA Long Island Rail Road," in *Proceedings of the 1996 ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, 1996, pp. 111–135.
- [65] B. A. DeCarlo, V. A. Rakov, J. E. Jerauld, G. H. Schnetzer, J. Schoene, M. A. Uman, K. J. Rambo, V. Kodali, D. M. Jordan, G. Maxwell, S. Humeniuk, and M. Morgan, "Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building; Part I: Triggered-Lightning Experiments," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 2439–2446, Oct. 2008.
- [66] Lin Li and V. A. Rakov, "Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building; Part II: Numerical Modeling," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 2447–2455, Oct. 2008.
- [67] F. P. Zupa and J. F. Laidig, "A Practical Ground Potential Rise Prediction Technique for Power Stations," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-99, no. 2, p. 459, 1980.
-

-
- [68] L. Grcev, "Modelling of grounding systems for better protection of communication installations against effects from electric power system and lightning," in *Telecommunications Energy Conference, 2001. INTELEC 2001. Twenty-Third International*, 2001, pp. 461–468.
- [69] T. Thanasaksiri, "Ground potential rise from lightning overvoltage in communication station," in *5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2008*, 2008, vol. 2, pp. 905–908.
- [70] A. P. L. Chandimal and C. Gomes, "Lightning related effects on the neighborhood of telecommunication tower sites," in *2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012*, 2012, pp. 1–6.
- [71] R. L. Cohen, *How to Protect Your House and Its Contents from Lightning: Surge Protection : IEEE Guide for Surge Protection of Equipment Connected to AC Power and Communication Circuits*. IEEE Computer Society Press, 2005.
- [72] K. Withironprasert, N. Tamwong, S. Chusanapiputt, and S. Phoomvuthisarn, "Influence of ground potential rise on recloser control broad in distribution lines," in *2006 International Conference on Power System Technology, POWERCON2006*, 2007, pp. 1–5.
- [73] A. Ametani, K. Matsuoka, H. Omura, and Y. Nagai, "Surge voltages and currents into a customer due to nearby lightning," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, Lyon, pp. 428–435, 2009.
- [74] J. Schoene, M. A. Uman, V. A. Rakov, J. Jerauld, K. J. Rambo, D. M. Jordan, G. H. Schnetzer, M. Paolone, C. A. Nucci, E. Petrache, and F. Rachidi, "Lightning currents flowing in the soil and entering a test power distribution line via its grounding," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 3, pp. 1095–1103, 2009.
- [75] T. Miyazaki, T. Ishii, and S. Okabe, "A field study of lightning surges propagating into residences," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 4, pp. 921–928, 2010.
- [76] S. Sekioka, K. Aiba, T. Miyazaki, and S. Okabe, "Lightning overvoltages in low-voltage circuit for various lightning striking points," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 3095–3104, 2010.
- [77] S. Sekioka, K. Mori, N. Fukazu, K. Aiba, and S. Okabe, "Simulation model for lightning overvoltages in residences caused by lightning strike to the ground," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 2, pp. 970–978, 2010.
- [78] S. Sekioka, K. Aiba, and S. Okabe, "Lightning Overvoltages on Low Voltage Circuit Caused by Ground Potential Rise," *Proc International Conference on Power Systems Transients*. Lyon, 2007.
- [79] F. Nakazato, H. Shimizu, and N. Watanabe, "A study on lightning protection system for low voltage customer system using EMTP," in *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, APL2011*, 2011, pp. 629–632.
- [80] N. M. Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Performance of earthing systems of low resistivity soils," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 4, pp. 2039–2047, 2006.
- [81] N. Mohamad Nor and A. Ramli, "Electrical properties of dry soil under high impulse currents," *J. Electrostat.*, vol. 65, no. 8, pp. 500–505, 2007.
- [82] J. Beltani, "Medição de malha de terra em subestações energizadas," Thesis, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- [83] ANEEL, "Resolução Normativa N° 499," Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília,
-

-
- Report, 2012.
- [84] ABRADÉE, “Procedimento para Análise de Solicitação de Ressarcimento de Danos Materiais a Terceiros,” Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, Report, 2003.
 - [85] ANEEL, “Ressarcimento de Danos em Equipamentos Elétricos Causados por Descargas Atmosféricas e Manobras,” Agência Nacional de Energia Elétrica – Superintendência de Mediação Administrativa Setorial, Brasília, Report, 2002.
 - [86] F. J. Pazos, J. Amantegui, F. Ferrandis, and A. Barona, “Sobretensões em Sistemas de BT devidas a manobras na média tensão,” *Rev. Eletr. Mod.*, 2008.
 - [87] B. R. Costa and V. J. Luciano, “Uma Nova Abordagem Técnica sobre a Queima de Equipamentos em Análises de Ressarcimento de Danos,” in *XVII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 2006.
 - [88] K. Scheibe, J. Schimanski, M. Wetter, and H. Altmaier, “Danos a Equipamentos Eletroeletrônicos Causados por Raios a Longas Distâncias,” *Rev. Eletr. Mod.*, 2007.
 - [89] A. A. Shiga, A. Piantini, and C. A. G. Pegollo, “Custos Relativos a Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição de Energia,” in *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*, 2006.
 - [90] ABNT, “NBR 5410 – Norma Brasileira de Instalações Elétricas de Baixa Tensão,” Associação Brasileira de Normas Técnicas, Report, 2009.
 - [91] J. A. Cipoli, E. D. B. Nogueira, and A. J. S. Rios, “Ressarcimento de Danos Elétricos,” in *II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, 2003.
 - [92] J. N. Garcez, R. C. L. Oliveira, L. A. H. G. Oliveira, M. E. Tostes, J. R. B. A. Moraes, N. P. Santos, A. A. A. Tupiassu, D. P. Santos, and E. Muller, “Rede Neural de Ativação Interativa Competitiva – IAC para Auxílio à Tomada de Decisão sobre Responsabilidade por Danos em Consumidores de Energia Elétrica,” in *II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, 2003.
 - [93] S. V. F., *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. Artliber, 2005.
 - [94] A. Associação, “NBR 5419 Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas,” Associação Brasileira de Normas Técnicas, Report, 2001.
 - [95] S. Visacro, *Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento*. Artliber, 2005.
 - [96] D. Cavka, N. Mora, and F. Rachidi, “A Comparison of frequency-dependent soil models: Application to the analysis of grounding systems,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 1, pp. 177–187, 2014.
 - [97] E. D. Sunde, *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, vol. 20. D. Van Nostrand Co., 1949.
 - [98] G. C. Rosado, “Investigação teórico-experimental sobre a resposta De aterramentos elétricos frente a correntes de Descargas atmosféricas,” Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
 - [99] C. Portela, “Frequency and transient behavior of grounding systems. I. Physical and methodological aspects,” in *IEEE 1997, EMC, Austin Style. IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 97CH36113)*, 1997, pp. 379–384.
 - [100] C. Portela, “Frequency and transient behavior of grounding systems. II. Practical application
-

-
- examples,” in *IEEE 1997, EMC, Austin Style. IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.97CH36113)*, 1997, pp. 385–390.
- [101] S. Visacro, “A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386, 2007.
 - [102] A. Soares Jr. and S. Visacro, “Lightning Response of Typical Brazilian Transmission Line Tower-footing Arrangements,” in *International Conference on Ground and Earthing (Ground 98)*, 1998, pp. 98–102.
 - [103] R. Rüdenberg, *Transient Performance of Electric Power Systems*. Mit Press, 1950.
 - [104] H. B. Dwight, “Calculation of Resistances to Ground,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 55, no. 12, pp. 1319–1328, 1936.
 - [105] M. E. Almeida, “Modelização de Componentes de um Sistema de Energia Elétrica Sujeito à Descargas Atmosféricas,” Thesis, Instituto Superior Técnico, Porto, 1999.
 - [106] D. S. Gazzana, A. S. Bretas, G. a D. Dias, M. Tello, D. W. P. Thomas, and C. Christopoulos, “Effective length study of grounding electrode reached by lightning based on Transmission Line modelling Method,” in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2012, pp. 777–781.
 - [107] C. Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling (TLM) Method in Electromagnetics*. Wiley, 2006.
 - [108] L. Grcev and M. Popov, “On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 1598–1603, 2005.
 - [109] S. Bourg, B. Sacepe, T. Debu, S. B. B. Sacepe, E. De France, and L. Renarditres, “Deep earth electrodes in highly resistive ground : frequency behaviour,” *Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 584–589, 1995.
 - [110] R. Velazquez and D. Mukhedkar, “Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, no. 6, pp. 1314–1322, 1984.
 - [111] L. Grcev, “Lightning surge efficiency of grounding grids,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 3, pp. 1692–1699, 2011.
 - [112] D. S. Gazzana, A. S. Bretas, G. a D. Dias, M. Telló, D. W. P. Thomas, and C. Christopoulos, “The Transmission Line Modeling Method to Represent the Soil Ionization Phenomenon in Grounding Systems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, pp. 505–508, 2014.
 - [113] D. W. Durbak, A. S. Morched, A. M. Mousa, L. Rugeles, and D. Mader, “Modeling guidelines for fast front transients,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 493–506, 1996.
 - [114] A. Victorino da Silva Filho, “Estudo do Comportamento Resistivo de Aterramentos Elétricos Sob Descargas Atmosféricas,” Universidade Federal de Uberlândia, 1992.
 - [115] Zhong-Xin Li, Wei-Dong Shi, and Yu Yin, “Transient lightning response of grounding grid buried in multilayered earth model based on dynamic state complex image method in time domain,” in *2014 International Conference on Power System Technology*, 2014, pp. 1635–1643.
 - [116] K. A. Ewy and H. A. Smolleck, “A Graphical Explanation of the Resistance and Surface-Potential Calculations for Grounding Systems in Two-Layer Earth,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-4, no. 3, pp. 40–41, Mar. 1984.
 - [117] A. Geri, “Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1008–1017, 1999.
-

-
- [118] L. A. Salgado, J. L. Guardado, J. Torres, and E. O. Hernández, "Transient analysis of grounding systems under lightning strikes considering soil ionization," in *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2010, pp. 1–7.
- [119] P. L. Bellaschi, "Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 60, no. 3, pp. 123–127, 1941.
- [120] P. L. Bellaschi, R. E. Armington, and A. E. Snowden, "Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds - II," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 61, no. 6, pp. 349–363, Jun. 1942.
- [121] P. L. Bellaschi and R. E. Armington, "Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds--III Effect of Lead in Ground Installation," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 62, no. 6, pp. 349–363, 1943.
- [122] C. T. Mata, "Interaction of Lightning With Power Distribution Lines," Thesis, University of Florida, Florida, 2003.
- [123] T. Abe, T. Tsuboi, Y. Sakamoto, T. Miyazaki, and S. Okabe, "A Study of Modeling of EMTP-Analysis for Indoor Distribution Line," *IEEJ Trans. Power Energy*, vol. 128, pp. 1481–1489, 2008.
- [124] W. F. Wan Ahmad, D. W. P. Thomas, and C. Christopoulos, "Modeling of a ground wire using TLM," in *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008, pp. 1–8.
- [125] "IEEE Standard for Performance of Low-Voltage Surge-Protective Devices (Secondary Arresters)," *IEEE Std C62.34-1996*. p. i-15, 1997.
- [126] "IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits," p. 1, 1991.
- [127] IEC, "Electromagnetic compatibility (EMC): Part 4-5: Testing and measurement techniques: Surge immunity test," *IEC Std 61000-4-5*, 1995.
- [128] I. N. Gondim, "Contribuições para o aplicativo APR: Novos limites de suportabilidade, perturbações via medições e sistematização no processo da configuração da rede elétrica," Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
-

MODELOS 1, 2 E 3 - LINEARES

```
001 MODEL M123_linear
002
003 DATA
004 raio0 {dflt:0.00635} -- raio zero
005 l      {dflt:0.61}-- comprimento do eletrodo
006 ro0    {dflt:270} --resistividade inicial
007 tipo {dflt:1} --tipo de método (1=Rudenberg    2=Dwight 3=Liew e Darveniza)
008
009 VAR
010 r -- resistência
011
012 OUTPUT
013 r -- resistência variável no tempo (resistência de saída)
014
015 INIT
016 r:=0
017 ENDINIT
018
019 EXEC
020 IF (tipo=1) THEN --RUDENBERG
021 r:=ro0/(2*PI*l)*ln(2*l/raio0)
022 ENDIF
023
024 IF (tipo=2) THEN--DWIGHT
025 r:=ro0/(2*PI*l)*ln((4*l/raio0)-1)
026 ENDIF
027
028 IF (tipo=3) THEN --LIEW E DARVENIZA
029 r:=ro0/(2*PI*l)*ln((raio0+1)/raio0)
030 ENDIF
031
032 ENDEXEC
033
034 ENDMODEL
035
036 RECORD
037 M123_linear.r AS r
```

MODELO 4 - EMPÍRICO

```
001 MODEL M4_emp
002 INPUT
003 i
004
005 DATA
006 Ec {dflt:24000}--campo elétrico crítico
007 raio0 {dflt:0.00635}-- raio zero
008 l {dflt:0.61}-- comprimento
009 ro {dflt:270}-- resistividade inicial
010 ha {dflt:1}-- quantidade de hastes
011
012 VAR
013 resis0 -- resistência zero
014 A -- área da superfície
015 Ic -- corrente crítica
016 r_temp -- resistência variável no tempo
017
018 OUTPUT
019 r_temp -- resistência no tempo
020
021 INIT
022 resis0:= (ro/(2*PI*l))*(ln((raio0+l)/raio0))
023 A:=(2*PI*raio0*l)+(2*PI*((raio0)**2))
024 Ic:=(Ec*A)/ro
025
026 ENDINIT
027
028 EXEC
029
030 r_temp:=(1/ha)*(resis0)*((1+((abs(i)/ha)/Ic))**(-0.5))
031 --divisão por ha para o cálculo de cada haste
032
033 ENDEXEC
034
035 ENDMODEL
036 RECORD
037 M4_emp.r temp AS R temp
```

MODELO 5 - GEOMETRIA VARIÁVEL

```
001 MODEL M5_gv
002
003 INPUT
004 i
005
006 DATA
007 Ec {dflt:24000}-- campo elétrico crítico
008 raio0 {dflt:0.00635}-- raio zero
009 l {dflt:0.61}-- comprimento
010 ro {dflt:270}-- resistividade inicial
011
012 VAR
013 resis0 -- resistência zero
014 A0 -- área inicial da superfície lateral do eletrodo
015 Ic -- corrente crítica
016 raio_t -- raio variável no tempo
017 r_temp -- resistência variável
018
019 OUTPUT
020 r_temp -- resistência variável no tempo
021
022 INIT
023 resis0:= (ro/(2*PI*l))*(ln((raio0+l)/raio0))
024 A0:=(2*PI*raio0*l)+(2*PI*(raio0)**2)
025 Ic:=(Ec*A0)/ro
026 raio_t:=raio0
027
028 ENDINIT
029
030 EXEC
031
032 IF abs(i)<Ic THEN
033 resis0:= (ro/(2*PI*l))*(ln((raio0+l)/raio0))
034 r_temp:=resis0
035
036 else
037 raio_t:=(-l/2)+(sqrt(((l**2)/4)+((ro*abs(i))/(2*PI*Ec))))
038 r_temp:=(ro/(2*PI*l))*(ln((raio_t+l)/raio_t))
039
040 ENDIF
041
042 ENDEXEC
043
044 ENDMODEL
045 RECORD
046 M5_gv.r temp AS r temp
```

MODELO 6 – LIEW E DARVENIZA (NÃO-LINEAR)

```
001 MODEL M6_LeD
002
003 INPUT
004   i                -- corrente de entrada
005
006 CONST
007   DIV {VAL:100}    -- coeficiente para determinação de dr
008   MAXj {VAL:6170}  - número máximo de células
009
010 DATA
011 Ec    {dflt:24000}-- campo elétrico critico
012 raio0 {dflt:0.00635} -- raio zero
013 l     {dflt:0.61}-- comprimento do eletrodo
014 ro0   {dflt:270} --resistividade inicial
015 tau1  {dflt:1e-6}  -- constante de tempo da ionização
016 tau2  {dflt:1.5e-6} -- constante de tempo da desionização
017
018 VAR
019   Areaj[1..MAXj]  -- Área das superfícies equipotenciais
020   aux             -- auxiliar para cálculo da desionização
021   dr              -- espessura de cada elemento de superfície
022   flag           -- sinalizador auxiliar de controle
023   flagj[1..MAXj] -- sinalizador caso o elemento já esteve ionizado
024   j              -- identificador de cada célula(contador)
025   Jc             -- densidade de corrente elétrica crítica
026   Jj             -- densidade de corrente de cada elemento de superfície
027   raioj[1..MAXj] -- distância do centro do eletrodo à mais interna
028   Rj[1..MAXj]    -- resistência de cada elemento de superfície
029   roj            -- resistividade para cada elemento de superfície
030   roi[1..MAXj]   -- resistividade mínima alcançada quando da ionização
031   R_temp         -- resistência variável no tempo
032   t_desi[1..MAXj] -- tempo de desionização
033   t_ioni[1..MAXj] -- tempo de ionização
034
035 OUTPUT
036   R_temp          -- resistência total variável no tempo
037
038 INIT
039   Jc:=Ec/ro0
040   Rj[1..MAXj]:=0
041   j:=1
042   flag:=0
043   roj:=ro0
044   roi[1..MAXj]:=ro0
045   R_temp:=0
046   flagj[1..MAXj]:=0
047   t_ioni[1..MAXj]:=-1
048   t_desi[1..MAXj]:=-1
049   Jj:=0
050   dr:=l/DIV
051 ENDINIT
052
053 EXEC
054   IF flag=0 THEN
055     FOR j:=1 TO MAXj DO
056       raioj[j]:=raio0+(j*dr)-(dr/2)
057       Areaj[j]:=2*PI*((raioj[j])**2)+2*PI*(raioj[j])*l
058     ENDFOR
059     flag:=1
```

```

060  ENDIF
061
062  R_temp:=0
063  FOR j:=1 TO MAXj DO
064    Jj:=abs(i)/Areaj[j]
065    IF Jj>=Jc THEN                                -- ionização
066      IF t_ioni[j]=-1 THEN
067        t_ioni[j]:=t
068      ENDIF
069      flagj[j]:=1
070      roj:=ro0*(exp(-(t-t_ioni[j])/tau1))
071      IF roj<roi[j] THEN
072        roi[j]:=roj
073      ENDIF
074      t_desi[j]:=t
075      Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
076    ELSIF flagj[j]=1 AND Jj<Jc THEN                -- desionização
077      aux:=(1-exp(-(t-t_desi[j])/tau2))*((1-(Jj/Jc))**2)
078      roj:=(roi[j])+((ro0)-(roi[j]))*aux
079      Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
080      IF roj>=(0.98*ro0) THEN
081        t_ioni[j]:=-1
082      ENDIF
083    ELSE                                            -- não há ionização
084      roj:=ro0
085      Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
086    ENDIF
087    R_temp:=R_temp+Rj[j]
088  ENDFOR
089  ENDEXEC
090
091  ENDMODEL
092  RECORD
093  M6 LeD.R_temp AS R_temp

```

MODELO 7 – LIEW E DARVENIZA (NÃO-LINEAR)

```
001 MODEL M7_LeD
002
003 INPUT
004 i -- corrente de entrada
005
006 CONST
007 FACT1 {VAL:100} -- coeficiente para determinação de dr
008 MAXj {VAL:4770} -- número máximo de células
009
010 DATA
011 Ec {dflt:24000}-- campo elétrico crítico
012 raio0 {dflt:0.00635} -- raio zero
013 l {dflt:0.61}-- comprimento do eletrodo
014 ro0 {dflt:270} --resistividade inicial
015 tau1 {dflt:1e-6} -- constante de tempo da ionização
016 tau2 {dflt:1.5e-6} -- constante de tempo da desionização
017
018 VAR
019 Jc -- densidade de corrente eléctrica critica
020 j --identificador de cada célula
021 Aj[1..MAXj] --area das superficies laterais das células do eletrodo
022 dr -- espessura das células, urn so valor pois a espessura é uniforme
023 rj[1..MAXj] --distância do eléctrodo à linha mais interna da célula
024 RESj[1..MAXj] --resistência de cada célula
025 r_temp -- resistência variável no tempo
026 aux --guarda valor auxiliar para cálculo da expressão
027 roj -- resistividadej
028 roi[1..MAXj] -- resistividade mínima alcançada aquando da ionização
029 Jj --densidade de corrente na célulaj
030 flag --flag auxiliar de controlo
031 flagj[1..MAXj] --flag que indica que a célula já esteve ionizada e segue
depois a desionização
032 t_ioni[1..MAXj] --tempo do início da ionização
033 t_desi[1..MAXj] -- tempo do início da desionização
034
035 Rmxj1 --resistividade média do solo até 10 cm do centro do eletrodo
036 Rmxj2 --resistividade média do solo até 20 cm do centro do eletrodo
037 Rmxj3 --resistividade média do solo até 30 cm do centro do eletrodo
038 Rmxj4 --resistividade média do solo até 40 cm do centro do eletrodo
039 Rmxj5 --resistividade média do solo até 50 cm do centro do eletrodo
040 Rmxj6 --resistividade média do solo até 60 cm do centro do eletrodo
041 Rmxj7 --resistividade média do solo até 70 cm do centro do eletrodo
042 Rmxj8 --resistividade média do solo até 80 cm do centro do eletrodo
043 Rmxj9 --resistividade média do solo até 90 cm do centro do eletrodo
044 Rmxj10 --resistividade média do solo até 100 cm do centro do eletrodo
045 Rmxj11 --resistividade média do solo até 150 cm do centro do eletrodo
046 Rmxj12 --resistividade média do solo até 200 cm do centro do eletrodo
047
048 CntR1 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj1
049 CntR2 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj2
050 CntR3 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj3
051 CntR4 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj4
052 CntR5 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj5
053 CntR6 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj6
054 CntR7 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj7
055 CntR8 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj8
056 CntR9 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj9
057 CntR10 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj10
058 CntR11 --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj11
```

```

059 CntR12  --contador celulas para o valor medio da resistividade Rmxj12
060
061 AUX2     --variável que contém o valor de rj[j]
062 cont     --contador auxiliar: valor máximo instantâneo de j na ionização
063 raio_M   --valor maximo do raio atingido na ionizacao
064
065 OUTPUT
066 r_temp   -- resislência variável no tempo (resistência de saída)
067
068 INIT
069 Jc:=Ec/ro0
070 RESj[1..MAXj]:=0
071 j:=1
072 flag:=0
073 roj:=ro0
074 roi[1..MAXj]:=ro0
075 r_temp:=0
076 flagj[1..MAXj]:=0
077 t_ioni[1..MAXj]:=-99
078 t_desi[1..MAXj]:=-99
079 cont:=0
080 raio_M:=0
081 Jj:=0
082 dr:= 1/FACT1      -- cálculo do dr ENDINIT
083 ENDINIT
084
085 EXEC
086
087 IF flag=0 THEN
088     FOR j:=1 TO MAXj DO
089         rj[j]:=raio0+(j-1)*dr
090         Aj[j]:=2*PI*( (rj[j])**2)+2*PI*(rj[j])*1
091     ENDFOR
092     flag:=1
093 ENDIF
094
095 cont:=0;Rmxj1:=0;Rmxj2:=0;Rmxj3:=0;Rmxj4:=0;Rmxj5:=0;Rmxj5:=0
096 Rmxj6:=0;Rmxj7:=0;Rmxj8:=0;Rmxj9:=0;Rmxj10:=0;Rmxj11:=0;Rmxj12:=0
097
098 CntR1:=0;CntR2:=0;CntR3:=0;CntR4:=0;CntR5:=0;CntR6:=0;CntR7:=0
099 CntR8:=0;CntR9:=0;CntR10:=0;CntR11:=0;CntR12:=0
100
101
102 FOR j:=1 TO MAXj DO
103     Jj:=abs(i)/Aj[j]
104     IF Jj>=Jc THEN
105         IF t_ioni[j]=-99 THEN
106             t_ioni[j]:=t
107         ENDIF
108         flagj[j]:=1 --IONIZAÇÃO
109         roj:=ro0*(exp(-(t-t_ioni[j])/tau1))
110         AUX2:=rj[j]
111
112         IF AUX2<=0.1 THEN
113             Rmxj1:=Rmxj1+roj
114             CntR1:=CntR1+1
115         ENDIF
116         IF AUX2<=0.2 THEN
117             Rmxj2:=Rmxj2+roj
118             CntR2:=CntR2+1
119         ENDIF
120         IF AUX2<=0.3 THEN
121             Rmxj3:=Rmxj3+roj

```

```

122      CntR3:=CntR3+1
123      ENDIF
124      IF AUX2<=0.4 THEN
125      Rmxj4:=Rmxj4+roj
126      CntR4:=CntR4+1
127      ENDIF
128      IF AUX2<=0.5 THEN
129      Rmxj5:=Rmxj5+roj
130      CntR5:=CntR5+1
131      ENDIF
132      IF AUX2<=0.6 THEN
133      Rmxj6:=Rmxj6+roj
134      CntR6:=CntR6+1
135      ENDIF
136      IF AUX2<=0.7 THEN
137      Rmxj7:=Rmxj7+roj
138      CntR7:=CntR7+1
139      ENDIF
140      IF AUX2<=0.8 THEN
141      Rmxj8:=Rmxj8+roj
142      CntR8:=CntR8+1
143      ENDIF
144      IF AUX2<=0.9 THEN
145      Rmxj9:=Rmxj9+roj
146      CntR9:=CntR9+1
147      ENDIF
148      IF AUX2<=1 THEN
149      Rmxj10:=Rmxj10+roj
150      CntR10:=CntR10+1
151      ENDIF
152      IF AUX2<=1.5 THEN
153      Rmxj11:=Rmxj11+roj
154      CntR11:=CntR11+1
155      ENDIF
156      IF AUX2<=2 THEN
157      Rmxj12:=Rmxj12+roj
158      CntR12:=CntR12+1
159      ENDIF
160
161      IF j>=cont THEN --raio máximo instantâneo atingido na ionização
162      raio_M:=raio0+(j-1)*dr
163      cont:=j
164      ENDIF
165
166      IF roj<roi[j] THEN
167      roi[j]:=roj
168      t_desi[j]:=t
169      RESj[j]:=((roj)*dr)/(Aj[j])
170      ELSE
171      RESj[j]:=((roj)*dr)/(Aj[j])
172      ENDIF
173      ENDIF
174
175
176      IF flagj[j]=1 AND Jj<Jc THEN -- há desionização
177      aux:=( 1-exp(-(t-t_desi[j])/tau2))*((1-(Jj/Jc))**2)
178      roj:=(roi[j])+((ro0)-(roi[j]))*aux
179      RESj[j]:=((roj)*dr)/(Aj[j])
180      AUX2:=rj[j]
181
182      IF AUX2<=0.1 THEN
183      Rmxj1:=Rmxj1+roj
184      CntR1:=CntR1+1

```

```

185         ENDIF
186         IF AUX2<=0.2 THEN
187             Rmxj2:=Rmxj2+roj
188             CntR2:=CntR2+1
189         ENDIF
190         IF AUX2<=0.3 THEN
191             Rmxj3:=Rmxj3+roj
192             CntR3:=CntR3+1
193         ENDIF
194         IF AUX2<=0.4 THEN
195             Rmxj4:=Rmxj4+roj
196             CntR4:=CntR4+1
197         ENDIF
198         IF AUX2<=0.5 THEN
199             Rmxj5:=Rmxj5+roj
200             CntR5:=CntR5+1
201         ENDIF
202         IF AUX2<=0.6 THEN
203             Rmxj6:=Rmxj6+roj
204             CntR6:=CntR6+1
205         ENDIF
206         IF AUX2<=0.7 THEN
207             Rmxj7:=Rmxj7+roj
208             CntR7:=CntR7+1
209         ENDIF
210         IF AUX2<=0.8 THEN
211             Rmxj8:=Rmxj8+roj
212             CntR8:=CntR8+1
213         ENDIF
214         IF AUX2<=0.9 THEN
215             Rmxj9:=Rmxj9+roj
216             CntR9:=CntR9+1
217         ENDIF
218         IF AUX2<=1 THEN
219             Rmxj10:=Rmxj10+roj
220             CntR10:=CntR10+1
221         ENDIF
222         IF AUX2<=1.5 THEN
223             Rmxj11:=Rmxj11+roj
224             CntR11:=CntR11+1
225         ENDIF
226         IF AUX2<=2 THEN
227             Rmxj12:=Rmxj12+roj
228             CntR12:=CntR12+1
229         ENDIF
230
231
232     ENDIF
233
234
235     IF flagj[j]=0 THEN
236         roj:= ro0
237         RESj[j]:=((roj)*dr)/(Aj[j])
238         AUX2:=rj[j]
239
240         IF AUX2<=0.1 THEN
241             Rmxj1:=Rmxj1+roj
242             CntR1:=CntR1+1
243         ENDIF
244         IF AUX2<=0.2 THEN
245             Rmxj2:=Rmxj2+roj
246             CntR2:=CntR2+1
247         ENDIF

```



```

248      IF AUX2<=0.3 THEN
249          Rmxj3:=Rmxj3+roj
250          CntR3:=CntR3+1
251      ENDIF
252      IF AUX2<=0.4 THEN
253          Rmxj4:=Rmxj4+roj
254          CntR4:=CntR4+1
255      ENDIF
256      IF AUX2<=0.5 THEN
257          Rmxj5:=Rmxj5+roj
258          CntR5:=CntR5+1
259      ENDIF
260      IF AUX2<=0.6 THEN
261          Rmxj6:=Rmxj6+roj
262          CntR6:=CntR6+1
263      ENDIF
264      IF AUX2<=0.7 THEN
265          Rmxj7:=Rmxj7+roj
266          CntR7:=CntR7+1
267      ENDIF
268      IF AUX2<=0.8 THEN
269          Rmxj8:=Rmxj8+roj
270          CntR8:=CntR8+1
271      ENDIF
272      IF AUX2<=0.9 THEN
273          Rmxj9:=Rmxj9+roj
274          CntR9:=CntR9+1
275      ENDIF
276      IF AUX2<=1 THEN
277          Rmxj10:=Rmxj10+roj
278          CntR10:=CntR10+1
279      ENDIF
280      IF AUX2<=1.5 THEN
281          Rmxj11:=Rmxj11+roj
282          CntR11:=CntR11+1
283      ENDIF
284      IF AUX2<=2 THEN
285          Rmxj12:=Rmxj12+roj
286          CntR12:=CntR12+1
287      ENDIF
288
289      ENDIF
290
291  ENDFOR
292
293  Rmxj1:=Rmxj1/CntR1
294  Rmxj2:=Rmxj2/CntR2
295  Rmxj3:=Rmxj3/CntR3
296  Rmxj4:=Rmxj4/CntR4
297  Rmxj5:=Rmxj5/CntR5
298  Rmxj6:=Rmxj6/CntR6
299  Rmxj7:=Rmxj7/CntR7
300  Rmxj8:=Rmxj8/CntR8
301  Rmxj9:=Rmxj9/CntR9
302  Rmxj10:=Rmxj10/CntR10
303  Rmxj11:=Rmxj11/CntR11
304  Rmxj12:=Rmxj12/CntR12
305
306
307  r_temp:=0
308
309  FOR j:=1 to MAXj DO
310      r_temp:=r_temp+RESj[j]

```

```
311 ENDFOR
312 ENDEXEC
313 ENDMODEL
314
315 RECORD
316 M7 LeD.r temp AS r temp
```

MODELO 8 – IST

```
001 MODEL M8_IST
002
003 INPUT
004 i -- corrente de entrada
005 CONST
006 FACT1 {VAL:100} -- coeficiente para determinação de dr
007 MAXj {VAL:4770} -- número máximo de células
008 DATA
009 Ec {dflt:24000}-- campo elétrico crítico
010 raio0 {dflt:0.00635} -- raio zero
011 l {dflt:0.61}-- comprimento do eletrodo
012 ro0 {dflt:270} --resistividade inicial
013 tau1 {dflt:1e-6} -- constante de tempo da ionização
014 tau2 {dflt:1.5e-6} -- constante de tempo da desionização
015 VAR
016 Jc -- densidade de corrente elétrica crítica
017 j -- identificador de cada célula, serve também como contador
018 Aj[1..MAXj] -- área das superfícies laterais das células do eletrodo
019 dr -- espessura das células, um só valor pois a espessura é uniforme
020 rj[1..MAXj] --distância do eletrodo à linha mais interna da célula
021 RESj[1..MAXj] -- resistência de cada célula
022 r_temp -- resistência variável no tempo
023 aux -- guarda valor auxiliar para cálculo da expressão
024 aux1
025 roj[1..MAXj] -- resistividade j
026 Jj -- densidade de corrente na célula j
027 flag -- flag auxiliar de controle
028 flagj[1..MAXj] -- flag que indica que a célula já esteve ionizada
029 t_ioni[1..MAXj] -- tempo do início da ionização
030 t_desi[1..MAXj] -- tempo do início da desionização
031 Ej[1..MAXj]
032 rocj[1..MAXj]
033 OUTPUT
034 r_temp -- resistência variável no tempo (resistência de saída)
035 INIT
036 Jc:=Ec/ro0
037 RESj[1..MAXj]:=0
038 j:= 1
039 flag:= 0
040 roj[1..MAXj]:= ro0
041 r_temp:=0
042 flagj[1..MAXj]:=0
043 t_ioni[1..MAXj]:=-99
044 t_desi[1..MAXj]:=-99
045 Jj:=0
046 dr:= 1/FACT1 -- cálculo do dr
047
048 ENDINIT
049 EXEC
050
051 IF flag=0 THEN
052
053 FOR j:=1 TO MAXj DO
054 rj[j]:=raio0+(j-1)*dr
055 Aj[j]:=2*PI*((rj[j])**2)+2*PI*(rj[j])*l
056 ENDFOR
057 flag:=1
058 ENDIF
059
```

```

060 FOR j:=1 TO MAXj DO
061   Jj:=abs(i)/Aj[j]
062
063   IF Jj>=Jc THEN -- há ionização
064     IF t_ioni[j]=-99 THEN
065       t_ioni[j]:=t
066     ENDIF
067     flagj[j]:=1 -- ionização
068     rocj[j]:=(Ec/abs(i))*(Aj[j])
069     aux1:=(1-(exp(-(timestep)/tau1)))
070     roj[j]:=(roj[j])+((rocj[j])-(roj[j]))*aux1
071     RESj[j]:=((roj[j])*dr)/(Aj[j])
072
073   ENDIF
074
075   IF flagj[j]=1 AND Jj<Jc THEN -- há desionização
076
077     IF t_desi[j]=-99 THEN
078       t_desi[j]:=t
079     ENDIF
080
081     Ej[j]:=((roj[j])*abs(i))/Aj[j]
082     aux:=(1-(exp(-(t-t_desi[j])/tau2)))*((1-(Ej[j]/Ec))**2) -- auxiliar
083     roj[j]:=(roj[j])+((ro0)-(roj[j]))*aux -- desionização
084     RESj[j]:=((roj[j])*dr)/(Aj[j])
085
086   ENDIF
087
088   IF flagj[j]=0 THEN -- não há ionização ou saiu da desionização
089     roj[j]:=ro0
090     RESj[j]:=((roj[j])*dr)/(Aj[j])
091
092   ENDIF
093
094   ENDFOR
095
096   r_temp:=0
097
098   FOR j:=1 to MAXj DO
099     r_temp:=r_temp+RESj[j]
100   ENDFOR
101
102 ENDEXEC
103 ENDMODEL
104
105 RECORD
106 M8 IST.r temp AS r temp

```

MODELO 9 – IST

```
001 MODEL M9_IST
002
003 INPUT
004 i -- corrente de entrada
005 CONST
006 FACT1 {VAL:100} -- coeficiente para determinação de dr
007 MAXj {VAL:4570} -- número máximo de células
008 DATA
009 Ec {dflt:24000}-- campo eléctrico crítico
010 raio0 {dflt:0.00635} -- raio zero
011 l {dflt:0.61}-- comprimento do eletrodo
012 ro0 {dflt:270} --resistividade zero, ou resistividade inicial
013 tau1 {dflt:1e-6} -- constante de tempo da ionização
014 tau2 {dflt:1.5e-6} -- constante de tempo da desionização
015 VAR
016 Jc -- densidade de corrente eléctrica crítica
017 j -- identificador de cada célula, serve também como contador
018 Aj[1..MAXj] -- área das superfícies laterais das células do eletrodo
019 dr -- espessura das células, um só valor pois a espessura é uniforme
020 rj[1..MAXj] --distância do eletrodo à linha mais interna da célula
021 RESj[1..MAXj] -- resistência de cada célula
022 r_temp -- resistência variável no tempo
023 aux -- guarda valor auxiliar para cálculo da expressão
024 aux1
025 roj[1..MAXj] -- resistividade j
026 Jj -- densidade de corrente na célula j
027 flag -- flag auxiliar de controlo
028 flagj[1..MAXj] -- flag que indica que a célula já esteve ionizada
029 t_ioni[1..MAXj] -- tempo do início da ionização
030 t_desi[1..MAXj] -- tempo do início da desionização
031 Ej[1..MAXj]
032 rocj[1..MAXj]
033 Rmxj1 --resistividade média do solo até 10 cm do centro do eletrodo
034 Rmxj2 --resistividade média do solo até 20 cm do centro do eletrodo
035 Rmxj3 --resistividade média do solo até 30 cm do centro do eletrodo
036 Rmxj4 --resistividade média do solo até 40 cm do centro do eletrodo
037 Rmxj5 --resistividade média do solo até 50 cm do centro do eletrodo
038 Rmxj6 --resistividade média do solo até 60 cm do centro do eletrodo
039 Rmxj7 --resistividade média do solo até 70 cm do centro do eletrodo
040 Rmxj8 --resistividade média do solo até 80 cm do centro do eletrodo
041 Rmxj9 --resistividade média do solo até 90 cm do centro do eletrodo
042 Rmxj10 --resistividade média do solo até 100 cm do centro do eletrodo
043 Rmxj11 --resistividade média do solo até 150 cm do centro do eletrodo
044 Rmxj12 --resistividade média do solo até 200 cm do centro do eletrodo
045
046 CntR1 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj1
047 CntR2 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj2
048 CntR3 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj3
049 CntR4 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj4
050 CntR5 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj5
051 CntR6 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj6
052 CntR7 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj7
053 CntR8 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj8
054 CntR9 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj9
055 CntR10 --células para o cálculo do valor médio da resistividade Rmxj10
056 CntR11 --celulas para o calculo do valor medio da resistividade Rmxj11
057 CntR12 --celulas para o calculo do valor medio da resistividade Rmxj12
058
059 AUX2 --variável que contem o valor de rj[j]
```

```

060 cont      -- valor máximo instantâneo do valor atingido por j na ionização
061 raio_M    --valor máximo do raio atingido na ionização
062
063 OUTPUT
064 r_temp    -- resistência variável no tempo (resistência de saída)
065 INIT
066 Jc:=Ec/ro0
067 RESj[1..MAXj]:=0
068 j:= 1
069 flag:= 0
070 roj[1..MAXj]:= ro0
071 r_temp:=0
072 flagj[1..MAXj]:=0
073 t_ioni[1..MAXJ]:=-99
074 t_desi[1..MAXJ]:=-99
075 cont:=0
076 raio_M:=0
077 Jj:=0
078 dr:= 1/FACT1 -- cálculo do dr
079
080
081 ENDINIT
082 EXEC
083
084 IF flag=0 THEN
085
086 FOR j:=1 TO MAXj DO
087   rj[j]:=raio0+(j-1)*dr
088   Aj[j]:=2*PI*((rj[j])**2)+2*PI*(rj[j])*1
089   ENDFOR
090   flag:=1
091   ENDIF
092
093   cont:=0;Rmxj1:=0;Rmxj2:=0;Rmxj3:=0;Rmxj4:=0;Rmxj5:=0;Rmxj5:=0
094   Rmxj6:=0;Rmxj7:=0;Rmxj8:=0;Rmxj9:=0;Rmxj10:=0;Rmxj11:=0;Rmxj12:=0
095
096   CntR1:=0;CntR2:=0;CntR3:=0;CntR4:=0;CntR5:=0;CntR6:=0;CntR7:=0
097   CntR8:=0;CntR9:=0;CntR10:=0;CntR11:=0;CntR12:=0
098
099   FOR j:=1 TO MAXj DO
100     Jj:=abs(i)/Aj[j]
101
102     IF Jj>=Jc THEN -- há ionização
103       IF t_ioni[j]=-99 THEN
104         t_ioni[j]:=t
105       ENDIF
106       flagj[j]:=1 -- ionização
107       rocj[j]:=(Ec/abs(i))*(Aj[j])
108       aux1:=(1-(exp(-(timestep)/tau1)))
109       roj[j]:=(roj[j])+((rocyj[j])-(roj[j]))*aux1
110
111       RESj[j]:=((roj[j])*dr)/(Aj[j])
112       AUX2:=rj[j]
113       IF AUX2<=0.1 THEN
114         Rmxj1:=Rmxj1+roj[j]
115         CntR1:=CntR1+1
116       ENDIF
117       IF AUX2<=0.2 THEN
118         Rmxj2:=Rmxj2+roj[j]
119         CntR2:=CntR2+1
120       ENDIF
121       IF AUX2<=0.3 THEN
122         Rmxj3:=Rmxj3+roj[j]

```

```

123     CntR3:=CntR3+1
124     ENDIF
125     IF AUX2<=0.4 THEN
126     Rmxj4:=Rmxj4+roj[j]
127     CntR4:=CntR4+1
128     ENDIF
129     IF AUX2<=0.5 THEN
130     Rmxj5:=Rmxj5+roj[j]
131     CntR5:=CntR5+1
132     ENDIF
133     IF AUX2<=0.6 THEN
134     Rmxj6:=Rmxj6+roj[j]
135     CntR6:=CntR6+1
136     ENDIF
137     IF AUX2<=0.7 THEN
138     Rmxj7:=Rmxj7+roj[j]
139     CntR7:=CntR7+1
140     ENDIF
141     IF AUX2<=0.8 THEN
142     Rmxj8:=Rmxj8+roj[j]
143     CntR8:=CntR8+1
144     ENDIF
145     IF AUX2<=0.9 THEN
146     Rmxj9:=Rmxj9+roj[j]
147     CntR9:=CntR9+1
148     ENDIF
149     IF AUX2<=1 THEN
150     Rmxj10:=Rmxj10+roj[j]
151     CntR10:=CntR10+1
152     ENDIF
153     IF AUX2<=1.5 THEN
154     Rmxj11:=Rmxj11+roj[j]
155     CntR11:=CntR11+1
156     ENDIF
157     IF AUX2<=2 THEN
158     Rmxj12:=Rmxj12+roj[j]
159     CntR12:=CntR12+1
160     ENDIF
161
162     IF j>=cont THEN --raio máximo instantâneo atingido na ionização
163         raio_M:=raio0+(j-1)*dr
164         cont:=j
165     ENDIF
166
167
168 ENDIF
169
170 IF flagj[j]=1 AND Jj<Jc THEN -- há desionização
171
172 IF t_desi[j]==-99 THEN
173 t_desi[j]:=t
174 ENDIF
175
176 Ej[j]:=((roj[j])*abs(i))/Aj[j]
177 aux:=(1-(exp(-(t-t_desi[j])/tau2)))*((1-(Ej[j]/Ec))**2) -- auxiliar
178 roj[j]:=(roj[j])+((ro0)-(roj[j]))*aux -- desionização
179 RESj[j]:=((roj[j])*dr)/(Aj[j])
180 AUX2:=rj[j]
181     IF AUX2<=0.1 THEN
182     Rmxj1:=Rmxj1+roj[j]
183     CntR1:=CntR1+1
184     ENDIF
185     IF AUX2<=0.2 THEN

```

```

186     Rmxj2:=Rmxj2+roj[j]
187     CntR2:=CntR2+1
188     ENDIF
189     IF AUX2<=0.3 THEN
190     Rmxj3:=Rmxj3+roj[j]
191     CntR3:=CntR3+1
192     ENDIF
193     IF AUX2<=0.4 THEN
194     Rmxj4:=Rmxj4+roj[j]
195     CntR4:=CntR4+1
196     ENDIF
197     IF AUX2<=0.5 THEN
198     Rmxj5:=Rmxj5+roj[j]
199     CntR5:=CntR5+1
200     ENDIF
201     IF AUX2<=0.6 THEN
202     Rmxj6:=Rmxj6+roj[j]
203     CntR6:=CntR6+1
204     ENDIF
205     IF AUX2<=0.7 THEN
206     Rmxj7:=Rmxj7+roj[j]
207     CntR7:=CntR7+1
208     ENDIF
209     IF AUX2<=0.8 THEN
210     Rmxj8:=Rmxj8+roj[j]
211     CntR8:=CntR8+1
212     ENDIF
213     IF AUX2<=0.9 THEN
214     Rmxj9:=Rmxj9+roj[j]
215     CntR9:=CntR9+1
216     ENDIF
217     IF AUX2<=1 THEN
218     Rmxj10:=Rmxj10+roj[j]
219     CntR10:=CntR10+1
220     ENDIF
221     IF AUX2<=1.5 THEN
222     Rmxj11:=Rmxj11+roj[j]
223     CntR11:=CntR11+1
224     ENDIF
225     IF AUX2<=2 THEN
226     Rmxj12:=Rmxj12+roj[j]
227     CntR12:=CntR12+1
228     ENDIF
229
230 ENDIF
231
232 IF flagj[j]=0 THEN -- não há ionização ou saiu da desionização
233 roj[j]:=ro0
234 RESj[j]:=((roj[j])*dr)/(Aj[j])
235 AUX2:=rj[j]
236     IF AUX2<=0.1 THEN
237     Rmxj1:=Rmxj1+roj[j]
238     CntR1:=CntR1+1
239     ENDIF
240     IF AUX2<=0.2 THEN
241     Rmxj2:=Rmxj2+roj[j]
242     CntR2:=CntR2+1
243     ENDIF
244     IF AUX2<=0.3 THEN
245     Rmxj3:=Rmxj3+roj[j]
246     CntR3:=CntR3+1
247     ENDIF
248     IF AUX2<=0.4 THEN

```



```

249     Rmxj4:=Rmxj4+roj[j]
250     CntR4:=CntR4+1
251     ENDIF
252     IF AUX2<=0.5 THEN
253     Rmxj5:=Rmxj5+roj[j]
254     CntR5:=CntR5+1
255     ENDIF
256     IF AUX2<=0.6 THEN
257     Rmxj6:=Rmxj6+roj[j]
258     CntR6:=CntR6+1
259     ENDIF
260     IF AUX2<=0.7 THEN
261     Rmxj7:=Rmxj7+roj[j]
262     CntR7:=CntR7+1
263     ENDIF
264     IF AUX2<=0.8 THEN
265     Rmxj8:=Rmxj8+roj[j]
266     CntR8:=CntR8+1
267     ENDIF
268     IF AUX2<=0.9 THEN
269     Rmxj9:=Rmxj9+roj[j]
270     CntR9:=CntR9+1
271     ENDIF
272     IF AUX2<=1 THEN
273     Rmxj10:=Rmxj10+roj[j]
274     CntR10:=CntR10+1
275     ENDIF
276     IF AUX2<=1.5 THEN
277     Rmxj11:=Rmxj11+roj[j]
278     CntR11:=CntR11+1
279     ENDIF
280     IF AUX2<=2 THEN
281     Rmxj12:=Rmxj12+roj[j]
282     CntR12:=CntR12+1
283     ENDIF
284
285     ENDIF
286
287     ENDFOR
288
289     Rmxj1:=Rmxj1/CntR1
290     Rmxj2:=Rmxj2/CntR2
291     Rmxj3:=Rmxj3/CntR3
292     Rmxj4:=Rmxj4/CntR4
293     Rmxj5:=Rmxj5/CntR5
294     Rmxj6:=Rmxj6/CntR6
295     Rmxj7:=Rmxj7/CntR7
296     Rmxj8:=Rmxj8/CntR8
297     Rmxj9:=Rmxj9/CntR9
298     Rmxj10:=Rmxj10/CntR10
299     Rmxj11:=Rmxj11/CntR11
300     Rmxj12:=Rmxj12/CntR12
301
302     r_temp:=0
303
304     FOR j:=1 to MAXj DO
305     r_temp:=r_temp+RESj[j]
306     ENDFOR
307
308     ENDEXEC
309     ENDMODEL

```

MODELO 10 – WANG, LIEW E DARVENIZA

```

001 MODEL M10_WLD
002
003 INPUT
004   i                -- corrente de entrada
005
006 CONST
007   DIV {VAL:100}    -- coeficiente para determinação de dr
008   MAXj {VAL:6170}  - número máximo de células
009
010 DATA
011   Ec {dflt:24000}   -- campo elétrico crítico
012   raio0 {dflt:0.00635} -- raio zero
013   l {dflt:0.61}     -- comprimento do eletrodo
014   ro0 {dflt:270}    -- resistividade zero ou inicial
015   tau1 {dflt:1e-6}  -- constante de tempo da ionização
016   tau2 {dflt:1.5e-6} -- constante de tempo da desionização
017   lambda {dflt:0.00017} -- cte de controle do primeiro trecho de alfa
018   alfa0 {dflt:70}   -- valor inicial de alfa
019   beta1 {dflt:0.8} -- constante do primeiro trecho de alfa
020   beta3 {dflt:3} -- constante de controle do terceiro trecho de alfa
021
022 VAR
023   Areaj[1..MAXj] -- Área das superfícies equipotenciais
024   aux            -- auxiliar para c2ulo da expressão de desionização
025   dr            -- espessura de cada elemento de superfície
026   flag          -- sinalizador auxiliar de controle
027   flagj[1..MAXj] -- sinalizador do elemento de sup. já esteve ionizado
028   j            -- identificador de cada célula (contador)
029   Jc           -- densidade de corrente elétrica crítica
030   Jj           -- densidade de corrente cada elemento de superfície
031   raioj[1..MAXj] -- distância eletrodo à linha mais interna do elemento)
032   Rj[1..MAXj]   -- resistência de cada elemento de superfície
033   roj           -- resistividade calculada elemento de superfície
034   roi[1..MAXj]  -- resistividade mínima alcançada quando da ionização
035   R_temp        -- resistência variável no tempo
036   t_desi[1..MAXj] -- tempo da desionização
037   t_ioni[1..MAXj] -- tempo da ionização
038   alfa          -- coeficiente para c2ulo de Js
039   Js -- densidade de corrente que implica no início de descargas parciais
040   beta2         -- variável de controle do segundo trecho de alfa
041   alfas         -- último valor de alfa do primeiro trecho
042   alfab         -- valor de alfa obtido para o pico da corrente
043   modi         -- módulo do valor instantâneo da corrente
044   modip         -- módulo da corrente de pico
045   previ        -- valor prévio instantâneo do módulo da corrente
046   flag2        -- sinalizador da saída de alfa do primeiro trecho
047
048 OUTPUT
049   R_temp        -- resistência variável no tempo
050
051 INIT
052   Jc:=Ec/ro0
053   Rj[1..MAXj]:=0
054   j:=1
055   flag:=0
056   flagj[1..MAXj]:=0
057   roj:=ro0
058   roi[1..MAXj]:=ro0
059   R_temp:=0

```

```

060  t_ioni[1..MAXj]:=-1
061  t_desi[1..MAXj]:=-1
062  Jj:=0
063  dr:=1/DIV
064
065  alfa:=alfa0
066  Js:=alfa0*Jc
067  beta2:=0
068  modi:=0
069  modip:=0
070  alfas:=alfa0
071  alfap:=alfa0
072  previ:=0
073  flag2:=0
074  ENDINIT
075
076  EXEC
077  IF flag=0 THEN
078    FOR j:=1 TO MAXj DO
079
080      raioj[j]:=raio0+(j*dr)-(dr/2)
081      Areaj[j]:=2*PI*((raioj[j])**2)
082    ENDFOR
083    flag:=1
084
085  ENDIF
086
087  R_temp:=0
088  modi:=abs(i)
089
090  IF modi>=previ THEN
091    IF flag2=0 AND modi>=0.01 THEN
092      alfas:=alfa
093
094      alfa:=alfa0*(1-lambda*exp((modi/1000)**beta1))
095      IF alfa<=1 THEN
096        flag2:=1
097      ENDIF
098    ENDIF
099    IF flag2=1 THEN
100
101      beta2:=previ*ln(alfas-1)
102      alfa:=1+exp(recip(modi/beta2))
103    ENDIF
104
105
106    alfap:=alfa
107    modip:=modi
108
109
110  ELSE
111
112    alfa:=alfap+(alfa0-alfap)*(1-recip(modip/modi))**beta3
113
114    flag2:=0
115
116  ENDIF
117  Js:=alfa*Jc
118
119  previ:=modi          -- retorna valor anterior da corrente
120
121
122  FOR j:=1 TO MAXj DO

```

```

123 Jj:=modi/Areaj[j]
124 IF Jj>=Jc THEN
125     IF t_ioni[j]=-1 THEN
126         t_ioni[j]:=t
127     ENDIF
128     flagj[j]:=1
129     IF Jj>=Jc AND Jj<Js THEN -- há ionização
130         roj:=ro0*(exp(-(t-t_ioni[j])/tau1))
131
132     ENDIF
133     IF Jj>=Js THEN -- ocorrem intensas descargas parciais
134         roj:=0
135
136     ENDIF
137     IF roj<roi[j] THEN
138         roi[j]:=roj
139     ENDIF
140     t_desi[j]:=t
141     Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
142 ELSIF flagj[j]=1 AND Jj<Jc THEN -- há desionização
143     aux:=(1-exp(-(t-t_desi[j])/tau2))*((1-(Jj/Jc))**2)
144     roj:=(roi[j])+((ro0)-(roi[j]))*aux
145
146     Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
147     IF roj>=(0.98*ro0) THEN
148         t_ioni[j]:=-1
149     ENDIF
150 ELSE -- não ionização
151     roj:=ro0
152
153     Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
154 ENDIF
155
156 R_temp:=R_temp+Rj[j]
157 ENDFOR
158
159 ENDEXEC
160
161 ENDMODEL
162 RECORD
163 M10_WLD.R temp AS R temp

```

MODELO 11 – WANG, LIEW E DARVENIZA

MODIFICADO

```

001 MODEL M11_Modificado
002
003 INPUT
004   i                -- corrente de entrada
005
006 CONST
007   DIV {VAL:100}    -- coeficiente para determinação de dr
008   MAXj {VAL:6170}  -- número máximo de células
009
010 DATA
011   Ec   {dflt:24000}      -- campo elétrico crítico
012   raio0 {dflt:0.00635}  -- raio zero
013   l    {dflt:0.61}      -- comprimento do eletrodo
014   ro0  {dflt:270}       -- resistividade zero ou inicial
015   tau1 {dflt:1e-6}      -- constante de tempo da ionização
016   tau2 {dflt:1.5e-6}    -- constante de tempo da desionização
017   lambda {dflt:0.00017} -- cte de contr. do primeiro trecho de alfa
018   alfa0 {dflt:70}       -- valor inicial de alfa
019   beta1 {dflt:0.8}      -- constante do primeiro trecho de alfa
020   beta3 {dflt:3}       -- constante de controle do terceiro trecho de alfa
021
022 VAR
023   Areaj[1..MAXj]  -- área das superfícies equipotenciais
024   aux             -- auxiliar para cálculo da expressão de desionização
025   dr              -- espessura de cada elemento de superfície
026   flag            -- sinalizador auxiliar de controle
027   flagj[1..MAXj]  -- sinalizador do elemento já esteve ionizado
028   j               -- identificador de cada célula (contador)
029   Jc              -- densidade de corrente elétrica crítica
030   Jj              -- densidade de corrente para superfície
031   raioj[1..MAXj]  -- distância do eletrodo à linha mais interna
032   Rj[1..MAXj]     -- resistência de cada elemento de superfície
033   roj             -- resistividade calculada para o elemento de superfície
034   roi[1..MAXj]    -- resistividade mínima alcançada quando da ionização
035   R_temp          -- resistência variável no tempo
036   t_desi[1..MAXj] -- tempo de início da desionização
037   t_ioni[1..MAXj] -- tempo de início da ionização
038   alfa            -- coeficiente para cálculo de Js
039   Js              -- densidade de corrente que implica descargas parciais
040   beta2           -- variável de controle do segundo trecho de alfa
041   alfas           -- último valor de alfa do primeiro trecho
042   alfa_p           -- valor de alfa obtido para o pico da corrente
043   modi           -- módulo do valor instantâneo da corrente
044   modip           -- módulo da corrente de pico
045   previ           -- valor prévio instantâneo do módulo da corrente
046   flag2           -- sinalizador da saída de alfa do primeiro trecho
047
048 OUTPUT
049   R_temp          -- resistência total variável no tempo
050
051 INIT
052   Jc:=Ec/ro0
053   Rj[1..MAXj]:=0
054   j:=1
055   flag:=0

```

```

056  flagj[1..MAXj]:=0
057  roj:=ro0
058  roi[1..MAXj]:=ro0
059  R_temp:=0
060  t_ioni[1..MAXj]:=-1
061  t_desi[1..MAXj]:=-1
062  Jj:=0
063  dr:=1/DIV
064
065  alfa:=alfa0
066  Js:=alfa0*Jc
067  beta2:=0
068  modi:=0
069  modip:=0
070  alfas:=alfa0
071  alfap:=alfa0
072  previ:=0
073  flag2:=0
074  ENDINIT
075
076  EXEC
077  IF flag=0 THEN
078    FOR j:=1 TO MAXj DO
079      raioj[j]:=raio0+(j*dr)-(dr/2)
080      Areaj[j]:=2*PI*((raioj[j])**2)+2*PI*(raioj[j])*1
081    ENDFOR
082    flag:=1
083
084  ENDIF
085
086  R_temp:=0
087  modi:=abs(i)
088
089  IF modi>=previ THEN
090    IF flag2=0 AND modi>=0.01 THEN
091      alfas:=alfa
092
093      alfa:=alfa0*(1-lambda*exp((modi/1000)**beta1))
094      IF alfa<=1 THEN
095        flag2:=1
096      ENDIF
097    ENDIF
098    IF flag2=1 THEN
099
100      beta2:=previ*ln(alfas-1)
101      alfa:=1+exp(recip(modi/beta2))
102    ENDIF
103
104
105    alfap:=alfa
106    modip:=modi
107
108
109  ELSE
110
111    alfa:=alfap+(alfa0-alfap)*(1-recip(modip/modi))**beta3
112
113    flag2:=0
114
115  ENDIF
116  Js:=alfa*Jc
117
118  previ:=modi
-- retorna valor anterior da corrente

```

```

119
120
121   FOR j:=1 TO MAXj DO
122     Jj:=modi/Areaj[j]
123     IF Jj>=Jc THEN
124       IF t_ioni[j]==-1 THEN
125         t_ioni[j]:=t
126       ENDIF
127       flagj[j]:=1
128       IF Jj>=Jc AND Jj<Js THEN          -- há ionização
129         roj:=ro0*(exp(-(t-t_ioni[j])/tau1))
130
131       ENDIF
132       IF Jj>=Js THEN                    -- ocorrem intensas descargas parciais
133         roj:=0
134
135       ENDIF
136       IF roj<roi[j] THEN
137         roi[j]:=roj
138       ENDIF
139       t_desi[j]:=t
140       Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
141     ELSIF flagj[j]=1 AND Jj<Jc THEN      -- há desionização
142       aux:=(1-exp(-(t-t_desi[j])/tau2))*((1-(Jj/Jc))**2)
143       roj:=(roi[j])+((ro0)-(roi[j]))*aux
144
145       Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
146       IF roj>=(0.98*ro0) THEN
147         t_ioni[j]==-1
148       ENDIF
149     ELSE                                  -- não ionização
150       roj:=ro0
151
152       Rj[j]:=((roj)*dr)/(Areaj[j])
153     ENDIF
154
155     R_temp:=R_temp+Rj[j]
156   ENDFOR
157
158   ENDEXEC
159
160 ENDMODEL
161 RECORD
162 M11 Modificado.R temp AS R temp

```

MODELO 12 - TLM

```
001 clear
002 clc
003 IMP1=1; %Keeping ionization
004 IMP2=1; %Initial resistance
005 %Change here to consider either a constant value or the classical exp.
006 %{
007 %Ecvalue=0 will consider the classical expression
008 %Ecvalue=1 will use the Experimental Data value
009 %Ecvalue= any different value will force the EC value
010 %}
011 %%Input Data
012 Ecvalue=1;
013 N=20;
014 electrodtype='2';%1 for horizontal 2 for vertical
015 h=0.6; %m - Electrode depth, if horizontal
016 fmax=3E6; %maximum frequency of the input signal
017 x2=0;
018 y2=0;
019 freq=500e3;
020 ros=87.2;
021 er=25; %relative permittivity
022 ur=1; %relative permeability
023 u0=4*pi*1e-7; %H/m - air permeability
024 e0=1/(physconst('LightSpeed')^2*u0); %F/m - vacuum permittivity
025 roc=1.7241e-8;%ohm/m cooper resistivity
026 l=3.05; %m - electrode lenght
027 a=0.0127;
028 Ecdata=127000;
029
030 %% First Calculation
031 Rd=roc/(pi*a^2);
032 if electrodtype=='1'
033     x=(l)/(sqrt(2*h*a));
034     Fx=log(x*(1+sqrt(1+(1/x)^2)))+1/x-sqrt(1+(1/x)^2);
035     Ld=(u0/(2*pi))*Fx;
036     Gd=(pi)/(ros*Fx);
037     x=(l)/(a);
038     Fx=log(x*(1+sqrt(1+(1/x)^2)))+1/x-sqrt(1+(1/x)^2);
039     Cd=(pi*(e0*er+e0))/Fx;
040 else
041     x=(2*l)/a;
042     Fx=log(x*(1+sqrt(1+(1/x)^2)))+1/x-sqrt(1+(1/x)^2);
043     Ld=((u0)/(2*pi))*(Fx);
044     Cd=(pi*(e0*er+e0))/(Fx);
045     Gd=(2*pi)/(ros*Fx);
046 end
047
048 %Deltax and N
049 gama=sqrt(i*2*pi*fmax*u0*ur*((1/ros)+i*2*pi*fmax*e0*er));
050 beta1=real(gama);
051 beta2=imag(gama);
052 lambda=(2*pi)/beta2;
```



```

053 deltax=lambda/10;
054 Nmin=ceil(1/deltax);
055 deltax=1/(N-1);
056
057 R=Rd*deltax;
058 L=Ld*deltax;
059 C=Cd*deltax;
060 G=Gd*deltax;
061 Z0=sqrt(L/C);
062 deltat=sqrt(L*C);
063
064 an=a;
065 Rn=R;
066 Gn=G;
067 Zn=Z0;
068
069 A0=17200;
070 T1=9E-6;
071 T2=8.8E-6;
072 tsim=36E-6;
073
074 % ECVALUE
075 Ec=Ecvalue;
076 switch Ecvalue
077     case 0
078         Ec1=241*(1/ros)^(-0.215)*1e3;
079         %Ec=8.6083*(er)^(-0.0103*(1/ros*1e6)^-0.1526*1e5;%Manna
080     case 1
081         Ec=Ecdata;
082 end
083
084 if electrodetype=='1'
085     Re=((ros)/(2*pi*l))*(log((2*l)/(sqrt(2*a*h)))-1);
086 else
087     Re=(ros/(pi*l))*(log((4*l)/a)-1);
088     %SUNDE
089     x=(2*l)/a;
090     Fx=log(x*(1+sqrt(1+(1/x)^2)))+1/x-sqrt(1+(1/x)^2);
091     Gd1=(2*pi)/(ros*Fx);
092     RstaticSun=1/Gd1;
093     RstaticSun=RstaticSun/l;
094     Re=RstaticSun*2;
095 end
096
097 %Critical Current
098 Icr=(Ec*ros)/(2*pi*Re^2);
099
100 %% Current Source
101 clear t
102 alfa=1/T2;
103 beta=1/T1;
104 ts=tsim/deltat;
105 sourcetype='2'; %1 for ATP, 2 for AHMAD
106 A=0;
107 if sourcetype=='1'
108     for k=2:ts
109         t(k)=k*deltat;
110         A(k)=A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k)));
111     end
112 else
113     w=(log(alfa/beta))/(alfa-beta);
114     for k=2:ts
115         t(k)=k*deltat;
116         A(k)=(A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k))))/(exp(-alfa*w)-exp(-beta*w));

```

```

117     end
118 end
119
120 %% Initialization
121 k=1;      %Iteration number
122 j=1;      %Node number
123 kt=length(A);
124 for n=1:N
125     VLi(1,n)=0;
126     VRi(1,n)=0;
127 end
128
129 %% TLM
130 Rt=zeros(kt,N);
131 Gt=zeros(kt,N);
132 Lt=zeros(kt,N); %CHANGE RADIUS
133 Ct=zeros(kt,N); %CHANGE RADIUS
134 Z0t=zeros(kt,N); %CHANGE RADIUS
135 anew=zeros(kt,N);
136 Rt(:)=R;
137 Gt(:)=G;
138 Lt(:)=L; %CHANGE RADIUS
139 Ct(:)=C; %CHANGE RADIUS
140 Z0t(:)=Z0; %CHANGE RADIUS
141 anew(:)=a;
142 k=1;
143 j=1;
144 clc
145
146 while k<=kt
147     percent=k/kt*100;
148     msg = sprintf('Working on TLM: %3.2f ', percent);
149     reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
150     fprintf([reverseStr, msg]);
151
152     %Voltage and current calculation
153     while j<=N
154
155         R=Rt(k,j);
156         G=Gt(k,j);
157         L=Lt(k,j); %CHANGE RADIUS
158         C=Ct(k,j); %CHANGE RADIUS
159         Z0=Z0t(k,j);
160
161         if j==1
162             %Calculate voltages and currents
163             I(k,j)=A(k);
164             V(k,j)=I(k,j)*(R+Z0)+2*VRi(k,j);
165             VR(k,j)=2*VRi(k,j)+I(k,j)*Z0;
166         elseif j>1 && j<N
167             %Calculate voltages and currents
168             V(k,j)=((2*VLi(k,j))/(Z0)+(2*VRi(k,j))/(R+Z0))/((1/Z0)+(1/(R+Z0))+G));
169             I(k,j)=(V(k,j)-2*VRi(k,j))/(R+Z0);
170             VL(k,j)=V(k,j);
171             VR(k,j)=2*VRi(k,j)+I(k,j)*Z0;
172         else
173             %Calculate voltages and currents
174             V(k,j)=((2*VLi(k,j))/(Z0))/((1/Z0)+G);
175         end
176         j=j+1;
177     end
178     j=1;
179
180     %Scattering

```

```

181     while j<=N
182
183         if j==1
184             %Scattering - Calculate reflected voltages
185             VRr(k,j)=VR(k,j)-VRi(k,j);
186         elseif j>1 && j<N
187             %Scattering - Calculate reflected voltages
188             VLr(k,j)=VL(k,j)-VLi(k,j);
189             VRr(k,j)=VR(k,j)-VRi(k,j);
190         else
191             %Scattering - Calculate reflected voltages
192             VLr(k,j)=V(k,j)-VLi(k,j);
193         end
194         j=j+1;
195     end
196     j=1;
197
198     %Connection
199     while j<=N
200
201         if j==1
202             %Connection - Calculate new incident voltages
203             VRi(k+1,j)=VLr(k,j+1);
204         elseif j>1 && j<N
205             %Connection - Calculate new incident voltages
206             VLi(k+1,j)=VRr(k,j-1);
207             VRi(k+1,j)=VLr(k,j+1);
208         else
209             %Connection - Calculate new incident voltages
210             VLi(k+1,j)=VRr(k,j-1);
211         end
212         j=j+1;
213     end
214     j=1;
215
216 %% Soil Ionization
217 %Gazzana
218 %
219     while j<N
220         %a=anew(k,j);
221         %J(k,j)=I(k,j)/(2*pi*deltax*a+2*pi*a^2);
222         J(k,j)=I(k,j)/(2*pi*deltax*a);
223         E(k,j)=ros*J(k,j);
224
225         if E(k,j)>=Ec
226
227             Rt(k+1,j)=Rn/(sqrt(1+(I(k,j)/Icr)));
228             if electrodetype=='1'
229                 Gt(k+1,j)=Gn*(sqrt(1+(I(k,j)/Icr)));
230             else
231                 Gt(k+1,j)=Gn*(sqrt(1+(I(k,j)/Icr)));
232             end
233         end
234
235         comp(j)=j*deltax-deltax;
236         j=j+1;
237     end
238     j=1;
239     k=k+1;
240 end
241
242 Rimp=Vt./A;
243 %% IMPROVEMENT 1 - Keeping the ionization effect
244 if IMP1==1

```

```

245     [amp, pos]=max(A);
246     size=length(Rimp);
247     for i=pos-3:size
248         Rimp(i)=Rimp(pos);
249     end
250     Vt=Rimp.*A;
251 end
252 %% IMPROVEMENT 2 - INITIAL RESISTANCE
253 if IMP2==1
254     a=an;
255     x=(2*l)/a;
256     Fx=log(x*(1+sqrt(1+(1/x)^2)))+1/x-sqrt(1+(1/x)^2);
257     Gd1=(2*pi)/(ros*Fx);
258     RstaticSun=1/Gd1;
259     RstaticSun=RstaticSun/l;
260     Rimp(1)=RstaticSun;
261     Rimp(2)=RstaticSun;
262 else
263     Rimp(1)=Rimp(3);
264     Rimp(2)=Rimp(3);
265 end

```

MODELO 13 – MODELO DAS IMAGENS – 1 CAMADA

```
001 clear all;
002 clc;
003 format long;
004 opengl neverselect;
005 %% INPUT DATA
006 %Change here to consider either a constant value or the classical exp.
007 %{
008 %Ecvalue=0 will consider the classical expression
009 %Ecvalue=1 will use the Experimental Data value
010 %Ecvalue= any different value will force the EC value
011 %}
012 Ecvalue=1;
013
014 Px=1; %GPR X distance
015 Pz=0; %GPR Z distance
016 deltar=1e-3;
017 h=0;
018 profx=5; % profile distance of x axis - m
019 profz=5;% profile distance of z axis - m
020 div=10;
021 ros=87.2;
022 l=3.05; %m - electrode lenght
023 al=0.0127;
024 Ecdata=127000;
025 A0=30; %kA
026 T1=5e-6; %s
027 T2=12e-6; %s
028 tsim=50e-6; %simulation time
029 alfa=1/T2;
030 beta=1/T1;
031 deltat=1e-6; %time step
032 ts=tsim/deltat;
033 sourcetype='2'; %1 for ATP, 2 for AHMAD
034 if sourcetype=='1'
035     for k=1:ts
036         t(k)=k*deltat;
037         Amp(k)=A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k)));
038     end
039 else
040     w=(log(alfa/beta))/(alfa-beta);
041     for k=1:ts
042         t(k)=k*deltat;
043     Amp(k)=(A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k))))/(exp(-alfa*w)-exp(-beta*w));
044     end
045 end
046
047 % ECVALUE
048 Ec=Ecvalue;
049 switch Ecvalue
050     case 0
051         Ec=241*(1/ros)^(-0.215)*1e3;
052         %Ec=8.6083*(er)^-0.0103*(1/ros*1e6)^-0.1526*1e5;%Manna
053     case 1
054         Ec=Ecdata;
055 end
056
057 %% Current Source
058 t=t/(10^6);
059 Amp=Amp*1000;
060
061 %% FIRST CALCULATIONS
```

```

062 n=ceil(1/(2*a1));
063
064 %% DISTANCE CALCULATION
065 deltax=1/n;
066 for i=1:n
067     for j=1:n
068         Z(j)=h+((2*j-1)*deltax/2);
069         dreal(i,j)=sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i))^2);
070         dimag(i,j)=sqrt(a1^2+(Z(i)+Z(j))^2);
071         A(i,j)=(1/dreal(i,j))+(1/dimag(i,j));
072     end
073     Vs(i)=1;
074 end
075
076 %% Resistance calculation
077 I=Vs/A;
078 It=sum(I);
079 R=(ros/(4*pi))/It;
080 Rcalc=ros/(2*pi*1)*log((4*1/a1)-1);
081
082 %% Ionization Phenomena and Electric Field Calculation
083 P=I/It; %Proportional Current matrix
084 [len1, len2]=max(Amp);
085 Io=0;
086 fr=a1; %Fictitious radius
087 for kt=1:length(Amp)
088     percent=kt/length(Amp)*100;
089     msg = sprintf('Working on CIM: %3.2f ', percent);
090     reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
091     fprintf([reverseStr, msg]);
092
093     n=ceil(1/(2*a1));
094 flag=0; %Flag to check when stop
095 while flag==0
096     for i=1:n
097         for j=1:n
098             drealE(i,j)=(fr^2+(Z(j)-Z(i))^2)^1.5;
099             dimagE(i,j)=(fr^2+(Z(i)+Z(j))^2)^1.5;
100             AE(i,j)=(fr/drealE(i,j))+(fr/dimagE(i,j));
101         end
102     end
103     E=((ros*abs(Amp(kt))*P)/(4*pi))*AE;
104     Em=abs(median(E));
105     if Em>Ec
106         if Io==0
107             Io=Amp(kt);
108         end
109         fr=fr+deltar;
110     else
111         flag=1;
112         a=fr;
113     end
114
115 end
116 at(kt)=a;
117 if kt~=1
118     if at(kt-1)>at(kt)
119         at(kt)=at(kt-1);
120         a=at(kt-1);
121     else
122         a=fr;
123     end
124 end
125 %Resistance recalculation

```

```

126 n=ceil(1/(2*a));
127 deltax=1/n;
128 Zn=zeros(1,n);
129 drealn=zeros(n,n);
130 dimagn=zeros(n,n);
131 An=zeros(n,n);
132 Vsn=zeros(1,n);
133 In=zeros(1,n);
134 Inorm=zeros(1,n);
135 Vp=zeros(1,n);
136 for i=1:n
137     for j=1:n
138         Zn(j)=h+((2*j-1)*deltax/2);
139         drealn(i,j)=sqrt(a^2+(Zn(j)-Zn(i))^2);
140         dimagn(i,j)=sqrt(a^2+(Zn(i)+Zn(j))^2);
141         An(i,j)=(1/drealn(i,j))+(1/dimagn(i,j));
142     end
143     Vsn(i)=1;
144 end
145 In=Vsn/An;
146 Itn=sum(In);
147
148 if kt==1
149     Rn(kt)=(ros/(4*pi))/Itn;
150 else
151     Rn(kt)=(ros/(4*pi))/Itn;
152     if Rn(kt-1)<Rn(kt)
153         Rn(kt)=Rn(kt-1);
154     else
155         Rn(kt)=(ros/(4*pi))/Itn;
156     end
157 end
158 Rcalct(kt)=ros/(2*pi*1)*log((4*1/a)-1);
159
160 end
161
162
163 %% Adjusts
164 for i=1:length(Amp)
165     V(i)=Rn(i)*Amp(i);
166 end
167
168 Rimp=Rn;
169 A=Amp;
170 Vt=V;
171 tr=t;
172 t=t*1e6;

```

MODELO 13 – MODELO DAS IMAGENS – 2

CAMADAS

```

001 clear all;
002 clc;
003 format long;
004
005 %% INPUT DATA
006 %Change here to consider either a constant value or the classical exp.
007 %{
008 %Ecvalue=0 will consider the classical expression
009 %Ecvalue=1 will use the Experimental Data value
010 %Ecvalue= any different value will force the EC value
011 %}
012 Ecvalue=1;
013
014 P=10;
015 ros2=87.2;
016 KT=100; %Number of current images
017
018 Px=1; %GPR X distance
019 Pz=0; %GPR Z distance
020 deltar=1e-2;
021 h=0;
022 profx=5; % profile distance of x axis - m
023 profz=5;% profile distance of z axis - m
024 div=10;
025 Amp=[17,98,120,208,286,373,479,589,851,1327,1343,10,246,81,3443,36335.15];
026 Amp=Amp/1000;
027 ros=630;
028 ros2=290;
029 l=2.6; %m - electrode lenght
030 h=0.3;
031 P=1.5;
032 a1=0.007;
033 Ecdata=1e5;
034 % ECVALUE
035 Ec=Ecvalue;
036 switch Ecvalue
037     case 0
038         Ec=241*(1/ros)^(-0.215)*1e3;
039         %Ec=8.6083*(er)^-0.0103*(1/ros*1e6)^-0.1526*1e5;%Manna
040     case 1
041         Ec=Ecdata;
042 end
043 ros1=ros;
044
045 Amp=Amp*1000;
046 %% FIRST CALCULATIONS
047 n=ceil(l/(2*a1));
048 deltax=l/n;
049 k=(ros2-ros1)/(ros2+ros1);
050 %% DISTANCE CALCULATION
051 for i=1:n
052     percent=i/n*100;
053     msg = sprintf('Working on CIM_1: %3.2f ',percent);
054     reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
055     fprintf([reverseStr, msg]);
056
057     for j=1:n

```



```

058         Z(j)=h+((2*j-1)*deltax/2);
059
060         if Z(i)<=P && Z(j)<=P
061             sum1=0;
062             for m=1:KT
063
064                 P1=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i)+2*m*P)^2)));
065                 P2=(1/(sqrt(a1^2+(-Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(-Z(j)-Z(i)+2*m*P)^2)));
066                 sum1=sum1+k^m*(P1+P2);
067             end
068             A(i,j)=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i))^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i))^2)))+sum1*(ros1/(4*pi));
069         end
070         if Z(i)<=P && Z(j)>P
071             sum1=0;
072             for m=0:KT
073
074                 P3=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i)+2*m*P)^2)));
075                 sum1=sum1+k^m*P3;
076             end
077             A(i,j)=((1+k)*sum1)*(ros1/(4*pi));
078         end
079         if Z(i)>P && Z(j)<=P
080             sum1=0;
081             for m=0:KT
082
083                 P4=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(Z(i)-Z(j)+2*m*P)^2)));
084                 %Modification
085                 sum1=sum1+k^m*P4;
086             end
087             A(i,j)=((1-k)*sum1)*(ros2/(4*pi));
088         end
089         if Z(i)>P && Z(j)>P
090             sum1=0;
091             for m=0:KT
092
093                 P5=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)));
094                 sum1=sum1+k^m*P5;
095             end
096             P6=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i))^2)))-(k/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)-2*P)^2)));
097             A(i,j)=(P6+(1-k^2)*sum1)*(ros2/(4*pi));
098         end
099     end
100     Vs(i)=1;
101 end
102 %% Resistance calculation
103 I=Vs/A;
104 It=sum(I);
105 R=1/It;
106
107 %% Ionization Phenomena and Eletric Field Calculation
108 Prop=I/It; %Proportional Current matrix
109 [amp1, pos1]=max(Amp);
110 for kt=1:length(Amp)
111     n=ceil(1/(2*a1));
112     fr=a1; %Fictitious radius
113     flag=0; %Flag to check when stop
114     cont=1;

```

```

115     Em=Ec;
116     if kt~=1
117         if Amp(kt)>Amp(kt-1)
118             fr=at(kt-1);
119         end
120     end
121     while flag==0
122         diff=((Em-Ec)/Ec)*100;
123         for i=1:n
124             percent=i/n*100;
125             msg = sprintf('Checking Electric Field %d: %3.2f - %3.2f x -
diff: %3.2f',kt,percent,cont,diff);
126             reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
127             fprintf([reverseStr, msg]);
128             for j=1:n
129
130                 if Z(i)<=P && Z(j)<=P
131                     sum1=0;
132                     for m=1:KT
133
134                         P1=(fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(Z(j)-
Z(i)+2*m*P)^2)^1.5));
135                         P2=(fr/((fr^2+(-
Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(-Z(j)-Z(i)+2*m*P)^2)^1.5));
136                         sum1=sum1+k^m*(P1+P2);
137                     end
138                     AE(i,j)=((fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i))^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(Z(j)-
Z(i))^2)^1.5))+sum1)*(ros1/(4*pi));
139                 end
140                 if Z(i)<=P && Z(j)>P
141                     sum1=0;
142                     for m=0:KT
143
144                         P3=(fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(Z(j)-
Z(i)+2*m*P)^2)^1.5));
145                         sum1=sum1+k^m*P3;
146                     end
147                     AE(i,j)=((1+k)*sum1)*(ros1/(4*pi));
148                 end
149                 if Z(i)>P && Z(j)<=P
150                     sum1=0;
151                     for m=0:KT
152
153                         P4=(fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(Z(i)-
Z(j)+2*m*P)^2)^1.5)); %Modification
154                         sum1=sum1+k^m*P4;
155                     end
156                     AE(i,j)=((1-k)*sum1)*(ros2/(4*pi));
157                 end
158                 if Z(i)>P && Z(j)>P
159                     sum1=0;
160                     for m=0:KT
161
162                         P5=(fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5));
163                         sum1=sum1+k^m*P5;
164                     end
165                     P6=(fr/((fr^2+(Z(j)-Z(i))^2)^1.5))-
(k*fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)-2*P)^2)^1.5));
166                     AE(i,j)=(P6+(1-k^2)*sum1)*(ros2/(4*pi));
167                 end
168             end
169         end
170     end

```

```

168         end
169
170         E=(abs (Amp (kt)) *Prop) *AE;
171         Em=abs (median (E)) ;
172         if Em>Ec
173             fr=fr+deltar;
174             cont=cont+1;
175         else
176             flag=1;
177             a=fr;
178         end
179
180     end
181
182     at(kt)=a;
183     n=ceil (1/ (2*a)) ;
184     deltax=1/n;
185     Zn=zeros (1,n);
186     drealn=zeros (n,n);
187     dimagn=zeros (n,n);
188     An=zeros (n,n);
189     Vsn=zeros (1,n);
190     In=zeros (1,n);
191     Inorm=zeros (1,n);
192     Vp=zeros (1,n);
193
194     k=(ros2-ros1) / (ros2+ros1);
195     for i=1:n
196         percent=i/n*100;
197         msg = sprintf('Working on CIM_2: %3.2f ',percent);
198         reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
199         fprintf([reverseStr, msg]);
200
201         for j=1:n
202             Zn(j)=h+((2*j-1)*deltax/2);
203
204             if Zn(i)<=P && Zn(j)<=P
205                 sum1=0;
206                 for m=1:KT
207
208                     P1n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)-
209                     Zn(i)+2*m*P)^2)));
210                     P2n=(1/(sqrt(a^2+(-
211                     Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a^2+(-Zn(j)-Zn(i)+2*m*P)^2)));
212                     sum1=sum1+k^m*(P1n+P2n);
213                 end
214
215                 An(i,j)=((1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i))^2)))+(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)-
216                 Zn(i))^2)))+sum1)*(ros1/(4*pi));
217             end
218
219             if Zn(i)<=P && Zn(j)>P
220                 sum1=0;
221                 for m=0:KT
222
223                     P3n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)-
224                     Zn(i)+2*m*P)^2)));
225                     sum1=sum1+k^m*P3n;
226                 end
227
228                 An(i,j)=((1+k)*sum1)*(ros1/(4*pi));
229             end
230
231             if Zn(i)>P && Zn(j)<=P
232                 sum1=0;

```

```

225         for m=0:KT
226
227         P4n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a^2+(Zn(i)-
228         Zn(j)+2*m*P)^2))); %Modification
229         sum1=sum1+k^m*P4n;
230     end
231     An(i,j)=(1-k)*sum1*(ros2/(4*pi));
232
233     if Zn(i)>P && Zn(j)>P
234         sum1=0;
235         for m=0:KT
236             P5n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)));
237             sum1=sum1+k^m*P5n;
238         end
239         P6n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)-Zn(i))^2)))-
240         (k/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)-2*P)^2)));
241         An(i,j)=(P6n+(1-k^2)*sum1)*(ros2/(4*pi));
242     end
243     Vsn(i)=1;
244 end
245 In=Vsn/An;
246 Itn=sum(In);
247 Rn(kt)=1/Itn;
248
249 if kt==1
250     Rn(kt)=1/Itn;
251 else
252     Rn(kt)=1/Itn;
253     if Rn(kt-1)<Rn(kt)
254         Rn(kt)=Rn(kt-1);
255     else
256         Rn(kt)=1/Itn;
257     end
258 end
259 %}
260 %end of time current
261 end

```

Apêndice B

ANÁLISE COMPARATIVA

Os resultados das simulações computacionais, para cada experimento empregado como base de dados, encontram-se destacados nas tabelas a seguir.

Tabela 1: Desvios percentuais dos resultados computacionais – Experimento 1

<i>Modelos</i>	<i>Tensão Máxima</i>	<i>Tensão no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência inicial</i>	<i>Média dos desvios - resistência</i>
<i>Modelo 1</i>	155.89%	161.43%	158.45%	20.80%	127.65%
<i>Modelo 2</i>	184.58%	190.74%	187.42%	34.34%	153.17%
<i>Modelo 3</i>	127.34%	132.26%	129.61%	7.32%	102.24%
<i>Modelo 4</i>	-82.07%	-81.68%	-81.89%	7.32%	79.87%
<i>Modelo 5</i>	-5.33%	-3.28%	-4.38%	7.32%	7.40%
<i>Modelo 12</i>	-4.35%	-2.29%	-3.40%	14.83%	10.46%
<i>Modelo 13</i>	5.08%	7.36%	7.36%	14.90%	7.00%

Tabela 2: Desvios percentuais dos resultados computacionais – Experimento 2

<i>Modelos</i>	<i>Tensão Máxima</i>	<i>Tensão no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência inicial</i>	<i>Média dos desvios - resistência</i>
<i>Modelo 1</i>	188.17%	194.61%	194.12%	12.11%	194.12%
<i>Modelo 2</i>	219.84%	226.99%	226.45%	24.43%	226.45%
<i>Modelo 3</i>	156.63%	162.36%	161.93%	-0.16%	161.93%
<i>Modelo 4</i>	-63.04%	-62.22%	-62.28%	-0.16%	53.95%
<i>Modelo 5</i>	-7.16%	-5.09%	-5.24%	-0.16%	12.15%
<i>Modelo 12</i>	-6.11%	-4.01%	-4.17%	6.68%	4.12%
<i>Modelo 13</i>	2.97%	5.28%	5.28%	6.76%	6.00%

Tabela 3: Desvios percentuais dos resultados computacionais – Experimento 3

<i>Modelos</i>	<i>Tensão Máxima</i>	<i>Tensão no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência inicial</i>	<i>Média dos desvios - resistência</i>
<i>Modelo 1</i>	377.09%	396.47%	396.01%	-2.14%	396.01%
<i>Modelo 2</i>	428.53%	450.00%	449.49%	8.41%	449.49%
<i>Modelo 3</i>	325.83%	343.13%	342.72%	-12.66%	342.72%
<i>Modelo 4</i>	-69.92%	-68.70%	-68.73%	-12.66%	67.08%
<i>Modelo 5</i>	-12.98%	-9.44%	-9.52%	-12.66%	9.49%
<i>Modelo 12</i>	-11.44%	-7.85%	-7.93%	-6.80%	7.55%
<i>Modelo 13</i>	-0.15%	3.91%	3.91%	-6.69%	3.01%

Tabela 4: Desvios percentuais dos resultados computacionais – Experimento 4

<i>Modelos</i>	<i>Tensão Máxima</i>	<i>Tensão no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência inicial</i>	<i>Média dos desvios - resistência</i>
Modelo 1	278.91%	278.91%	272.45%	7.20%	292.49%
Modelo 2	338.30%	338.30%	330.83%	24.01%	354.01%
Modelo 3	221.11%	221.11%	215.63%	-9.15%	232.62%
Modelo 4	-34.62%	-34.63%	-35.74%	-9.15%	26.24%
Modelo 5	5.64%	5.63%	3.83%	-9.15%	74.55%
Modelo 12	0.99%	0.81%	-0.91%	0.00%	6.40%
Modelo 13	12.92%	12.92%	12.92%	-0.23%	19.00%

Tabela 5: Desvios percentuais dos resultados computacionais – Experimento 5

<i>Modelos</i>	<i>Tensão Máxima</i>	<i>Tensão no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência no instante do pico da corrente</i>	<i>Resistência inicial</i>	<i>Média dos desvios - resistência</i>
Modelo 1	165.31%	165.31%	163.95%	28.33%	136.40%
Modelo 2	195.05%	195.05%	193.53%	42.71%	162.90%
Modelo 3	135.71%	135.71%	134.49%	14.01%	110.02%
Modelo 4	-58.25%	-58.25%	-58.46%	14.01%	50.76%
Modelo 5	-2.62%	-2.62%	-3.12%	14.01%	11.69%
Modelo 12	-1.64%	-1.65%	-2.15%	21.99%	8.09%
Modelo 13	8.29%	8.29%	8.29%	22.06%	8.41%

AUMENTO DE POTENCIAL DE TERRA – 1 CAMADA

```
001 clear all;
002 clc;
003 format long;
004 opengl neverselect;
005 %% INPUT DATA
006 %Change here to consider either a constant value or the classical exp.
007 %{
008 %Ecvalue=0 will consider the classical expression
009 %Ecvalue=1 will use the Experimental Data value
010 %Ecvalue= any different value will force the EC value
011 %}
012 Ecvalue=1;
013 Px=10; %GPR X distance
014 Pz=0.1; %GPR Z distance
015 deltar=1e-3;
016 h=0;
017 profx=10; % profile distance of x axis - m
018 profz=10;% profile distance of z axis - m
019 div=10;
020 a1=0.01;
021 l=0.01;
022 n=10;
023 ros=293;
024 Ecdata=708000;
025 A0=30; %kA
026 T1=5e-6; %s
027 T2=12e-6; %s
028 tsim=50e-6; %simulation time
029 alfa=1/T2;
030 beta=1/T1;
031 deltat=1e-6; %time step
032 ts=tsim/deltat;
033 sourcetype='2'; %1 for ATP, 2 for AHMAD
034 if sourcetype=='1'
035     for k=1:ts
036         t(k)=k*deltat;
037         Amp(k)=A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k)));
038     end
039 else
040     w=(log(alfa/beta))/(alfa-beta);
041     for k=1:ts
042         t(k)=k*deltat;
043         Amp(k)=(A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k))))/(exp(-alfa*w)-exp(-beta*w));
044     end
045 end
046
047
048 %ECVALUE
049 Ec=Ecvalue;
050 switch Ecvalue
051     case 0
```

```

052         Ec=241*(1/ros)^(-0.215)*1e3;
053         %Ec=8.6083*(er)^-0.0103*(1/ros*1e6)^-0.1526*1e5;%Manna
054     case 1
055         Ec=Ecdata;
056 end
057
058 %% Current Source
059 Amp=Amp*1000;
060 %% FIRST CALCULATIONS
061 deltax=a1/n;
062 %% DISTANCE CALCULATION
063 for i=1:n
064     for j=1:n
065         Z(j)=(2*j-1)*deltax/2;
066         X(j)=sqrt(a1^2-Z(j)^2);
067         dreal(i,j)=sqrt(X(j)^2+(Z(j)-Z(i))^2);
068         dimag(i,j)=sqrt(X(j)^2+(Z(i)+Z(j))^2);
069         A(i,j)=(1/dreal(i,j))+(1/dimag(i,j));
070     end
071     Vs(i)=1;
072 end
073 %% Resistance calculation
074 I=Vs/A;
075 It=sum(I);
076 R=(ros/(4*pi))/It;
077 %% Ionization Phenomena and Electric Field Calculation
078 P=I/It; %Proportional Current matrix
079 fr=a1;
080 for kt=1:length(Amp)
081     %fr=a1;
082     flag=0; %Flag to check when stop
083 while flag==0
084     for i=1:n
085         for j=1:n
086             X(j)=sqrt(fr^2-Z(j)^2);
087             drealE(i,j)=(X(j)^2+(Z(j)-Z(i))^2)^1.5;
088             dimagE(i,j)=(X(j)^2+(Z(i)+Z(j))^2)^1.5;
089             AE(i,j)=((X(j)/drealE(i,j))+(X(j)/dimagE(i,j)))*((ros*abs(Amp(kt)))/(4*pi));
090         end
091     end
092     E=P*AE;
093     Em=median(E);
094     if Em>Ec
095         fr=fr+deltar;
096         l=l+deltar;
097     else
098         flag=1;
099         a=fr;
100         l=fr;
101     end
102 end
103 %Resistance recalculation
104 at(kt)=fr;
105 if kt~=1
106     if at(kt-1)>at(kt)
107         at(kt)=at(kt-1);
108         a=at(kt-1);
109         l=a;
110     else
111         a=fr;
112         l=a;
113     end
114 end

```



```

115 deltax=1/n;
116 Zn=zeros(1,n);
117 drealn=zeros(n,n);
118 dimagn=zeros(n,n);
119 An=zeros(n,n);
120 Vsn=zeros(1,n);
121 In=zeros(1,n);
122 Inorm=zeros(1,n);
123 Vp=zeros(1,n);
124 for i=1:n
125     for j=1:n
126         Zn(j)=(2*j-1)*deltax/2;
127         Xn(j)=sqrt(a^2-Zn(j)^2);
128         drealn(i,j)=sqrt(Xn(j)^2+(Zn(j)-Zn(i))^2);
129         dimagn(i,j)=sqrt(Xn(j)^2+(Zn(i)+Zn(j))^2);
130         An(i,j)=(1/drealn(i,j))+(1/dimagn(i,j));
131     end
132     Vsn(i)=1;
133 end
134 In=Vsn/An;
135 Itn=sum(In);
136 Rn(kt)=(ros/(4*pi))/Itn;
137
138 %% GPR calculation
139 Inorm=In/Itn*Amp(kt); %Current normalization
140 for i=1:n
141     drealp(i)=sqrt(Px^2+(Pz-Zn(i))^2);
142     dimagp(i)=sqrt(Px^2+(Zn(i)+Pz)^2);
143     Ap(i)=(1/drealp(i))+(1/dimagp(i));
144     Vp(i)=Inorm(i)*Ap(i);
145 end
146 Vpt=sum(Vp);
147 Vpxz(kt)=ros/(4*pi)*Vpt;
148 %}
149 %% GPR Calculation - PROFILE
150 %{
151 Inorm=In/Itn*Amp(kt); %Current normalization
152 for z=1:profz*div
153     percent=z/100*100;
154     msg = sprintf('\nWorking on CIM: %3.2f ', percent);
155     reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
156     fprintf([reverseStr, msg]);
157     Pz(z)=z/div;
158     zp(z)=Pz(z);
159 for x=1:profx*div
160     Px(x)=x/div;
161     xp(x)=Px(x);
162     clearvars -except t Px Z Pz I Vpxz R n fr ros z al a x kt div profx
profz Amp P Ec deltar l It Inorm xp zp In Itn Rn
163
164     if ((sqrt(Px(x)^2+Pz(z)^2))<a)
165     for i=1:n
166         drealp(i)=sqrt(a^2+(-Z(i))^2);
167         dimagp(i)=sqrt(a^2+(Z(i))^2);
168         Ap(i)=(1/drealp(i))+(1/dimagp(i));
169         Vp(i)=Inorm(i)*Ap(i);
170     end
171     Vpt1=sum(Vp);
172     Vpxz(x,z,kt)=ros/(4*pi)*Vpt1;
173     else
174     for i=1:n
175         drealp(i)=sqrt(Px(x)^2+(Pz(z)-Z(i))^2);
176         dimagp(i)=sqrt(Px(x)^2+(Z(i)+Pz(z))^2);
177         Ap(i)=(1/drealp(i))+(1/dimagp(i));

```

```

178         Vp(i)=Inorm(i)*Ap(i);
179     end
180     Vpt1=sum(Vp);
181     Vpxz(x,z,kt)=ros/(4*pi)*Vpt1;
182     end
183
184 end
185 end
186
187 %}
188
189 end
190 Vpt=Vpxz;
191 %% Graph 3D
192 %{
193 for i=1:length(Px)
194     for j=1:length(Px)
195         Vpt1(i,j)=Vpt(i,j,13)/10^3;
196     end
197 end
198 hold on
199 grid on
200 g1= surf(Px,Pz,Vpt1,'EdgeColor', 'None', 'facecolor', 'interp');
201 set(g1,{'DisplayName'},{'Aumento de Potencial de Terra'});
202 xlabel('Distância - Eixo z (m)') % x-axis label
203 ylabel('Distância - Eixo x (m)') % y-axis label
204 zlabel('Potencial (kV)');
205 view([120 40]);
206 %}
207 %% Graph Foot Potential
208 %{
209 for i=1:length(Px)
210     Vpt2(i)=Vpt(i,1,13)/10^3;
211 end
212 hold on
213 grid on
214 g1= plot(Px,Vpt2);
215 xlabel('Distância - Eixo x (m)') % x-axis label
216 ylabel('Potencial (kV)') % y-axis label
217 %zlabel('Potencial (kV)');
218 %view([-40 -40]);
219 %}

```

AUMENTO DE POTENCIAL DE TERRA – 2 CAMADAS

```
001 clear all;
002 clc;
003 format long;
004 opengl neverselect;
005 %% INPUT DATA
006 %Change here to consider either a constant value or the classical exp.
007 %{
008 %Ecvalue=0 will consider the classical expression
009 %Ecvalue=1 will use the Experimental Data value
010 %Ecvalue= any different value will force the EC value
011 %}
012 Ecvalue=1;
013 Px=10; %GPR X distance
014 Pz=0.1; %GPR Z distance
015 deltar=1e-3;
016 h=0;
017 profx=10; % profile distance of x axis - m
018 profz=10;% profile distance of z axis - m
019 div=10;
020 a1=0.01;
021 l=0.01;
022 n=10;
023 ros=293;
024 Ecdata=708000;
025 A0=30; %kA
026 T1=5e-6; %s
027 T2=12e-6; %s
028 tsim=50e-6; %simulation time
029 alfa=1/T2;
030 beta=1/T1;
031 deltat=1e-6; %time step
032 ts=tsim/deltat;
033 sourcetype='2'; %1 for ATP, 2 for AHMAD
034 if sourcetype=='1'
035     for k=1:ts
036         t(k)=k*deltat;
037         Amp(k)=A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k)));
038     end
039 else
040     w=(log(alfa/beta))/(alfa-beta);
041     for k=1:ts
042         t(k)=k*deltat;
043         Amp(k)=(A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k))))/(exp(-alfa*w)-exp(-beta*w));
044     end
045 end
046
047
048 %ECVALUE
049 Ec=Ecvalue;
050 switch Ecvalue
051     case 0
052         Ec=241*(1/ros)^(-0.215)*1e3;
053         %Ec=8.6083*(er)^-0.0103*(1/ros*1e6)^-0.1526*1e5;%Manna
054     case 1
055         Ec=Ecdata;
056 end
057
058 %% Current Source
059 Amp=Amp*1000;
060 %% FIRST CALCULATIONS
```

```

061 deltax=a1/n;
062 %% DISTANCE CALCULATION
063 %% DISTANCE CALCULATION
064 for i=1:n
065     percent=i/n*100;
066     msg = sprintf('Working on CIM_1: %3.2f ',percent);
067     reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
068     fprintf([reverseStr, msg]);
069
070     for j=1:n
071         Z(j)=h+((2*j-1)*deltax/2);
072
073         if Z(i)<=P && Z(j)<=P
074             sum1=0;
075             for m=1:KT
076
077 P1=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i)+2*m*P)^2)));
078 P2=(1/(sqrt(a1^2+(-Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(-
079 Z(j)-Z(i)+2*m*P)^2)));
080 sum1=sum1+k^m*(P1+P2);
081 end
082
083 A(i,j)=((1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i))^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)-
084 Z(i))^2))))+sum1)*(ros1/(4*pi));
085 end
086
087 if Z(i)<=P && Z(j)>P
088     sum1=0;
089     for m=0:KT
090
091 P3=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i)+2*m*P)^2)));
092 sum1=sum1+k^m*P3;
093 end
094 A(i,j)=((1+k)*sum1)*(ros1/(4*pi));
095 end
096
097 if Z(i)>P && Z(j)<=P
098     sum1=0;
099     for m=0:KT
100
101 P4=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a1^2+(Z(i)-Z(j)+2*m*P)^2)));
102 %Modification
103 sum1=sum1+k^m*P4;
104 end
105 A(i,j)=((1-k)*sum1)*(ros2/(4*pi));
106 end
107
108 if Z(i)>P && Z(j)>P
109     sum1=0;
110     for m=0:KT
111
112 P5=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)));
113 sum1=sum1+k^m*P5;
114 end
115 P6=(1/(sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i))^2)))-(k/(sqrt(a1^2+(Z(j)+Z(i)-
116 2*P)^2)));
117 A(i,j)=(P6+(1-k^2)*sum1)*(ros2/(4*pi));
118 end
119
120 end
121
122 Vs(i)=1;
123 end
124
125 %% Resistance calculation
126 I=Vs/A;
127 It=sum(I);

```

```

118 R=1/It;
119
120 %% Ionization Phenomena and Electric Field Calculation
121 Prop=I/It; %Proportional Current matrix
122 [amp1, pos1]=max(Amp);
123 for kt=1:length(Amp)
124     n=ceil(1/(2*a1));
125     fr=a1; %Fictitious radius
126     flag=0; %Flag to check when stop
127     cont=1;
128     Em=Ec;
129     if kt~=1
130         if Amp(kt)>Amp(kt-1)
131             fr=at(kt-1);
132         end
133     end
134     while flag==0
135         diff=((Em-Ec)/Ec)*100;
136         for i=1:n
137             percent=i/n*100;
138             msg = sprintf('Checking Electric Field %d: %3.2f - %3.2f x -
diff: %3.2f',kt,percent,cont,diff);
139             reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
140             fprintf([reverseStr, msg]);
141             for j=1:n
142
143                 if Z(i)<=P && Z(j)<=P
144                     sum1=0;
145                     for m=1:KT
146
147                         P1=(fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(Z(j)-
Z(i)+2*m*P)^2)^1.5));
148                         P2=(fr/((fr^2+(-
Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(-Z(j)-Z(i)+2*m*P)^2)^1.5));
149                         sum1=sum1+k^m*(P1+P2);
150                     end
151                     AE(i,j)=((fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i))^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(Z(j)-
Z(i))^2)^1.5))+sum1)*(ros1/(4*pi));
152                 end
153                 if Z(i)<=P && Z(j)>P
154                     sum1=0;
155                     for m=0:KT
156
157                         P3=(fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(Z(j)-
Z(i)+2*m*P)^2)^1.5));
158                         sum1=sum1+k^m*P3;
159                     end
160                     AE(i,j)=((1+k)*sum1)*(ros1/(4*pi));
161                 end
162                 if Z(i)>P && Z(j)<=P
163                     sum1=0;
164                     for m=0:KT
165
166                         P4=(fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5))+(fr/((fr^2+(Z(i)-
Z(j)+2*m*P)^2)^1.5)); %Modification
167                         sum1=sum1+k^m*P4;
168                     end
169                     AE(i,j)=((1-k)*sum1)*(ros2/(4*pi));
170                 end
171                 if Z(i)>P && Z(j)>P

```

```

172             sum1=0;
173             for m=0:KT
174                 P5=(fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)+2*m*P)^2)^1.5));
175                 sum1=sum1+k^m*P5;
176             end
177             P6=(fr/((fr^2+(Z(j)-Z(i))^2)^1.5))-
178             (k*fr/((fr^2+(Z(j)+Z(i)-2*P)^2)^1.5));
179             AE(i,j)=(P6+(1-k^2)*sum1)*(ros2/(4*pi));
180         end
181     end
182
183     E=(abs(Amp(kt))*Prop)*AE;
184     Em=abs(median(E));
185     if Em>Ec
186         fr=fr+deltar;
187         cont=cont+1;
188     else
189         flag=1;
190         a=fr;
191     end
192
193 end
194
195 at(kt)=a;
196 n=ceil(1/(2*a));
197 deltax=1/n;
198 Zn=zeros(1,n);
199 drealn=zeros(n,n);
200 dimagn=zeros(n,n);
201 An=zeros(n,n);
202 Vsn=zeros(1,n);
203 In=zeros(1,n);
204 Inorm=zeros(1,n);
205 Vp=zeros(1,n);
206
207 k=(ros2-ros1)/(ros2+ros1);
208 for i=1:n
209     percent=i/n*100;
210     msg = sprintf('Working on CIM_2: %3.2f ',percent);
211     reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
212     fprintf([reverseStr, msg]);
213
214     for j=1:n
215         Zn(j)=h+((2*j-1)*deltax/2);
216
217         if Zn(i)<=P && Zn(j)<=P
218             sum1=0;
219             for m=1:KT
220
221 P1n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)-
Zn(i)+2*m*P)^2)));
221                 P2n=(1/(sqrt(a^2+(-
Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a^2+(-Zn(j)-Zn(i)+2*m*P)^2)));
222                 sum1=sum1+k^m*(P1n+P2n);
223             end
224
225 An(i,j)=((1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i))^2)))+(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)-
Zn(i))^2)))+sum1)*(ros1/(4*pi));
225         end
226
227         if Zn(i)<=P && Zn(j)>P
228             sum1=0;
229             for m=0:KT

```

```

230 P3n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)-
Zn(i)+2*m*P)^2)));
231         sum1=sum1+k^m*P3n;
232     end
233     An(i,j)=((1+k)*sum1)*(ros1/(4*pi));
234 end
235
236     if Zn(i)>P && Zn(j)<=P
237         sum1=0;
238         for m=0:KT
239
240 P4n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)))+(1/(sqrt(a^2+(Zn(i)-
Zn(j)+2*m*P)^2))); %Modification
241         sum1=sum1+k^m*P4n;
242     end
243     An(i,j)=((1-k)*sum1)*(ros2/(4*pi));
244 end
245
246     if Zn(i)>P && Zn(j)>P
247         sum1=0;
248         for m=0:KT
249             P5n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)+2*m*P)^2)));
250             sum1=sum1+k^m*P5n;
251         end
252         P6n=(1/(sqrt(a^2+(Zn(j)-Zn(i))^2)))-
(k/(sqrt(a^2+(Zn(j)+Zn(i)-2*P)^2)));
253         An(i,j)=(P6n+(1-k^2)*sum1)*(ros2/(4*pi));
254     end
255 end
256 Vsn(i)=1;
257 end
258 In=Vsn/An;
259 Itn=sum(In);
260 Rn(kt)=1/Itn;
261
262 if kt==1
263     Rn(kt)=1/Itn;
264 else
265     Rn(kt)=1/Itn;
266     if Rn(kt-1)<Rn(kt)
267         Rn(kt)=Rn(kt-1);
268     else
269         Rn(kt)=1/Itn;
270     end
271 end
272 %}
273 %end of time current
274 end
275
276 %% GPR calculation
277 Inorm=In/Itn*Amp(kt); %Current normatization
278 for i=1:n
279     drealp(i)=sqrt(Px^2+(Pz-Zn(i))^2);
280     dimagp(i)=sqrt(Px^2+(Zn(i)+Pz)^2);
281     Ap(i)=(1/drealp(i))+(1/dimagp(i));
282     Vp(i)=Inorm(i)*Ap(i);
283 end
284 Vpt=sum(Vp);
285 Vpxz(kt)=ros/(4*pi)*Vpt;
286 %}
287 %% GPR Calculation - PROFILE
288 %{

```

```

289 Inorm=In/It*n*Amp(kt); %Current normalization
290 for z=1:profz*div
291     percent=z/100*100;
292     msg = sprintf('\nWorking on CIM: %3.2f ', percent);
293     reverseStr = repmat(sprintf('\b'), 1, length(msg));
294     fprintf([reverseStr, msg]);
295     Pz(z)=z/div;
296     zp(z)=Pz(z);
297 for x=1:profx*div
298     Px(x)=x/div;
299     xp(x)=Px(x);
300     clearvars -except t Px Z Pz I Vpxz R n fr ros z al a x kt div profx
profz Amp P Ec deltar l It Inorm xp zp In Itn Rn
301
302     if ((sqrt(Px(x)^2+Pz(z)^2))<a)
303     for i=1:n
304         drealp(i)=sqrt(a^2+(-Z(i))^2);
305         dimagp(i)=sqrt(a^2+(Z(i))^2);
306         Ap(i)=(1/drealp(i))+(1/dimagp(i));
307         Vp(i)=Inorm(i)*Ap(i);
308     end
309     Vpt1=sum(Vp);
310     Vpxz(x,z,kt)=ros/(4*pi)*Vpt1;
311     else
312     for i=1:n
313         drealp(i)=sqrt(Px(x)^2+(Pz(z)-Z(i))^2);
314         dimagp(i)=sqrt(Px(x)^2+(Z(i)+Pz(z))^2);
315         Ap(i)=(1/drealp(i))+(1/dimagp(i));
316         Vp(i)=Inorm(i)*Ap(i);
317     end
318     Vpt1=sum(Vp);
319     Vpxz(x,z,kt)=ros/(4*pi)*Vpt1;
320     end
321
322 end
323 end
324
325 %}
326
327 end
328 Vpt=Vpxz;
329 %% Graph 3D
330 %{
331 for i=1:length(Px)
332     for j=1:length(Px)
333         Vpt1(i,j)=Vpt(i,j,13)/10^3;
334     end
335 end
336 hold on
337 grid on
338 g1= surf(Px,Pz,Vpt1,'EdgeColor', 'None', 'facecolor', 'interp');
339 set(g1,{'DisplayName'},{'Aumento de Potencial de Terra'});
340 xlabel('Distância - Eixo z (m)') % x-axis label
341 ylabel('Distância - Eixo x (m)') % y-axis label
342 zlabel('Potencial (kV)');
343 view([120 40]);
344 %}
345 %% Graph Foot Potential
346 %{
347 for i=1:length(Px)
348     Vpt2(i)=Vpt(i,1,13)/10^3;
349 end
350 hold on
351 grid on

```



```
352 g1= plot(Px,Vpt2);
353 xlabel('Distância - Eixo x (m)') % x-axis label
354 ylabel('Potencial (kV)') % y-axis label
355 %xlabel('Potencial (kV)');
356 %view([-40 -40]);
357 %}
```

INTERFACE E GERAÇÃO DOS CARTÕES

```
001 function varargout = Interface(varargin)
002 % INTERFACE MATLAB code for Interface.fig
003 %     INTERFACE, by itself, creates a new INTERFACE or raises the
existing
004 %     singleton*.
005 %
006 %     H = INTERFACE returns the handle to a new INTERFACE or the handle
to
007 %     the existing singleton*.
008 %
009 %     INTERFACE('CALLBACK', hObject,eventData,handles,...) calls the local
010 %     function named CALLBACK in INTERFACE.M with the given input
arguments.
011 %
012 %     INTERFACE('Property','Value',...) creates a new INTERFACE or raises
the
013 %     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
014 %     applied to the GUI before Interface_OpeningFcn gets called. An
015 %     unrecognized property name or invalid value makes property
application
016 %     stop. All inputs are passed to Interface_OpeningFcn via varargin.
017 %
018 %     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
one
019 %     instance to run (singleton)".
020 %
021 % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
022
023 % Edit the above text to modify the response to help Interface
024
025 % Last Modified by GUIDE v2.5 07-Oct-2016 17:12:36
026
027 % Begin initialization code - DO NOT EDIT
028 gui_Singleton = 1;
029 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
030                   'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
031                   'gui_OpeningFcn',   @Interface_OpeningFcn, ...
032                   'gui_OutputFcn',    @Interface_OutputFcn, ...
033                   'gui_LayoutFcn',    [], ...
034                   'gui_Callback',     []);
035 if nargin && ischar(varargin{1})
036     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
037 end
038
039 if nargout
040     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
041 else
042     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
043 end
044 % End initialization code - DO NOT EDIT
045
```

```

046
047 % --- Executes just before Interface is made visible.
048 function Interface_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
049 % This function has no output args, see OutputFcn.
050 % hObject    handle to figure
051 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
052 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
053 % varargin   command line arguments to Interface (see VARARGIN)
054
055 % Choose default command line output for Interface
056 handles.output = hObject;
057
058 % Update handles structure
059 guidata(hObject, handles);
060
061 % UIWAIT makes Interface wait for user response (see UIRESUME)
062 % uiwait(handles.figure1);
063
064
065 % --- Outputs from this function are returned to the command line.
066 function varargout = Interface_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
067 % varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
068 % hObject    handle to figure
069 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
070 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
071
072 % Get default command line output from handles structure
073 varargout{1} = handles.output;
074
075
076 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
077 function figure1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
078 % hObject    handle to figure1 (see GCBO)
079 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
080 % handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
081
082
083
084 function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
085 % hObject    handle to edit1 (see GCBO)
086 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
087 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
088
089 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
090 %        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double
091
092
093 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
094 function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
095 % hObject    handle to edit1 (see GCBO)
096 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
097 % handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
098
099 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
100 %       See ISPC and COMPUTER.
101 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
102     set(hObject,'BackgroundColor','white');
103 end
104
105
106
107 function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

108 % hObject      handle to edit7 (see GCBO)
109 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
110 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
111
112 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
113 %           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a
double
114
115
116 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
117 function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
118 % hObject      handle to edit7 (see GCBO)
119 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
120 % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called
121
122 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
123 %           See ISPC and COMPUTER.
124 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
125     set(hObject,'BackgroundColor','white');
126 end
127
128
129
130 function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
131 % hObject      handle to edit8 (see GCBO)
132 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
133 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
134
135 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
136 %           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a
double
137
138
139 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
140 function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
141 % hObject      handle to edit8 (see GCBO)
142 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
143 % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called
144
145 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
146 %           See ISPC and COMPUTER.
147 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
148     set(hObject,'BackgroundColor','white');
149 end
150
151
152
153 function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
154 % hObject      handle to edit9 (see GCBO)
155 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
156 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
157
158 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
159 %           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a
double
160
161
162 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
163 function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
164 % hObject      handle to edit9 (see GCBO)
165 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
166 % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

167
168 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
169 %     See ISPC and COMPUTER.
170 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
171     set(hObject,'BackgroundColor','white');
172 end
173
174
175
176 function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
177 % hObject     handle to edit10 (see GCBO)
178 % eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
179 % handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
180
181 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as text
182 %     str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit10 as a
double
183
184
185 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
186 function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
187 % hObject     handle to edit10 (see GCBO)
188 % eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
189 % handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called
190
191 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
192 %     See ISPC and COMPUTER.
193 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
194     set(hObject,'BackgroundColor','white');
195 end
196
197
198
199 function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
200 % hObject     handle to edit11 (see GCBO)
201 % eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
202 % handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
203
204 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
205 %     str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a
double
206
207
208 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
209 function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
210 % hObject     handle to edit11 (see GCBO)
211 % eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
212 % handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called
213
214 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
215 %     See ISPC and COMPUTER.
216 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
217     set(hObject,'BackgroundColor','white');
218 end
219
220
221
222 function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
223 % hObject     handle to edit3 (see GCBO)
224 % eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
225 % handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

226
227 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
228 %         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a
double
229
230
231 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
232 function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
233 % hObject      handle to edit3 (see GCBO)
234 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
235 % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called
236
237 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
238 %         See ISPC and COMPUTER.
239 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
240     set(hObject,'BackgroundColor','white');
241 end
242
243
244
245 function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
246 % hObject      handle to edit4 (see GCBO)
247 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
248 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
249
250 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
251 %         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a
double
252
253
254 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
255 function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
256 % hObject      handle to edit4 (see GCBO)
257 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
258 % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called
259
260 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
261 %         See ISPC and COMPUTER.
262 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
263     set(hObject,'BackgroundColor','white');
264 end
265
266
267
268 function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
269 % hObject      handle to edit5 (see GCBO)
270 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
271 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
272
273 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
274 %         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a
double
275
276
277 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
278 function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
279 % hObject      handle to edit5 (see GCBO)
280 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
281 % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called
282
283 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
284 %         See ISPC and COMPUTER.

```

```

285 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
286     set(hObject,'BackgroundColor','white');
287 end
288
289
290
291 function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
292 % hObject      handle to edit6 (see GCBO)
293 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
294 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
295
296 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
297 %           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a
double
298
299
300 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
301 function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
302 % hObject      handle to edit6 (see GCBO)
303 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
304 % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called
305
306 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
307 %           See ISPC and COMPUTER.
308 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
309     set(hObject,'BackgroundColor','white');
310 end
311
312
313 % --- Executes on button press in pushbutton1.
314 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
315 % hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
316 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
317 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
318 clear all;
319 clc;
320 format long;
321 opengl neverselect;
322
323 objeto1=findobj(gcf,'tag','edit1');
324 objeto2=findobj(gcf,'tag','edit3');
325 objeto3=findobj(gcf,'tag','edit4');
326 objeto4=findobj(gcf,'tag','edit5');
327 objeto5=findobj(gcf,'tag','edit7');
328 objeto6=findobj(gcf,'tag','edit8');
329 objeto7=findobj(gcf,'tag','edit9');
330 objeto8=findobj(gcf,'tag','edit10');
331 objeto9=findobj(gcf,'tag','edit11');
332 ros = str2double(get(objeto1,'String'));
333 l = str2double(get(objeto2,'String'));
334 a1 = str2double(get(objeto3,'String'));
335 Ecdata = str2double(get(objeto4,'String'));
336 A0 = str2double(get(objeto5,'String'));
337 T1 = str2double(get(objeto6,'String'));
338 T2 = str2double(get(objeto7,'String'));
339 tsim = str2double(get(objeto8,'String'));
340 deltat = str2double(get(objeto9,'String'));
341
342 Ecvalue=1;
343 Px=1; %GPR X distance
344 Pz=0; %GPR Z distance
345 deltar=1e-3;

```

```

346 h=0;
347 profx=5; % profile distance of x axis - m
348 profz=5;% profile distance of z axis - m
349 div=10;
350
351 alfa=1/T2;
352 beta=1/T1;
353 ts=tsim/deltat;
354 sourcetype='2'; %1 for ATP, 2 for AHMAD
355 if sourcetype=='1'
356     for k=1:ts
357         t(k)=k*deltat;
358         Amp(k)=A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k)));
359     end
360 else
361     w=(log(alfa/beta))/(alfa-beta);
362     for k=1:ts
363         t(k)=k*deltat;
364         Amp(k)=(A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k))))/(exp(-alfa*w)-exp(-
beta*w));
365     end
366 end
367
368 % ECVALUE
369 Ec=Ecvalue;
370 switch Ecvalue
371     case 0
372         Ec=241*(1/ros)^(-0.215)*1e3;
373         %Ec=8.6083*(er)^-0.0103*(1/ros*1e6)^-0.1526*1e5;%Manna
374     case 1
375         Ec=Ecddata;
376 end
377
378 %% Current Source
379 t=t/(10^6);
380 Amp=Amp*1000;
381
382 %% FIRST CALCULATIONS
383 %MARTIN'S TIP TO CALCULATE N
384 n=ceil(1/(2*a1));
385
386 %% DISTANCE CALCULATION
387 deltax=1/n;
388 for i=1:n
389     for j=1:n
390         Z(j)=h+((2*j-1)*deltax/2);
391         dreal(i,j)=sqrt(a1^2+(Z(j)-Z(i))^2);
392         dimag(i,j)=sqrt(a1^2+(Z(i)+Z(j))^2);
393         A(i,j)=(1/dreal(i,j))+(1/dimag(i,j));
394     end
395     Vs(i)=1;
396 end
397
398 %% Resistance calculation
399 I=Vs/A;
400 It=sum(I);
401 R=(ros/(4*pi))/It;
402 Rcalc=ros/(2*pi*1)*log((4*1/a1)-1);
403
404 %% Ionization Phenomena and Eletric Field Calculation
405 P=I/It; %Proportional Current matrix
406 [len1, len2]=max(Amp);
407 Io=0;
408 barra = waitbar(0,'Calculando...');

```



```

409 set(barra,'Name','Cálculo do Modelo de Aterramento');
410 fr=a1; %Fictitious radius
411 for kt=1:length(Amp)
412     percent=kt/length(Amp)*100;
413     waitbar(percent/100, barra, sprintf('%.1f %% Concluído', percent));
414     n=ceil(l/(2*a1));
415 %fr=a1; %Fictitious radius
416 flag=0; %Flag to check when stop
417
418 while flag==0
419     for i=1:n
420         for j=1:n
421             drealE(i,j)=(fr^2+(Z(j)-Z(i))^2)^1.5;
422             dimagE(i,j)=(fr^2+(Z(i)+Z(j))^2)^1.5;
423             AE(i,j)=(fr/drealE(i,j))+(fr/dimagE(i,j));
424         end
425     end
426     E=((ros*abs(Amp(kt))*P)/(4*pi))*AE;
427     Em=abs(median(E));
428     if Em>Ec
429         if Io==0
430             Io=Amp(kt);
431         end
432         fr=fr+deltar;
433     else
434         flag=1;
435         a=fr;
436     end
437
438 end
439 at(kt)=a;
440 %Resistance recalculation
441 if kt~=1
442     if at(kt-1)>at(kt)
443         at(kt)=at(kt-1);
444         a=at(kt-1);
445     else
446         a=fr;
447     end
448 end
449 n=ceil(l/(2*a));
450 deltax=l/n;
451 Zn=zeros(1,n);
452 drealn=zeros(n,n);
453 dimagn=zeros(n,n);
454 An=zeros(n,n);
455 Vsn=zeros(1,n);
456 In=zeros(1,n);
457 Inorm=zeros(1,n);
458 Vp=zeros(1,n);
459 for i=1:n
460     for j=1:n
461         Zn(j)=h+((2*j-1)*deltax/2);
462         drealn(i,j)=sqrt(a^2+(Zn(j)-Zn(i))^2);
463         dimagn(i,j)=sqrt(a^2+(Zn(i)+Zn(j))^2);
464         An(i,j)=(1/drealn(i,j))+(1/dimagn(i,j));
465     end
466     Vsn(i)=1;
467 end
468 In=Vsn/An;
469 Itn=sum(In);
470
471 if kt==1
472     Rn(kt)=(ros/(4*pi))/Itn;

```

```

473 else
474     Rn(kt)=(ros/(4*pi))/Itn;
475     if Rn(kt-1)<Rn(kt)
476         Rn(kt)=Rn(kt-1);
477     else
478         Rn(kt)=(ros/(4*pi))/Itn;
479     end
480 end
481
482 Rcalct(kt)=ros/(2*pi*1)*log((4*1/a)-1);
483 end
484 %% Adjusts
485 close(barra);
486 for i=1:length(Amp)
487     V(i)=Rn(i)*Amp(i);
488 end
489
490 Rimp=Rn;
491 A=Amp;
492 Vt=V;
493 tr=t;
494 t=t*1e6;
495 %%
496 [valor, posi]=max(Amp);
497 for i=1:posi
498     x(i)=Amp(i);
499     y(i)=Rn(i);
500 end
501 p = polyfit(x,y,4);
502 x1 = x;
503 y1 = polyval(p,x1);
504 figure
505 plot(x,y,'ko')
506 hold on
507 plot(x1,y1)
508 hold off
509 %% Cartão ATP VERSÃO APR_CEMIG
510 %
511 fileID = fopen('C:\APR-CEMIG\Original\renl_m.cet','w');
512 fprintf(fileID,'KARD 3 5140141142143151\n');
513 fprintf(fileID,'KARG 1 2 3 4 5 6 2\n');
514 fprintf(fileID,'KBEG 11 3 8 11 7 9 3\n');
515 fprintf(fileID,'KEND 16 8 15 18 14 16 8\n');
516 fprintf(fileID,'KTEX 1 1 0 0 0 0 1\n');
517 fprintf(fileID,'$ERASE\n');
518 fprintf(fileID,'INPUT\nMM0001 {i(MOD__1)}\nOUTPUT\n MOD__2\nMODEL
Modific\n INPUT\n i \n');
519 fprintf(fileID,' --CONST\n\n\n DATA\nEc\nraio0\n1\n\nro0\n\n\n\n\n\n\n VAR -
-28');
520
fprintf(fileID,'\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\nR_atu\nR_temp4\nR_temp3\nR_temp2\nR_te
mp1\nImag\nRstat\nRmin\nIMAX\nR_temp\nmodi\nflag1\nflag2\nOUTPUT\nR_temp\nINIT
--55\n');
521 fprintf(fileID,'
modi:=0\nflag1:=0\nflag2:=0\nR_atu:=0\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n
ENDINIT --77\n EXEC --78\n');
522 fprintf(fileID,'IMAX:=%3.6E\n',max(Amp));
523 fprintf(fileID,'Imag:=%3.6E\n',Io);
524 fprintf(fileID,'Rstat:=%3.6E\n',R);
525 fprintf(fileID,'Rmin:=%3.6E\n',min(Rn));
526 fprintf(fileID,' modi:=abs(i)\n IF flag1=0 AND modi<Imag THEN\n
R_temp:=Rstat\n ELSE\n flag1:=1\n IF flag2=0 AND modi<=IMAX THEN\n');
527 fprintf(fileID,'R_temp1:=(%3.6E)*modi**4\n',p(1));
528 fprintf(fileID,'R_temp2:=(%3.6E)*modi**3\n',p(2));

```



```

569 fprintf(fileID, ' MOD__2:=r_temp\nENDUSE\nRECORD\n MOD__2.R_temp AS
MOD__1\nC      1      2      3      4      5      6      7
8\n');
570 fprintf(fileID, 'C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
\n');
571 fprintf(fileID, '$EOF User-supplied header cards follow. 21-Dec-
09 16:17:47\nARG,MOD__1,MOD__2,CPELETCR,RAIOELET,COMPELET,RESISTIV\n');
572 fprintf(fileID, 'NUM,CPELETCR,RAIOELET,COMPELET,RESISTIV\n');
573 fclose(fileID);
574 %}
575
576
577
578
579
580
581 function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
582 % hObject handle to edit12 (see GCBO)
583 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
584 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
585
586 % Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit12 as text
587 % str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of edit12 as a
double
588
589
590 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
591 function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
592 % hObject handle to edit12 (see GCBO)
593 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
594 % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
595
596 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
597 % See ISPC and COMPUTER.
598 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
599 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
600 end
601
602
603 % --- Executes on button press in pushbutton2.
604 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
605 % hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
606 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
607 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
608 clear all;
609 clc;
610 format long;
611 opengl neverselect;
612
613 objeto1=findobj(gcf, 'tag', 'edit1');
614 objeto2=findobj(gcf, 'tag', 'edit3');
615 objeto3=findobj(gcf, 'tag', 'edit4');
616 objeto4=findobj(gcf, 'tag', 'edit5');
617 objeto5=findobj(gcf, 'tag', 'edit7');
618 objeto6=findobj(gcf, 'tag', 'edit8');
619 objeto7=findobj(gcf, 'tag', 'edit9');
620 objeto8=findobj(gcf, 'tag', 'edit10');
621 objeto9=findobj(gcf, 'tag', 'edit11');
622 objeto10=findobj(gcf, 'tag', 'edit12');
623 ros = str2double(get(objeto1, 'String'));
624 l = str2double(get(objeto2, 'String'));
625 a1 = str2double(get(objeto3, 'String'));

```

```

626 Ecdata = str2double(get(objeto4,'String'));
627 A0 = str2double(get(objeto5,'String'));
628 T1 = str2double(get(objeto6,'String'));
629 T2 = str2double(get(objeto7,'String'));
630 tsim = str2double(get(objeto8,'String'));
631 deltat = str2double(get(objeto9,'String'));
632 Px = str2double(get(objeto10,'String'));
633
634 Ecvalue=1;
635 Pz=0.1; %GPR Z distance
636 deltar=1e-3;
637 h=0;
638 profx=10; % profile distance of x axis - m
639 profz=10;% profile distance of z axis - m
640 div=10;
641 a1=0.01;
642 l=0.01;
643 n=10;
644
645 alfa=1/T2;
646 beta=1/T1;
647 ts=tsim/deltat;
648 sourcetype='2'; %1 for ATP, 2 for AHMAD
649 if sourcetype=='1'
650     for k=1:ts
651         t(k)=k*deltat;
652         Amp(k)=A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k)));
653     end
654 else
655     w=(log(alfa/beta))/(alfa-beta);
656     for k=1:ts
657         t(k)=k*deltat;
658         Amp(k)=(A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k))))/(exp(-alfa*w)-exp(-
beta*w));
659     end
660 end
661
662 %ECVALUE
663 Ec=Ecvalue;
664 switch Ecvalue
665     case 0
666         Ec=241*(1/ros)^(-0.215)*1e3;
667         %Ec=8.6083*(er)^-0.0103*(1/ros*1e6)^-0.1526*1e5;%Manna
668     case 1
669         Ec=Ecdata;
670 end
671
672 %% Current Source
673 %t=t/(10^6);
674 Amp=Amp*1000;
675 %% FIRST CALCULATIONS
676 deltax=a1/n;
677 %% DISTANCE CALCULATION
678 for i=1:n
679     for j=1:n
680         Z(j)=(2*j-1)*deltax/2;
681         X(j)=sqrt(a1^2-Z(j)^2);
682         dreal(i,j)=sqrt(X(j)^2+(Z(j)-Z(i))^2);
683         dimag(i,j)=sqrt(X(j)^2+(Z(i)+Z(j))^2);
684         A(i,j)=(1/dreal(i,j))+(1/dimag(i,j));
685     end
686     Vs(i)=1;
687 end
688 %% Resistance calculation

```

```

689 I=Vs/A;
690 It=sum(I);
691 R=(ros/(4*pi))/It;
692 %% Ionization Phenomena and Eletric Field Calculation
693 P=I/It; %Proportional Current matrix
694 barra = waitbar(0,'Calculando...');
695 set(barra,'Name','Cálculo do GPR');
696 fr=a1;
697 for kt=1:length(Amp)
698     percent=kt/length(Amp)*100;
699     waitbar(percent/100, barra, sprintf('%.1f %% Concluído', percent));
700     %fr=a1;
701     flag=0; %Flag to check when stop
702 while flag==0
703     for i=1:n
704         for j=1:n
705             X(j)=sqrt(fr^2-Z(j)^2);
706             drealE(i,j)=(X(j)^2+(Z(j)-Z(i))^2)^1.5;
707             dimagE(i,j)=(X(j)^2+(Z(i)+Z(j))^2)^1.5;
708
709             AE(i,j)=((X(j)/drealE(i,j))+(X(j)/dimagE(i,j)))*((ros*abs(Amp(kt)))/(4*pi));
710         end
711     end
712     %E=((ros*abs(Ie)*P)/(4*pi))*AE;
713     E=P*AE;
714     Em=median(E);
715     if Em>Ec
716         fr=fr+deltar;
717         l=l+deltar;
718     else
719         flag=1;
720         a=fr;
721         l=fr;
722     end
723 end
724 %Resistance recalculation
725 at(kt)=fr;
726 if kt~=1
727     if at(kt-1)>at(kt)
728         at(kt)=at(kt-1);
729         a=at(kt-1);
730         l=a;
731     else
732         a=fr;
733         l=a;
734     end
735 end
736 deltax=l/n;
737 Zn=zeros(1,n);
738 drealn=zeros(n,n);
739 dimagn=zeros(n,n);
740 An=zeros(n,n);
741 Vsn=zeros(1,n);
742 In=zeros(1,n);
743 Inorm=zeros(1,n);
744 Vp=zeros(1,n);
745 for i=1:n
746     for j=1:n
747         Zn(j)=((2*j-1)*deltax/2);
748         Xn(j)=sqrt(a^2-Zn(j)^2);
749         drealn(i,j)=sqrt(Xn(j)^2+(Zn(j)-Zn(i))^2);
750         dimagn(i,j)=sqrt(Xn(j)^2+(Zn(i)+Zn(j))^2);
751         An(i,j)=(1/drealn(i,j))+(1/dimagn(i,j));
752     end
753 end

```

```

752     Vsn(i)=1;
753 end
754 In=Vsn/An;
755 Itn=sum(In);
756 Rn(kt)=(ros/(4*pi))/Itn;
757
758 %% GPR calculation
759
760 Inorm=In/Itn*Amp(kt); %Current normalization
761 for i=1:n
762     drealp(i)=sqrt(Px^2+(Pz-Zn(i))^2);
763     dimagp(i)=sqrt(Px^2+(Zn(i)+Pz)^2);
764     Ap(i)=(1/drealp(i))+(1/dimagp(i));
765     Vp(i)=Inorm(i)*Ap(i);
766 end
767 Vpt=sum(Vp);
768 Vpxz(kt)=ros/(4*pi)*Vpt;
769 %}
770 end
771
772 close(barra);
773 %% FILE
774
775 fileID = fopen('C:\APR-CEMIG\Medições\med.txt','wt');
776 formatSpec = '(%3.2e,%3.4e) (%3.2e,%3.4e) (%3.2e,%3.4e)\n';
777 fprintf(fileID,formatSpec,0,0,0,0,0,0);
778 for kt=1:length(Amp)
779     fprintf(fileID,formatSpec,t(kt),Vpxz(kt),t(kt),0,t(kt),0);
780 end
781 fclose(fileID);
782 %}
783 Vpt=Vpxz;
784 %% Cartão ATP
785 fileID = fopen('C:\APR-CEMIG\Original\gera_med_m.base','w');
786 fprintf(fileID,'BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--\nDATA BASE
MODULE\n$ERASE\nARG,mod__1,mod__2,mod__3,Vrmsff\n');
787 fprintf(fileID,'NUM,Vrmsff\n\nOUTPUT\n mod__1\n mod__2\n mod__3\nMODEL
DISTUR\n COMMENT\n =====\n');
788 fprintf(fileID,'
REGISTRO DE DISTURBIO\n
=====
\n ENDCOMMENT\n');
789 fprintf(fileID,' OUTPUT\n va\n vb\n vc\n DATA\nC Vrmsff {dflt:220} --
tensão eficaz entre fases\n nc {dflt:8} -- número de ciclos de
medição\n');
790 fprintf(fileID,' ppc {dflt:128} -- número de amostras de tensão por
ciclo\n freq {dflt:60} -- frequência\n td1 {dflt:0.1} -- instante de
ocorrência do distúrbio\n VAR\n');
791 fprintf(fileID,' tref -- variável de tempo incrementada a cada passo de
integração superior a td1\n va -- tensão da fase A\n');
792 fprintf(fileID,' vb -- tensão da fase B\n vc -- tensão da fase C\n
Vmf -- valor máximo da tensão de fase\n A0 -- ângulo inicial da tensão
da fase A\n');
793 fprintf(fileID,' B0 -- ângulo inicial da tensão da fase B\n C0 --
ângulo inicial da tensão da fase C\n Atd1 -- ângulo da tensão no início do
evento\n');
794 fprintf(fileID,' t1 -- intervalo de tempo entre amostras de tensão\n
td2 -- instante de tempo do último ponto amostrado\n flag -- variável de
controle de cálculos iniciais\n');
795 fprintf(fileID,' FUNCTION
fonte_f(Vmff,freqf,A0f):=Vmff*sin(2*pi*freqf*t+A0f)\n FUNCTION vamed
POINTLIST\n$INCLUDE, C:\\Users\\Isaque\\Desktop\\Sergio\\faseA.lst\n');
796 fprintf(fileID,' FUNCTION vbmed POINTLIST\n$INCLUDE,
C:\\Users\\Isaque\\Desktop\\Sergio\\faseB.lst\n FUNCTION vcmed POINTLIST\n');
797 fprintf(fileID,'$INCLUDE, C:\\Users\\Isaque\\Desktop\\Sergio\\faseC.lst\n
INIT\n flag:=0\n tref:=0\n');

```

```

798 fprintf(fileID,' t1:=%3.6E\n',t(length(t)));
799 fprintf(fileID,' td2:=t1+td1\n Vmf:=sqrt(2)*Vrmsff/sqrt(3)\n
Atd1:=deg(asin(vamed(0)/Vmf))\n ENDINIT\n');
800 fprintf(fileID,' EXEC\n IF t < td1 OR t > td2 THEN\n IF flag = 0 THEN\n
IF vamed(0) >= 0 THEN\n IF vamed(0) > vamed(t1) THEN\n');
801 fprintf(fileID,' Atd1:=rad(180-Atd1)\n ELSE\n
Atd1:=rad(Atd1)\n ENDIF\n ELSIF vamed(0) < 0 THEN\n IF vamed(0) >
vamed(t1) THEN\n');
802 fprintf(fileID,' Atd1:=rad(180-Atd1)\n ELSE\n
Atd1:=rad(Atd1)\n ENDIF\n ENDIF\n A0:=Atd1-(2*pi*freq*td1)\n');
803 fprintf(fileID,' B0:=rad(deg(A0)-120)\n C0:=rad(deg(A0)+120)\n
flag:=1\n ENDIF\n va:=fonte_f(Vmf,freq,A0)\n');
804 fprintf(fileID,' vb:=fonte_f(Vmf,freq,B0)\n vc:=fonte_f(Vmf,freq,C0)\n
ELSIF t >= td1 THEN\n va:=vamed(tref)\n vb:=vbmed(tref)\n');
805 fprintf(fileID,' vc:=vcmed(tref)\n tref:=tref+timestep\n ENDIF\n
ENDEXEC\n');
806 fprintf(fileID,'ENDMODEL\nRECORD\nDISTUR.va AS va\nDISTUR.vb AS
vb\nDISTUR.vc AS vc\nUSE DISTUR AS DISTUR\nDATA\n');
807 fprintf(fileID,'C Vrmsff:= 220\n nc:= 8.\n ppc:= 128.\n
freq:= 60.\n td1:= 0.1\nOUTPUT\n');
808 fprintf(fileID,' mod__1:=va\n mod__2:=vb\n
mod__3:=vc\nENDUSE\nENDMODELS\nC 1 2 3 4
5 6 7 8\n');
809 fprintf(fileID,'C
3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
\n');
810 fprintf(fileID,'/BRANCH\nC < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >\nC <
n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0\n');
811 fprintf(fileID,'/OUTPUT\nBEGIN NEW DATA CASE\nC\n$PUNCH,med_m.cet\nBEGIN
NEW DATA CASE\nBLANK\n');
812 fclose(fileID);
813 %}

```