

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



UTILIZAÇÃO DE TÉCNICA DE COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA PARA
ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS
MODELADOS EM PI-RL

Hipólito Barbosa Machado Filho

Uberlândia
outubro de 2010

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

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICA DE COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA PARA ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS MODELADOS EM PI-RL**

Hipólito Barbosa Machado Filho

Tese apresentada por Hipólito Barbosa Machado
Filho à Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Doutor em Ciências, avaliado em 18/10/2010 pela
banca examinadora:

Celso Gonçalves Camilo Junior, Dr. (UFG)

Gina Maria Barbosa de Oliveira, Dra. (UFU)

José Pissolato Filho, PhD. (UNICAMP)

Keiji Yamanaka, PhD. (UFU) Orientador

Luciano Martins Neto, Dr. (UFU) Coorientador

Uberlândia

outubro de 2010

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

- M149u Machado Filho, Hipólito Barbosa, 1961-
Utilização de técnica de computação evolutiva para análise de desempenho de sistemas de aterramentos modelados em PI-RL [manuscrito] / Hipólito Barbosa Machado Filho. - 2010.
65 f. : il.
- Orientador: Keiji Yamanaka.
Coorientador: Luciano Martins Neto.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.
1. Sistemas de aterramento - Teses. 2. Algoritmos genéticos - Teses. I. Yamanaka, Keiji. II. Martins Neto, Luciano. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.315.23

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICA DE COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA PARA ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS MODELADOS EM PI-RL**

Hipólito Barbosa Machado Filho

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. Keiji Yamanaka, PhD.
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Aos meus pais (*in memoriam*)
Hypólito e Alminda,
esposa Denise,
filha Helena e
irmão Ricardo,
pelo incentivo e apoio constantes.

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha eterna gratidão pela existência e por me fortalecer no caminho do saber em busca do conhecimento.

Aos professores Keiji Yamanaka e Luciano Martins Neto pelo apoio, confiança, estímulo, disposição, competência e sabedoria no desenvolvimento deste trabalho.

Às colegas do laboratório de inteligência artificial Junia Magalhães Rocha e Reane Franco Goulart.

Aos colegas do laboratório de máquinas elétricas Aylton José Alves, Marcel Wu e Wesley Calixto Pacheco.

Ao professor Carlos Augusto Guimarães Medeiros pela atenção e disposição em detalhar e repassar os experimentos de seu trabalho de mestrado.

Aos professores Antônio Eduardo Costa Pereira e Alexandro Soares por suas contribuições a este trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência, Tecnologia de Goiás (IFG) pelo incentivo e apoio.

E a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

APOIO FINANCEIRO

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

RESUMO

Este trabalho apresenta uma técnica de simulação para análise de sistemas de aterramentos elétricos sob influência de descargas atmosféricas. No seu desenvolvimento estão relacionados os métodos de análise de desempenho, bem como as características das descargas atmosféricas e o modelo de descarga normalizado utilizado.

Nesta pesquisa, o aterramento elétrico é estudado pelo método de circuitos elétricos, sendo que o aterramento foi representado por conjuntos de resistores e indutores, pois o efeito resistivo é inerente à passagem de corrente elétrica em um condutor, e o indutivo é relevante em relação aos efeitos capacitivos e resistivos. Neste contexto, o modelo de representação da malha é denominado Modelo PI-RL. Algoritmo genético foi apresentado como técnica computacional que permite resolução de problemas de difícil solução, tais como os que envolvem sistemas de potência, as características dos algoritmos genéticos foram relacionadas. Desenvolveu-se um *software* baseado em algoritmo genético denominado Sistema de Avaliação de Desempenho de Aterramentos (SADA), que permite avaliar o comportamento do aterramento sob condição de descarga atmosférica.

Na operacionalização do SADA, é necessário determinar o comportamento elétrico da malha através da aplicação de um pulso de baixa tensão e a medição da corrente resultante no aterramento auxiliar. A partir destas medidas, o SADA utiliza algoritmo genético para modelar o aterramento no Modelo PI-RL. A partir deste modelo, é simulado o comportamento do aterramento sob descarga atmosférica utilizando a corrente de descarga normalizada. A metodologia proposta inova ao utilizar-se de procedimentos que dispensam a verificação da topologia do aterramento para avaliar seu desempenho. Os resultados obtidos são relevantes, uma vez que os parâmetros determinados pelo SADA são próximos dos verificados experimentalmente, especialmente a resistência simulada quando comparada com a resistência experimental, indicando a eficiência do método.

Palavras chave: Sistemas de aterramento, modelo PI-RL, algoritmo genético

ABSTRACT

This study presents a simulation technique for systems analysis of electrical grounds under the influence of atmospheric discharges. Methods of performance analysis, the characteristics of lightning discharge and the normalized model used are described. In this study, electrical grounding is studied using the electrical circuit method. The grounding was represented by sets of resistors and inductors, because the resistive effect is inherent in the passage of electric current in a conductor, and induction is relevant to capacitive and resistive effects. In this context, the mesh model is called Model PI-RL. A genetic algorithm is a computational technique that makes it possible to solve difficult problems, such as those involving power systems. We described genetic algorithms and developed a genetic algorithm-based software program called Sistema de Análise de Desempenho de Aterramentos (SADA) Grounding Performance Analysis System, which allows us to evaluate the behavior of the ground under atmospheric discharge conditions.

To implement SADA, it is necessary to determine the electrical behavior of the mesh by applying a low voltage pulse and measuring the resulting current in the auxiliary grounding. From these measurements, SADA uses genetic algorithms to model the grounding in Model PI-RL. From this model, grounding behavior during atmospheric discharge is simulated using the discharge current standard. The proposed methodology is innovative in that it makes use of procedures that do not require verification of the topology of the ground to assess their performance. The results are relevant, since the parameters determined by SADA are close to those found experimentally, especially resistance when compared with the simulated experimental resistance. This is an indicator of the method's efficiency.

Keywords: Grounding systems, model PI-RL, genetic algorithm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Motivação da Tese.....	2
1.3	Objetivo da Tese.....	3
1.4	Organização da Tese.....	3
2	ATERRAMENTOS ELÉTRICOS SOB DESCARGAS	
	ATMOSFÉRICAS.....	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Descargas Atmosféricas – Histórico.....	4
2.3	Modelo de Descarga.....	4
2.4	Modelagens Matemáticas dos Aterramentos em Descarga Atmosférica....	6
2.4.1	Modelagem Utilizando Linhas de Transmissão.....	6
2.4.2	Modelagem Utilizando Campo Eletromagnético.....	6
2.4.3	Modelagem Utilizando Circuitos Elétricos.....	7
2.5	Análise do Desempenho de Aterramento Elétrico Diante da Descarga Atmosférica.....	11
2.6	Medição do Desempenho de um Aterramento Elétrico sob Descarga Atmosférica.....	12
3	COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA – TEORIA E APLICAÇÃO.....	14
3.1	Introdução.....	14
3.2	Algoritmos Genéticos.....	14
3.2.1	Estrutura do Algoritmo Genético.....	15
3.2.2	Tipos de Cromossomos.....	17
3.2.3	Cruzamento e Mutação.....	18
3.2.4	Função de Avaliação.....	24
3.2.5	Seleção.....	24
3.2.6	Elitismo.....	26
3.3	Aplicação de Computação Evolutiva em Sistemas de Potência.....	26

4	COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA NA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS SOB DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	27
4.1	Introdução.....	27
4.2	Desenvolvimento do Modelo de Análise.....	27
4.3	Características dos Sinais Experimentais.....	30
4.4	Determinação da Tensão entre A e B no Circuito da Figura 4.1.....	31
4.5	Ajuste de Tempo.....	33
4.6	Características do Algoritmo Genético.....	33
4.7	Cálculo e Avaliação da Aptidão.....	34
4.8	Diagrama Funcional.....	34
5	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	37
5.1	Introdução.....	37
5.2	Valores Experimentais.....	38
6	SIMULAÇÕES.....	48
6.1	Introdução.....	48
6.2	Resultados Gerais.....	48
6.3	Resultados Específicos.....	49
7	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação de uma Corrente de Descarga Atmosférica.....	5
2.2	Características da Indutância e Capacitância Típicas em Aterramentos....	7
2.3	Aterramento - Circuito Equivalente.....	8
2.4a	Cabo de Aterramento.....	9
2.4b	Modelo PI-RL.....	9
2.4c	Malha PI-RL.....	10
2.5	Medição de Desempenho do Aterramento Elétrico.....	12
2.6	Esquema de Medição de Aterramento.....	13
3.1	Fluxograma de um Algoritmo Genético Canônico.....	16
3.2a	Cromossomo Binário.....	18
3.2b	Cromossomo Real.....	18
3.3	Cruzamento de Cromossomos Binários.....	18
3.4	Mutação de Cromossomo Binário.....	19
3.5	Cruzamento de Cromossomo Real com dois Pontos.....	20
3.6	Método <i>Radcliffe</i>	21
3.7	Método <i>Wright</i>	22
3.8	Cruzamento Heurístico.....	22
3.9	<i>Blend Crossover</i>	23
3.10	Mutação de Cromossomo Real.....	24
3.11	Método da Roleta.....	25
3.12	Método do Torneio.....	25
4.1	Aterramento Elétrico – Representação por Circuito Elétrico.....	28
4.2	Aterramento Elétrico – Representação por Circuito Elétrico (Setor J).....	31
4.3	Cromossomo de Simulação.....	33
4.4	Diagrama Funcional do SADA.....	35
5.1	Esquema Experimental de Medidas de Aterramento.....	37
5.2a	Tensão Experimental com Ruído – cabo de 20 m.....	39
5.2b	Tensão Experimental sem Ruído – cabo de 20 m.....	39
5.3a	Corrente Experimental com Ruído – cabo de 20 m.....	39
5.3b	Corrente Experimental sem Ruído – cabo de 20 m.....	39
5.4a	Tensão Experimental com Ruído – cabo de 30 m.....	40

5.4b	Tensão Experimental sem Ruído – cabo de 30 m.....	40
5.5a	Corrente Experimental com Ruído – cabo de 30 m.....	40
5.5b	Corrente Experimental sem Ruído – cabo de 30 m.....	40
5.6a	Tensão Experimental com Ruído – cabo de 40 m.....	41
5.6b	Tensão Experimental sem Ruído – cabo de 40 m.....	41
5.7a	Corrente Experimental com Ruído – cabo de 40 m.....	41
5.7b	Corrente Experimental sem Ruído – cabo de 40 m.....	41
5.8a	Tensão Experimental com Ruído – cabo de 50 m.....	42
5.8b	Tensão Experimental sem Ruído – cabo de 50 m.....	42
5.9a	Corrente Experimental com Ruído – cabo de 50 m.....	42
5.9b	Corrente Experimental sem Ruído – cabo de 50 m.....	42
5.10a	Tensão Experimental com Ruído – cabo de 60 m.....	43
5.10b	Tensão Experimental sem Ruído – cabo de 60 m.....	43
5.11a	Corrente Experimental com Ruído – cabo de 60 m.....	43
5.11b	Corrente Experimental sem Ruído – cabo de 60 m.....	43
5.12a	Tensão Experimental com Ruído – cabo de 70 m.....	44
5.12b	Tensão Experimental sem Ruído – cabo de 70 m.....	44
5.13a	Corrente Experimental com Ruído – cabo de 70 m.....	44
5.13b	Corrente Experimental sem Ruído – cabo de 70 m.....	44
5.14a	Tensão Experimental com Ruído – cabo de 80 m.....	45
5.14b	Tensão Experimental sem Ruído – cabo de 80 m.....	45
5.15a	Corrente Experimental com Ruído – cabo de 80 m.....	45
5.15b	Corrente Experimental sem Ruído – cabo de 80 m.....	45
5.16a	Tensão Experimental com Ruído – cabo de 100 m.....	46
5.16b	Tensão Experimental sem Ruído – cabo de 100 m.....	46
5.17a	Corrente Experimental com Ruído – cabo de 100 m.....	46
5.17b	Corrente Experimental sem Ruído – cabo de 100 m.....	46
6.1	SADA – Tensões de Descarga.....	48
6.2	SADA – Evolução do Erro.....	49
6.3a	SADA – Tensões de Descarga – cabos de 20 e 30 m.....	50
6.3b	SADA – Correntes na Descarga – cabo de 20 m.....	50
6.3c	SADA – Determinação de Parâmetros – cabo de 20 m (ref. tensão).....	50
6.3d	SADA – Erro Médio Quadrático – cabo de 20 m.....	50

6.4a	SADA – Tensões de Descarga – cabos de 30 e 40 m.....	51
6.4b	SADA – Correntes na Descarga – cabo de 30 m.....	51
6.4c	SADA – Determinação de Parâmetros – cabo de 30 m (ref. tensão).....	51
6.4d	SADA – Erro Médio Quadrático – cabo de 30 m.....	51
6.5a	SADA – Tensões de Descarga – cabos de 40 e 50 m.....	52
6.5b	SADA – Correntes na Descarga – cabo de 40 m.....	52
6.5c	SADA – Determinação de Parâmetros – cabo de 40 m (ref. tensão).....	52
6.5d	SADA – Erro Médio Quadrático – cabo de 40 m.....	52
6.6a	SADA – Tensões de Descarga – cabos de 50 e 60 m.....	53
6.6b	SADA – Correntes na Descarga – cabo de 50 m.....	53
6.6c	SADA – Determinação de Parâmetros – cabo de 50 m (ref. tensão).....	53
6.6d	SADA – Erro Médio Quadrático – cabo de 50 m.....	53
6.7a	SADA – Tensões de Descarga – cabos de 60 e 70 m.....	54
6.7b	SADA – Correntes na Descarga – cabo de 60 m.....	54
6.7c	SADA – Determinação de Parâmetros – cabo de 60 m (ref. tensão).....	54
6.7d	SADA – Erro Médio Quadrático – cabo de 60 m.....	54
6.8a	SADA – Tensões de Descarga – cabos de 70 e 80 m.....	55
6.8b	SADA – Correntes na Descarga – cabo de 70 m.....	55
6.8c	SADA – Determinação de Parâmetros – cabo de 70 m (ref. tensão).....	55
6.8d	SADA – Erro Médio Quadrático – cabo de 70 m.....	55
6.9a	SADA – Tensões de Descarga – cabos de 80 e 100 m.....	56
6.9b	SADA – Correntes na Descarga – cabo de 80 m.....	56
6.9c	SADA – Determinação de Parâmetros – cabo de 80 m (ref. tensão).....	56
6.9d	SADA – Erro Médio Quadrático – cabo de 80 m.....	56
6.10a	SADA – Tensões de Descarga – cabos de 100 e 80 m.....	57
6.10b	SADA – Correntes na Descarga – cabo de 100 m.....	57
6.10c	SADA – Determinação de Parâmetros – cabo de 100 m (ref. tensão).....	57
6.10d	SADA – Erro Médio Quadrático – cabo de 100 m.....	57

LISTA DE TABELAS

4.1	Parâmetros do Algoritmo Genético.....	33
5.1	Casos Experimentais.....	38
6.1	Valores de Resistências Simuladas e Experimentais.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère - Unidade de Corrente Elétrica
AG	Algoritmo Genético
bits	<i>Binary DigiTs</i>
BLX- α	<i>Blend Crossover</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBRN	Congresso Brasileiro de Redes Neurais/ Inteligência Computacional
CEC	<i>Congress on Evolutionary Computation</i>
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
GECCO	<i>Genetic and Evolutionary Computation Conference</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
Hz	Hertz
I_D	Corrente de Descarga
$I_{D\text{Expandida}}$	Corrente de Descarga Expandida
$I_{DR1\text{máx}}$	Corrente de Descarga Máxima Sobre o Resistor R1
I_{Exp}	Corrente Experimental
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência, Tecnologia de Goiás
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
kA	Kilo Ampères
Matlab	<i>Matrix Laboratory</i>
MV	Mega Volts
μs	Micro Segundo
N	Número de Setores de Pares de Indutores e Resistores PI-RL
Ω	Ohm - Unidade de Resistência Elétrica
PC	<i>Personal Computer</i>
PI-RL	Conjunto de Pares de Indutores e Resistores na Estrutura em <i>PI</i>
PPSN	<i>International Conference on Parallel Problem Solving from Nature</i>
R_{Exp}	Resistência Experimental

R_S	Resistência Simulada
s	Segundo - Unidade de Tempo
SADA	Sistema de Análise de Desempenho Aterramentos
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
V	Volt - Unidade de Tensão Elétrica
V_{Exp}	Tensão Experimental
V_{Parm}	Tensão Determinada Pelos Parâmetros do SADA
V_S	Tensão Simulada

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A evolução tecnológica foi marcante no século XX, sendo que a utilização de sistemas elétricos permitiu o crescimento das cidades, os surgimentos de indústrias e da informática. Neste processo, os sistemas elétricos realizam a geração, o transporte e a distribuição do uso de energia, de forma segura. A segurança é fundamental, visto que a eletricidade é uma fonte de risco à vida e equipamentos. Neste contexto, o Sistema de Proteção de Descarga Atmosférica (SPDA) desempenha função importante na manutenção da vida e equipamentos, uma vez que os mesmos são projetados para evitar danos no momento de uma descarga atmosférica, onde o aterramento elétrico é responsável pelo escoamento da corrente de descarga captada. Visando o bom funcionamento desta proteção, é importante avaliar o comportamento do aterramento no momento da descarga atmosférica.

Os estudos sobre o comportamento de sistemas de aterramentos tiveram início na década de 30, consistindo a pesquisa na proteção de descargas atmosféricas em sistemas de potência (BEWLEY, 1934). Na década de 40, Sunde sugeriu introduzir o conceito de linha de transmissão com a dependência da frequência (SUNDE, 1948).

Com a evolução da capacidade de processamento dos computadores, foi possível propor ou ampliar os métodos de avaliação do desempenho de aterramentos, os quais são atualmente modelados através de circuitos elétricos, campo eletromagnético e linha de transmissão. Paralelamente à evolução do *hardware*, surgiram na computação técnicas de inteligência artificial, que solucionam problemas complexos através de soluções heurísticas, obtendo resultados satisfatórios. Tendo a computação evolutiva como subárea, a qual aplica os princípios da evolução biológica para propor modelos ou técnicas na solução de problemas complexos. Um desses problemas, é a determinação de máximos ou mínimos de funções complexas, onde existem vários mínimos ou máximos locais que dificultam a resolução por métodos tradicionais (LAI, 1998).

Embora os métodos para avaliação dos aterramentos façam uso do poder computacional, aplicações de inteligência artificial, nesta análise, se apresentam

promissoras face à complexidade envolvida devido às características do sinal e dos aspectos físicos envolvidos.

1.2 Motivação da Tese

Sendo diversas as funções de um aterramento elétrico, elas dependem de aplicação prática. Por exemplo, no caso do aterramento do neutro do transformador de uma subestação, ele recebe permanentemente uma corrente de 60 Hz. Já em outra aplicação, ele serve de referência de potencial para um circuito eletrônico, o chamado terra eletrônico.

Existem aterramentos cuja função é de dar proteção aos equipamentos e, também, evitar choques elétricos em pessoas e animais. Estes servem para aterrar, por exemplo, carcaça de motores elétricos. Nas aplicações citadas, o aterramento se comporta como um elemento resistivo no circuito elétrico. Porém, existe uma aplicação tão importante quanto às outras, que em muitos casos o aterramento não se comporta como um elemento puramente resistivo. Trata-se do caso do aterramento de sistemas de proteção aéreo contra descargas atmosféricas. Devido à natureza destas descargas, uma corrente elétrica que atinge valores de dezenas de milhares de Ampères em intervalo de tempo da ordem de micro segundos, em função das dimensões físicas e geometria do aterramento, pode apresentar efeitos não somente resistivos, mas também indutivos e capacitivos. Estes efeitos são comprovados através de resultados práticos de medição e justificados fisicamente através de estudos teóricos, onde se obtém como resultado um potencial elétrico, na tomada de terra, superior ao seu valor se fosse considerado apenas o efeito resistivo. Desta forma, nas aplicações onde o aterramento elétrico fica submetido a descargas atmosféricas, a medição que se faz tradicionalmente e que corresponde apenas à medição da resistência elétrica, não é suficiente para avaliar o desempenho elétrico do referido aterramento. Faz-se necessário a realização de uma medição onde se obtém o comportamento global do aterramento, ou seja, seus efeitos resistivo, indutivo e capacitivo, simultaneamente.

Atualmente, não existe disponível no mercado um equipamento que faça esta medição em campo com precisão adequada. Alguns medidores foram lançados no mercado, mas não tiveram aceitação, uma vez que o princípio de funcionamento dos mesmos não se adequa às condições do aterramento diante de descargas atmosféricas. Eles se baseiam na medição do aterramento em corrente alternada, porém a resposta do mesmo diante de uma descarga atmosférica é totalmente diferente.

Os resultados teóricos e experimentais obtidos com a metodologia de medição do desempenho de um aterramento elétrico sob descarga atmosférica desenvolvida por MEDEIROS (1998), mostraram a viabilidade da metodologia. Entretanto, algumas dificuldades foram encontradas neste trabalho. Esta tese visa aplicar soluções de métodos computacionais para resolver tais dificuldades.

1.3 Objetivo da Tese

Uma metodologia que vislumbre a possibilidade de se fazer a medição em campo do desempenho de aterramento elétrico sob descarga atmosférica, foi proposta por MEDEIROS (1998). No trabalho desenvolvido na citada referência, resta uma questão fundamental para sua viabilização prática: desenvolver metodologia para realizar transformação dos resultados experimentais de campo em valores que caracterizam o aterramento em condição de descarga atmosférica. O objetivo deste trabalho é resolver esta questão, utilizando técnica de computação evolutiva.

1.4 Organização da Tese

O Capítulo 1 apresenta a Introdução do trabalho, comentando a utilização da computação no cotidiano das pessoas e, especialmente em Engenharia Elétrica, situando o problema relacionado à avaliação de desempenho de aterramento elétrico. Neste Capítulo, é apresentado a estrutura de como o trabalho será desenvolvido.

O Capítulo 2 expõe os modelos de análise de sistemas de aterramentos elétricos.

O Capítulo 3 discute as características da computação evolutiva, onde é apresentada a técnica de algoritmos genéticos.

O Capítulo 4 descreve o aplicativo de análise de desempenho de sistema de aterramento baseado em algoritmos genéticos.

O Capítulo 5 apresenta as tensões e correntes experimentais, assim como os procedimentos realizados em campo para obtenção destes dados.

O Capítulo 6 apresenta as simulações onde foram encontradas as tensões de descargas, a partir dos dados experimentais filtrados.

O Capítulo 7 traz a conclusão e os resultados deste trabalho, bem como tópicos que podem ser objetos de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ATERRAMENTOS ELÉTRICOS SOB DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 Introdução

Descargas atmosféricas ocorrem frequentemente em períodos de chuva, podendo causar danos a pessoas e instalações. Este fenômeno natural é caracterizado pela alta intensidade de corrente elétrica e de curta duração, sendo denominado raio.

Uma das funções dos aterramentos elétricos é permitir a absorção da corrente elétrica proveniente do raio pela terra. Este Capítulo apresenta conceitos e características das descargas atmosféricas e, também, das diversas formas de analisar o comportamento de aterramentos elétricos sob ação de raios.

2.2 Descargas Atmosféricas - Histórico

Os primórdios do estudo de descargas atmosféricas são delineados pela experiência realizada por Benjamin Franklin (GREENWOOD, 1971). As pesquisas nesta área se justificam devido aos danos que as descargas atmosféricas causam em pessoas e instalações (BERGER, 2007). Verificou-se que nos Estados Unidos e Canadá, uma das causas de interrupções do fornecimento de energia elétrica está relacionada às descargas atmosféricas (GREENWOOD, 1971). No Brasil, o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), através do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), elabora estatísticas sobre descargas atmosféricas nos municípios brasileiros (INPE, 2009). Conforme o relatório do biênio 2007/2008, foram observados 3.183 municípios. De acordo com o Boletim No. 310 do ELAT, em 2005, ocorreram 3,7 milhões de raios. Em 2008, foram 7,5 milhões, demonstrando que estes fenômenos dobraram em quatro anos, da mesma forma que a pesquisa evidenciou a influência da concentração urbana no número de raios. Com este cenário, o risco de danos tende a aumentar.

2.3 Modelo de Descarga

As descargas elétricas se caracterizam pelo acúmulo de cargas elétricas na atmosfera e são denominadas de relâmpagos. Estas ocorrem para neutralizar cargas de polaridades opostas, armazenadas em uma mesma nuvem, entre nuvens ou entre nuvem e terra ou vice-versa. Dependendo de onde os relâmpagos originam e

terminam, os mesmos recebem denominações distintas. Quando eles ocorrem da nuvem para o solo ou do solo para a nuvem, são denominados raios. Já os que têm origem e destino numa nuvem ou mesmo num ponto qualquer da atmosfera, são denominados descargas no ar. As descargas atmosféricas da nuvem para o solo atingem picos de 20 kA a 30 kA e, em 1% destas descargas a corrente excede 200 kA (MACGORMAN e RUST, 1998) e (RAKOV e UMAN, 2005).

Em relação à proteção contra descargas atmosféricas, a corrente de descarga é a propriedade mais importante. Valores mínimo, médio e máximo quanto a magnitude da corrente, tempo para atingir o valor máximo, tempo para cair 50% do valor máximo e taxa de crescimento são características estudadas (SUNDE, 1948).

A forma de onda da corrente normalizada de uma descarga atmosférica é especificada pela frente de onda e por sua cauda. O intervalo entre o início e o valor máximo representa a frente de onda. A cauda representa a redução do valor máximo até sua metade. A Figura 2.1 faz a representação de uma descarga atmosférica que atinge seu valor máximo em 2 μ s e a cauda ocorre em 20 μ s. Pode-se admitir uma variação de 20 a 200 kA no pico de corrente de descarga. A forma de onda normalizada da corrente de 20 kA é apresentada na Figura 2.1. Neste trabalho, utilizaremos o termo descarga atmosférica para expressar um raio, sendo que esta será normalizada.

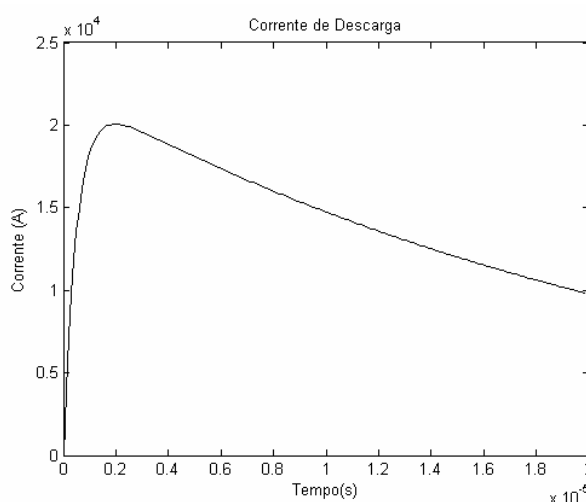


Figura 2.1 – Representação de uma Corrente de Descarga Atmosférica

2.4 Modelagens Matemáticas dos Aterramentos em Descarga Atmosférica

As modelagens de aterramentos são efetuadas sob os enfoques de linhas de transmissão, campo eletromagnético e circuitos elétricos, sendo que para análise podem ser aplicados métodos analíticos e numéricos.

2.4.1 Modelagem Utilizando Linhas de Transmissão

O enfoque de linhas de transmissão é caracterizado por GUPTA, THAPAR e SINGH (1980 e 1992), os quais utilizam um método experimental para calcular a indutância de uma malha de aterramento quadrada, determinando a impedância de impulso como a relação entre os picos da tensão e da corrente no ponto de inserção desta, sendo analisadas impedâncias no centro e nas bordas da malha. Outro aspecto importante, foi verificar que o efeito da ionização do solo na impedância de impulso nas malhas de aterramento de subestações, podem ser ignorados.

MAZZETI e VECA (1983) desenvolveram um modelo que permite a formulação da impedância do eletrodo, bem como distribuições de tensão e de corrente ao longo de um condutor aterrado.

MELIOPOULOS e MOHARAM (1983) utilizaram um modelo cujo comportamento é simulado por meio do software *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), onde os transientes podem ser analisados a partir de um condutor enterrado, sendo dividido em pequenos segmentos (elementos finitos) com todas as características elétricas de indutância, capacitância, resistência em série, resistência para a terra e acoplamento para outros elementos finitos. Com estas mesmas considerações, PAPALEXOPOULOS e MELIOPOULOS (1987) estudaram o comportamento de sistemas de aterramento, verificando que a resistência de aterramento decai com o aumento da malha, em 60 Hz a reatância pode ser comparada com a resistência de aterramento e que em altas frequências a reatância não pode ser desprezada.

2.4.2 Modelagem Utilizando Campo Eletromagnético

Utilizando os conceitos fundamentais de eletromagnetismo DAWALIBI (1986), GRCEV e DAWALIBI (1990), XIONG e DAWALIBI (1994), GRCEV (1996) apresentaram um modelo de análise do comportamento de sistemas de aterramentos para baixas e altas frequências, também sob a ação de transientes, verificando os campos elétrico e magnético a partir de uma descarga atmosférica

escoando a partir da borda e do centro de uma malha de aterramento. GRCEV (2007) apresenta o comportamento da indutância e da capacitância em uma malha de aterramento. Normalmente, esta linha de pesquisa enfatiza o efeito de ionização na região de contato dos condutores com a terra, onde sob efeito de ionização a resistência torna-se dinâmica. A Figura 2.2 (GRCEV, 2007) demonstra o comportamento dessas grandezas. Na região de baixas frequências, tem-se o valor puramente resistivo. Em altas frequências, surgem efeitos indutivos e capacitivos, contudo, pode-se observar que o efeito indutivo é 200 vezes maior que o capacitivo em 1 MHz.

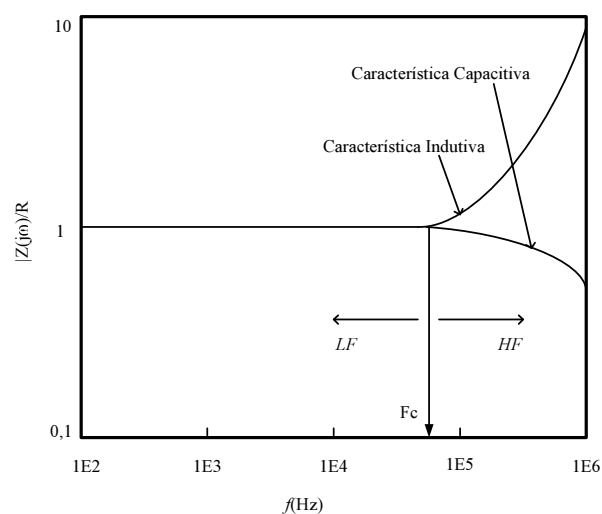


Figura 2.2 – Características da Indutância e Capacitância
Típicas em Aterramentos

2.4.3 Modelagem Utilizando Circuitos Elétricos

A modelagem de sistemas de aterramentos usando circuitos elétricos baseia-se na representação do comportamento dos fenômenos físicos por componentes elétricos, considerando-os gerando campos elétricos. O trabalho de VERMA e MUKHEDKAR (1981) utiliza resistência, capacitância e indutância para representar malhas de aterramentos, desta forma, o sistema é representado por um circuito elétrico equivalente. KOSZTALUK, LOBODA e MUKHEDKAR (1981) determinaram o circuito equivalente por meio de resistores e indutores, observaram que a resistência elétrica do condutor tem efeito desprezível, mesmo levando em consideração o efeito pelicular. A teoria de circuitos elétricos apresenta precisão razoável quando comparadas com valores experimentais. Nesta modelagem, cada segmento de malha

de aterramento pode ser substituído por uma linha de transmissão sem perdas (LIU, 2004).

No estudo de sistemas de aterramentos, VISACRO (2007) apresenta o aterramento composto por três componentes: condutores metálicos que conectam o sistema aos eletrodos, os eletrodos e a terra em torno dos eletrodos. Evidenciando que qualquer terminação para a terra apresenta efeitos resistivos, capacitivos e indutivos. Onde um circuito equivalente que represente estes tipos de efeitos, em uma pequena parte do sistema de aterramento, pode ser representado pela Figura 2.3.

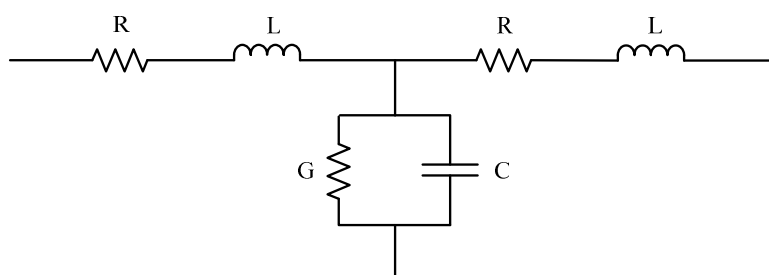


Figura 2.3 – Aterramento - Circuito Equivalente

O circuito da Figura 2.3 representa o comportamento da malha de aterramento sob a análise de circuitos. Porém, o mesmo circuito é utilizado na análise do comportamento de aterramento usando linha de transmissão (HE et al, 2005). MELIOPOULOS e MOHARAM (1983) usando teoria de linha de transmissão, desenvolveram o equacionamento analisando a indutância, capacitância e a resistência de escoamento de corrente para a terra.

MEDEIROS (1998) *apud* KOSZTALUK, LOBODA e MUKHEDKAR (1981), VERMA e MUKHEDKAR (1980 e 1981) utilizaram o método de análise de aterramentos baseado em circuitos elétricos, considerando a evidência do efeito indutivo face aos demais efeitos físicos, o qual pode ser observado na Figura 2.2. Outros trabalhos também evidenciam o efeito indutivo (VISACRO, 2007) e (RAMAMOORTY et al., 1989). No estudo, Carlos Medeiros utilizou o modelo PI-RL para análise do comportamento do aterramento, onde, na determinação de parâmetros, foi considerado um cabo de comprimento l_c , enterrado horizontalmente a uma profundidade h do solo, recebendo uma corrente I em uma de suas extremidades, sendo o cabo dividido em n trechos de comprimentos iguais a c_t , conforme apresentado na Figura 2.4a. Em relação ao comportamento elétrico deste aterramento,

o mesmo foi caracterizado por parâmetros concentrados de resistência e indutância. Desta forma, o aterramento foi representado por um conjunto de pares de indutores e resistores na estrutura em π . A Figura 2.4.b ilustra o circuito RL ao longo do cabo, onde a i -ésima resistência colocada no i -ésimo nó do circuito computa a passagem da corrente elétrica no trecho i do cabo para a terra, enquanto a i -ésima indutância computa o efeito indutivo da parcela de corrente que passa no trecho i e vai para o trecho $i+1$, internamente ao cabo. Tem-se a presença de $n-1$ indutâncias, uma vez que a corrente passando pelo último trecho flui pela última resistência, não produzindo efeito indutivo. No caso de uma malha, tem-se a representação em π ilustrada na Figura 2.4c.

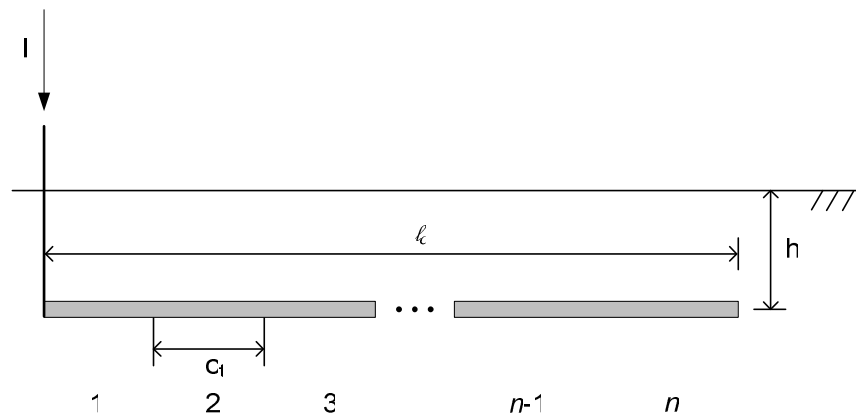


Figura 2.4a - Cabo de Aterramento

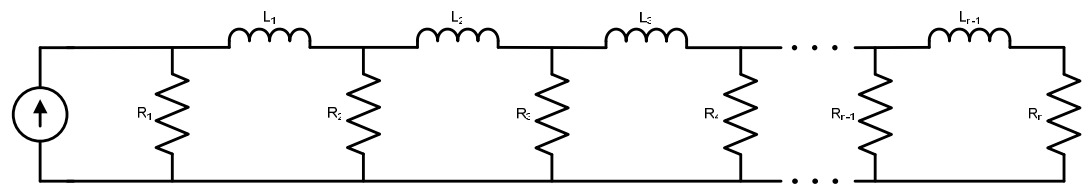


Figura 2.4b - Modelo PI-RL

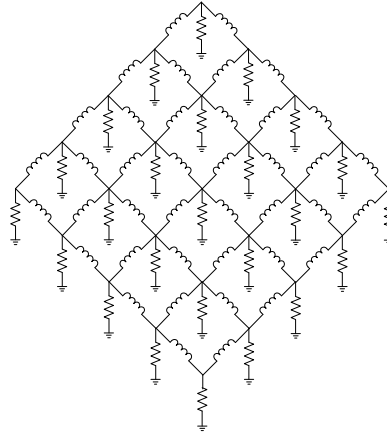


Figura 2.4c – Malha PI-RL

Para determinar a i -ésima indutância, o cabo foi dividido em n trechos, onde KOSZTALUK, LOBODA e MUKHEDKAR (1981) recomendam o comprimento de um trecho entre 10 e 15 metros, desta forma determinou-se a indutância:

$$L_i = 2c_t \ln\left(\frac{2c_t}{a}\right) 10^{-7} \quad (2.1)$$

Onde:

c_t : é o comprimento do trecho em metros

a : é o raio do eletrodo em metros

Já a quantidade de trechos foi determinada da seguinte forma:

$$n = \frac{l_c}{c_t} \quad (2.2)$$

Onde:

l_c : é o comprimento do cabo em metros

c_t : é o comprimento do trecho em metros

A resistência média do cabo enterrado foi determinada por:

$$R_{cabo} = \left(\frac{V_x}{I_r} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

V_x : é a tensão medida no aterramento principal

I_r : é a corrente de retorno medida no aterramento auxiliar

A resistência correspondente ao trecho, foi então, determinada:

$$R_i = nR_{cabo} \quad (2.4)$$

Onde:

n : é o número de trechos do cabo

R_{cabo} : é o valor médio da resistência do cabo enterrado

2.5 Análise do Desempenho de Aterramento Elétrico Diante da Descarga Atmosférica

O desempenho do aterramento elétrico sob uma descarga atmosférica é caracterizado pela variação temporal dos potenciais elétricos na tomada de terra e em outros pontos estratégicos na superfície do solo, considerando o aterramento submetido a uma corrente de descarga atmosférica. A escolha dos pontos estratégicos na superfície do solo é definida para cada caso de aterramento a ser medido. A Figura 2.5 ilustra fisicamente o processo através do qual se mede o desempenho do aterramento elétrico diante de uma corrente de descarga I_D , provinda de um sistema de proteção aéreo contra descargas atmosféricas SPDA. Os pontos estratégicos mencionados anteriormente estão indicados na Figura 2.5 por P_1 , P_2 , até P_N .

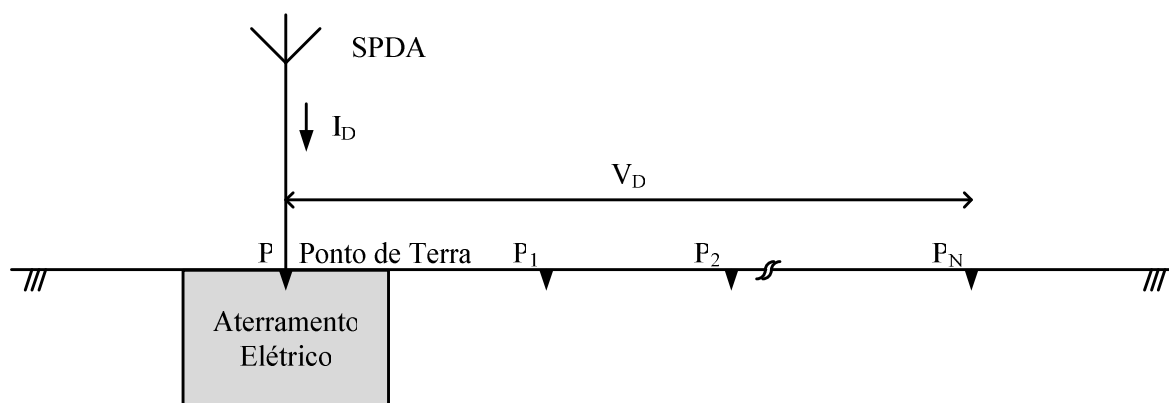


Figura 2.5 – Medição de Desempenho do Aterramento Elétrico

2.6 Medição do Desempenho de um Aterramento Elétrico sob Descarga Atmosférica

Pode-se medir em campo o desempenho do aterramento diante da descarga atmosférica. Como esta medição se fará no ambiente industrial ou equivalente, o medidor deverá ter características compatíveis com o ambiente, ou seja, robusto, simples e de custo equivalente ao tradicional terrômetro. Observando os valores máximos de corrente de descargas apresentados no Item 2.3, conclui-se que é impraticável fazer a medição do referido desempenho de aterramento através de um equipamento simples e barato, aplicando-se os valores reais da corrente de descarga atmosférica. Assim, como o comportamento do aterramento pode ser considerado conservativamente linear, é possível fazer a medição através de um modelo reduzido, aplicando-se uma corrente elétrica de poucas unidades de Ampère, e posteriormente fazer a projeção linear para o valor real da corrente de descarga. Nesta condição, ainda existe uma dificuldade em se projetar economicamente, e também de forma simples, o equipamento de medição. Para vencer esta dificuldade, (MEDEIROS, 1998) concebe uma filosofia de medição onde aplica-se um pulso de tensão no aterramento e mede-se a corrente resultante. A Figura 2.6 ilustra o esquema utilizado para a medição de aterramento.

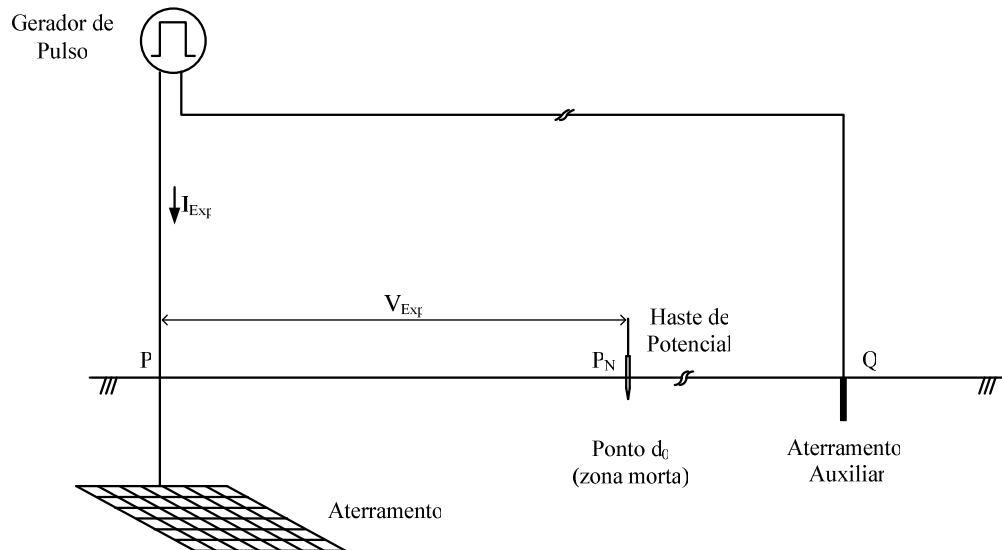


Figura 2.6 – Esquema de Medição de Aterramento

O pulso de tensão é aplicado aos terminais P e Q, sendo registrada a corrente I_{Exp} e a tensão V_{Exp} . Ocorre, porém, que pelo fato da tensão aplicada ser em forma de pulso, a corrente I_{Exp} resultante não corresponde à forma de onda de uma corrente de descarga. Portanto, utilizando uma corrente de descarga atmosférica, é preciso obter os valores de tensão de descarga desenvolvida no aterramento, a partir dos valores instantâneos de tensão V_{Exp} e corrente I_{Exp} medidos.

Assim, a transformação que permite conseguir os valores instantâneos de tensão no aterramento submetido a descarga atmosférica, a partir dos valores experimentais V_{Exp} e I_{Exp} , pode ser por cálculo matemático e alternativamente por métodos heurísticos. O método de identificação de sistemas foi utilizado na tentativa de obter esta transformação (DE PAULA, 2003), sendo este o objetivo deste trabalho, que é o de procurar realizá-la utilizando de métodos heurísticos baseados em computação evolutiva.

CAPÍTULO 3

COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA – TEORIA E APLICAÇÃO

3.1 Introdução

A computação evolutiva é uma área de estudo da inteligência artificial que tem como objetivo simular computacionalmente os processos de seleção e evolução biológica. Várias publicações e eventos estão relacionados a esta área de conhecimento, tais como: o *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (CEC), *Genetic and Evolutionary Computation Conference* (GECCO) e a *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature* (PPSN), os quais indicam o interesse e a aplicação de computação evolutiva em várias áreas do conhecimento, sendo ela indicada como ferramenta na solução de problemas de difícil resolução com usos de técnicas de otimização clássicas, como em sistemas de potência (LAI, 1998).

Os estudos em computação evolutiva tiveram início na década de 60, quando vários cientistas desenvolveram, de forma independente, sistemas evolutivos atuando como ferramentas de otimização de problemas em engenharia (LAI, 1998). Na evolução dos seres, os princípios de seleção e disputa na perpetuação das espécies são comuns, desta forma, os seres evoluem geneticamente. A computação evolutiva utiliza os princípios biológicos na solução de problemas diversos. Neste contexto, os princípios desta técnica simulam o processo de evolução das espécies, onde os melhores indivíduos possuem maior chance de perpetuarem sua informação genética na reprodução. Os processos de busca evolutivos são caracterizados por serem estocásticos. Este modelo de busca permite evolução contínua dos resultados, que são próximos do ideal. O objetivo pode ser a minimização ou a maximização de uma função, através da obtenção do mínimo global ou do máximo global, respectivamente. Durante a busca, há possibilidade de o algoritmo encontrar mínimos ou máximos locais e permanecer nestas regiões de forma incorreta. De forma geral, é necessário verificar o comportamento de tais soluções, visando uma boa margem de confiabilidade dos resultados (MITCHELL, 1998).

3.2 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos foram formalmente propostos por Holland em 1975 (HOLLAND, 1992). Consistem em uma técnica de busca probabilística, de modo que partindo dos mesmos valores iniciais, os resultados normalmente estão em uma

mesma região de resposta. Como se trata de uma técnica da computação evolutiva, os processos de busca baseiam-se na teoria da evolução biológica proposta por Charles Darwin, ocorrendo cruzamento, mutação e elitismo de indivíduos (HAUPT e HAUPT, 2004). Neste mecanismo, o processo de evolução se dá por meio de gerações sucessivas, e é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada. O processo de busca é orientado pela seleção natural Darwiniana, onde os indivíduos mais aptos são escolhidos de modo probabilístico. As informações são passadas de pai para filho. Tradicionalmente, tal informação é representada por um cromossomo que possui valores binários ou reais. Cada cromossomo contém valores das variáveis associadas ao problema. No método canônico de reprodução, ocorre o cruzamento de informações genéticas de dois cromossomos pais, gerando um filho e, à medida que ocorrem as gerações, os conteúdos dos cromossomos são ajustados ocasionando a aproximação da melhor resposta. Outra característica, é que no processo evolutivo, também, ocorrem mutações de genes, correspondendo a uma alteração no código genético do cromossomo.

Como algoritmo de busca, o AG visa encontrar a melhor resposta que satisfaça uma condição, sendo que esta deve se situar em região de máximo ou mínimo global. Nesta busca, uma função de avaliação é usada para mensurar as respostas de todos os cromossomos. Utilizando os princípios da genética, os indivíduos que possuem melhores características, aqui interpretadas como melhores resultados, terão mais probabilidades de serem utilizados ou até mesmo serem mantidos para a próxima geração. À medida que ocorrem as gerações, os valores dos cromossomos convergem para melhores soluções potenciais, o que, normalmente, leva à região da solução ótima. Como na natureza, os indivíduos procuram perpetuar sua espécie. Assim, estes passaram por cruzamentos e mutações ocasionando uma contínua mudança de valores (MITCHELL, 1998).

3.2.1 Estrutura do Algoritmo Genético

A estrutura básica do algoritmo genético é apresentada na Figura 3.1. Inicialmente, são estabelecidos os parâmetros de cruzamento (Cr), mutação (Mu) e elitismo (El). Em seguida, ocorre a geração da população inicial com valores aleatórios, caso a região dos valores seja conhecida, é possível delimitar a faixa dos valores a fim de aumentar a eficiência desta técnica. Na sequência, é determinada a

aptidão de cada cromossomo através da função de avaliação, sendo que esta permite identificar os cromossomos mais aptos.

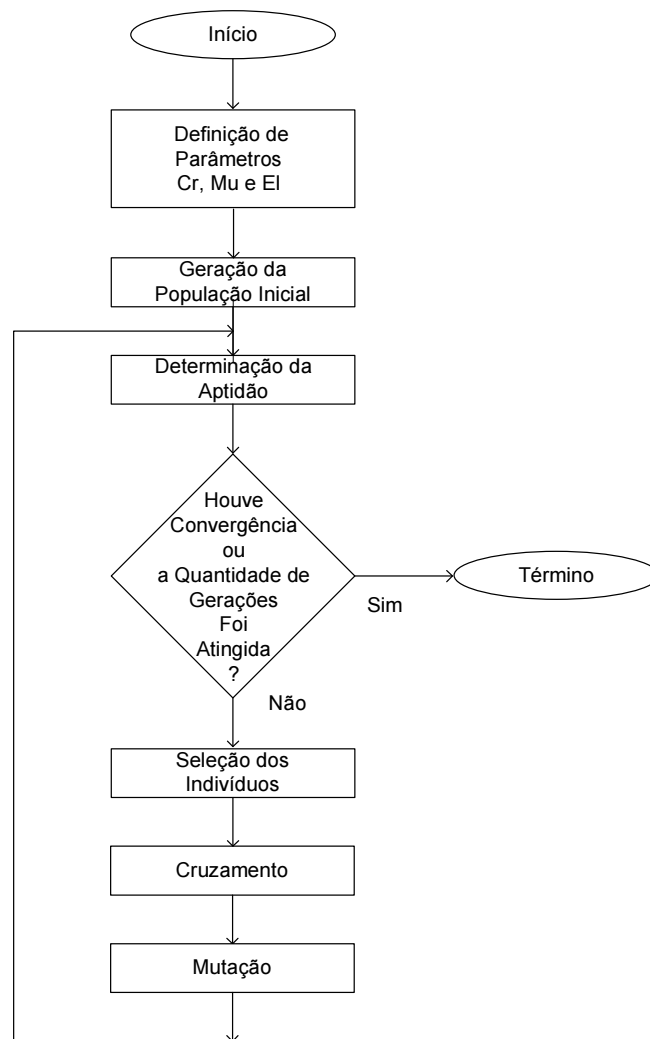


Figura 3.1 – Fluxograma de um Algoritmo Genético Canônico

Se o objetivo for maximizar valores, o AG buscará cromossomos que apresentem resultados maiores possíveis. Caso seja minimização, os cromossomos devem proporcionar menores valores. O processo de verificação de convergência ou do limite de gerações é verificado, e caso uma dessas condições seja atendida, ocorre o término da execução. Caso contrário, ocorrerá nova geração que consiste em determinar a nova população.

A nova população Pop_{Nova} é composta de cromossomos filhos da geração atual $Filhos_{GerAtual}$ e dos melhores cromossomos da geração atual especificados pelo percentual de elitismo E_l , que é determinado no procedimento de inicialização do

programa. Estes cromossomos serão denominados cromossomos de elitismo $Cromossomos_{Elitismo}$. Desta forma, a nova população é assim determinada:

$$Pop_{Nova} = Cromossomos_{Elitismo} \cup Filhos_{GerAtual} \quad (3.1)$$

Os filhos da geração atual são obtidos utilizando os melhores cromossomos da geração atual. Como no processo evolutivo há a possibilidade de cruzamento da população, em AG a simulação dessa possibilidade ocorre pela geração de um valor aleatório de cruzamento V_{ACr} que é comparado com o percentual de cruzamento C_r definido no início do programa. Caso V_{ACr} seja menor que C_r ocorrerá o cruzamento. Se V_{ACr} for maior, serão selecionados outros cromossomos e novamente será gerado outro valor de V_{ACr} , este processo ocorrerá até que V_{ACr} seja menor que C_r .

Como na natureza há possibilidade de mutação de espécies, o algoritmo genético também implementa esta situação. No início da simulação, é especificado o percentual de mutação P_m . A possibilidade do cromossomo filho gerado pela etapa anterior ser mutado, é feita geração de um valor aleatório de mutação V_{APm} , caso este valor seja menor que P_m ocorrerá a mutação, se esta condição não ocorrer, o cromossomo não sofrerá mutação. A nova geração estará gerada quando todos os cromossomos filhos da geração atual estiverem sido gerados. A partir da nova geração, serão verificadas as aptidões e o fluxo de processamento repete como na Figura 3.1.

3.2.2 Tipos de Cromossomos

Os valores dos genes dos cromossomos usualmente são binários ou reais. Algoritmos genéticos podem ser caracterizados conforme a representação de dados utilizados, sendo que o algoritmo genético binário manipula cromossomos binários e o algoritmo genético contínuo trabalha com números reais em seus cromossomos (HAUPT e HAUPT, 2004). As Figuras 3.2a e 3.2b apresentam os tipos dois de cromossomos. Para os cromossomos binários, um conjunto sequencial de genes representa uma variável, sendo que a quantidade de genes depende do domínio desta variável. Nos cromossomos reais, um gene representa o valor de uma variável.

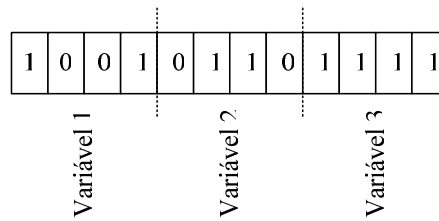


Figura 3.2a - Cromossomo Binário

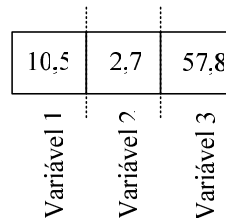


Figura 3.2b – Cromossomo Real

Visando um melhor desempenho do algoritmo genético, deve-se definir o intervalo de valores de cada variável para reduzir o espaço de busca. Para os cromossomos binários, o intervalo de valores está relacionado à quantidade de *bits* necessária para representar o domínio de cada variável.

3.2.3 Cruzamento e Mutação

Nos algoritmos genéticos binários, o cruzamento corresponde à troca de dados entre dois cromossomos, conforme apresentado na Figura 3.3. O procedimento de cruzamento ocorreu em um ponto do cromossomo. Assim, os cromossomos resultantes possuem metade do código genético de cada cromossomo inicial.

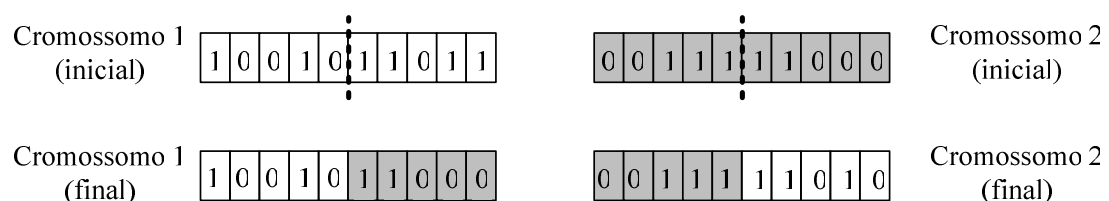


Figura 3.3 – Cruzamento de Cromossomos Binários

A mutação é caracterizada pela alteração do gene sem interferência de outro cromossomo, como apresentado na Figura 3.4, onde é observada a mudança de 2 genes no cromossomo.

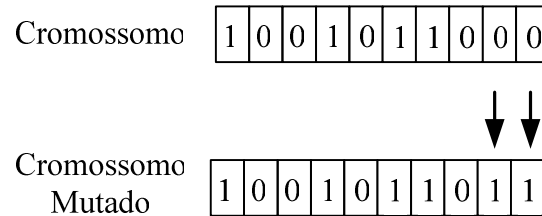


Figura 3.4 – Mutação de Cromossomo Binário

Nos algoritmos genéticos contínuos, os processos de cruzamento e mutação são diferentes do modelo binário, uma vez que os conteúdos dos genes são números reais. Considerando-se n variáveis e uma população de N cromossomos, o cromossomo inicial é:

$$\text{Cromossomo}_{\text{inicial}} = \text{rand}(1 \times n) \quad (3.2)$$

Observando-se os limites que cada variável pode atingir, obtém-se um melhor desempenho do algoritmo genético. A população inicial será:

$$\text{Pop}_{\text{inicial}} = \text{rand}(N \times n) \quad (3.3)$$

Existem vários métodos para se obter o cruzamento. Um método proposto por Haupt consiste em trocar os genes de cromossomos pais, gerando um cromossomo filho (HAUPT e HAUPT, 2004). Considere os pais:

$$\text{Pai} = [\text{var}_{1p}, \text{var}_{2p}, \text{var}_{3p}, \text{var}_{4p}, \dots, \text{var}_{np}] \quad (3.4)$$

$$\text{Mãe} = [\text{var}_{1m}, \text{var}_{2m}, \text{var}_{3m}, \text{var}_{4m}, \dots, \text{var}_{nm}] \quad (3.5)$$

Mediante escolha aleatória de genes, os filhos poderão ter o código genético:

$$\text{Filho}_1 = [\text{var}_{1p}, \text{var}_{2m}, \text{var}_{3m}, \dots, \text{var}_{np}] \quad (3.6)$$

$$\text{Filho}_2 = [\text{var}_{1m}, \text{var}_{2p}, \text{var}_{3p}, \dots, \text{var}_{nm}] \quad (3.7)$$

A Figura 3.5 apresenta a realização de cruzamento em dois pontos, onde não ocorre mudança de valores dos genes, mas apenas troca dos mesmos. A alteração numérica se dará através da mutação.

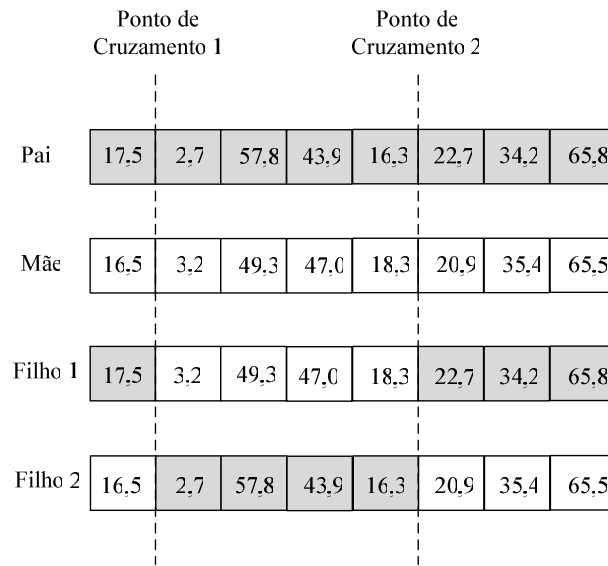


Figura 3.5 – Cruzamento de Cromossomo Real com dois Pontos

O método *Radcliffe* (HAUPT e HAUPT, 2004) combina valores de dois pais e um fator de multiplicação β com intervalo de 0 a 1; e desta forma tem-se:

$$\text{Filho}_1 = \beta \text{var}_{nm} + (1 - \beta)\text{var}_{np} \quad (3.8)$$

$$\text{Filho}_2 = (1 - \beta)\text{var}_{nm} + \beta\text{var}_{np} \quad (3.9)$$

Onde:

β é um número aleatório no intervalo [0,1]

var_{nm} é a enésima variável do cromossomo da mãe

var_{np} é a enésima variável do cromossomo do pai

Por exemplo, se β for 1, o código genético do filho 1 será o da mãe, e do filho 2 corresponderá aos dados do pai, caso β seja 0,5 ocorrerá a média de valores dos cromossomos dos pais.

A Figura 3.6 apresenta o método *Radcliffe*, onde o valor de β sorteado é 0,9.

Pai	17,5	2,7	57,8	43,9	16,3	22,7	34,2	65,8
Mãe	16,5	3,2	49,3	47,0	18,3	20,9	35,4	65,5
Filho 1	16,60	3,15	50,15	46,69	18,10	21,08	25,28	65,53
Filho 2	17,40	2,75	56,95	44,21	16,50	22,52	34,32	65,77

Figura 3.6 – Método *Radcliffe*

Outra técnica que pode ser aplicada em cromossomos reais é o uso do cruzamento linear proposto por Wright (HAUPT e HAUPT, 2004), em que os pais podem gerar 3 filhos, sendo que o filho que apresentar melhor índice de aptidão será escolhido para participar da próxima geração. Os filhos são determinados da seguinte forma:

$$\text{Filho}_1 = 0,5\text{var}_{\text{nm}} + 0,5\text{var}_{\text{np}} \quad (3.10)$$

$$\text{Filho}_2 = 1,5\text{var}_{\text{nm}} - 0,5\text{var}_{\text{np}} \quad (3.11)$$

$$\text{Filho}_3 = -0,5\text{var}_{\text{nm}} + 1,5\text{var}_{\text{np}} \quad (3.12)$$

Caso os valores excedam os limites das variáveis, o cromossomo é descartado. O filho que possuir melhor aptidão será utilizado para a próxima geração. Outra possibilidade, é utilizar um fator diferente de 0,5.

A Figura 3.7 apresenta a técnica proposta por Wright, na qual são gerados três filhos.

Pai	17,5	2,7	57,8	43,9	16,3	22,7	34,2	65,8
Mãe	16,5	3,2	49,3	47,0	18,3	20,9	35,4	65,5
Filho 1	17,00	2,95	53,55	45,45	17,30	21,80	34,80	65,65
Filho 2	16,00	3,45	45,05	48,55	19,30	20,00	36,00	65,35
Filho 3	18,00	2,45	62,05	42,35	15,30	23,60	33,60	65,95

Figura 3.7 – Método *Wright*

Outra implementação, é o cruzamento heurístico proposto por Michalewicz em 1991 (HAUPT e HAUPT, 2004), onde o valor aleatório de β é determinado no intervalo [0,1].

A Figura 3.8 apresenta esta proposta de cruzamento, neste exemplo β é 0.9. Os valores das variáveis dos filhos definidos por:

$$\text{Filho} = \beta(\text{var}_{\text{nm}} - \text{var}_{\text{np}}) + \text{var}_{\text{nm}} \quad (3.13)$$

Pai	17,5	2,7	57,8	43,9	16,3	22,7	34,2	65,8
Mãe	16,5	3,2	49,3	47,0	18,3	20,9	35,4	65,5
Filho	15,60	3,65	41,65	49,79	20,10	19,28	36,48	65,23

Figura 3.8 – Cruzamento Heurístico

Se os valores excederem os limites das variáveis, o filho é descartado e será, portanto, gerado outro com o valor de β diferente.

O método *Blend Crossover* (BLX- α) proposto por Eshelman e Shaffer em 1993, inicia pela escolha do parâmetro α que determina a distância fora dos limites dos valores dos pais; tipicamente α pode ser 0,25 ou 0,5. Este método possibilita valores fora dos limites das variáveis, sem ocasionar perda de eficiência. O cromossomo filho é determinado da seguinte forma:

$$\text{Filho} = \text{var}_{n,p} + \beta(\text{var}_{n,m} - \text{var}_{n,p}) \quad (3.14)$$

Onde:

$$\beta = [-\alpha, 1+\alpha]$$

A Figura 3.9 apresenta o método *Blend Crossover* com α igual a 0,25 e β igual a 0,9.

Pai	17,5	2,7	57,8	43,9	16,3	22,7	34,2	65,8
Mãe	16,5	3,2	49,3	47,0	18,3	20,9	35,4	65,5
Filho	16,60	3,15	50,15	46,69	18,10	21,08	35,28	65,53

Figura 3.9 - *Blend Crossover*

A mutação ocorre através da substituição de um valor de uma variável por outra em um cromossomo. Desta forma, no caso do cromossomo real, é necessário utilizar uma função que gere aleatoriamente um índice de variável do cromossomo e, também, outro valor dentro do intervalo de operação da variável. E, finalmente, substitua o antigo valor pelo novo. A Figura 3.10 apresenta a mutação de um cromossomo real.

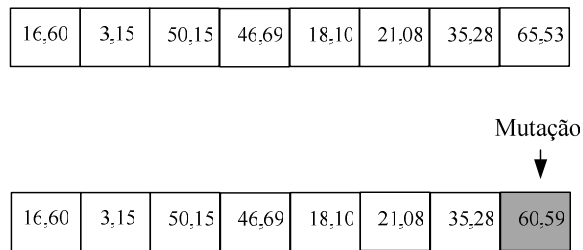


Figura 3.10 – Muta  o de Cromossomo Real

3.2.4 Fun  o de Avalia  o

No uso da fun  o de avalia  o, deve-se observar se o modelo consegue identificar as necessidades do problema de forma clara, devendo conter todas as restri  es e até mesmo puni  es apropriadas para cromossomos que desrespeitem as regras. Em termos de aptidão, a fun  o de avalia  o deve ser suave e regular, de modo que permita que cromossomos que tenham boa avalia  o estejam próximos dos cromossomos um pouco melhores ou superiores. A fun  o de avalia  o deve ser projetada de forma que apesar de mínimos e máximos locais existentes, o algoritmo não estacione nessas regiões de busca. Se esta fun  o possuir todas estas características, o algoritmo genético atingir   rapidamente seu objetivo (LINDEN, 2008).

3.2.5 Sele  o

A sele  o de indivíduos pais que irão participar do cruzamento pode ser feita por diversos métodos, dentre eles, o da roleta e do torneio. O método da roleta tem como referência a aptidão do indivíduo, em que os indivíduos que possuem alta aptidão, ter  o mais chances de serem selecionados para participar como pais da nova gera  o. Já os indivíduos com menores aptidões ter  o menores chances de serem escolhidos. Neste método, a probabilidade de sele  o de um indivíduo    proporcional    sua aptidão. A Figura 3.11 apresenta o método da roleta com 7 indivíduos.

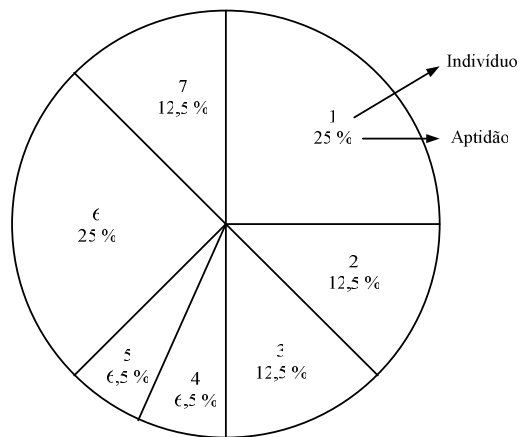


Figura 3.11 – Método da Roleta

O método do torneio consiste em realizar um torneio entre os indivíduos da população, serão sorteados aleatoriamente, onde o vencedor terá o direito de participar na geração de outro indivíduo. Para escolha do vencedor, é utilizada a aptidão de cada indivíduo, sendo o escolhido aquele que possuir melhor aptidão. É necessário que existam pelo menos 2 indivíduos em cada torneio. A Figura 3.12 apresenta o método do torneio (LINDEN, 2008).

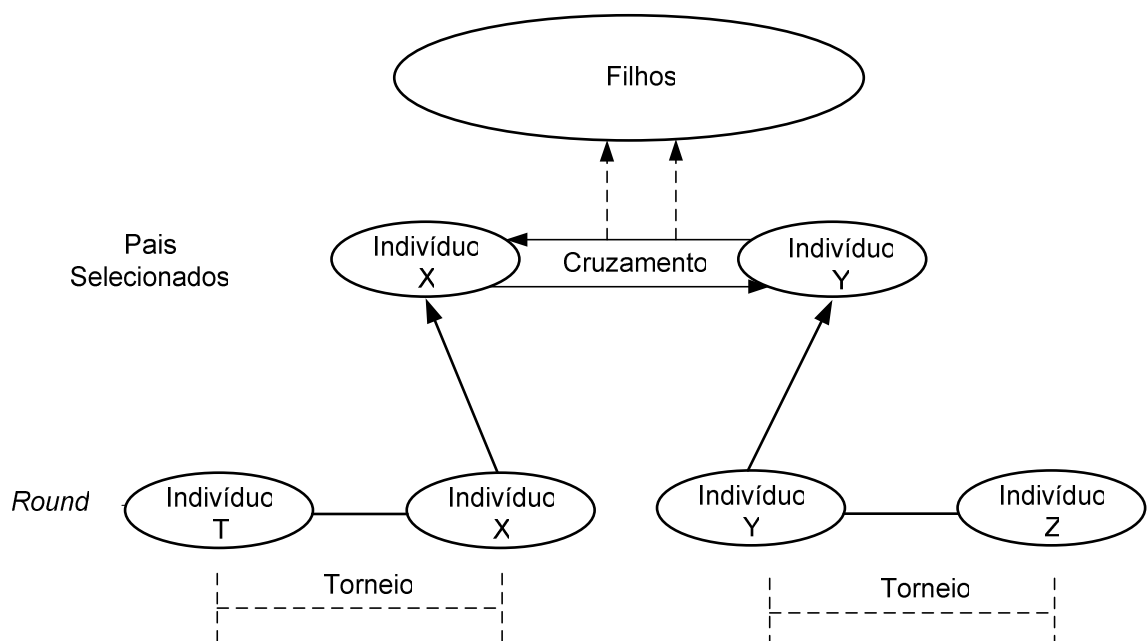


Figura 3.12 – Método do Torneio

3.2.6 Elitismo

Visando a aprimorar os indivíduos da população, a função de elitismo permite que os melhores indivíduos da geração atual participem da geração seguinte. Esta estratégia garante a manutenção dos melhores parâmetros encontrados até a geração atual, permitindo que a região dos melhores valores da geração anterior tenha possibilidade de continuar a ser explorada. Além disso, possibilita que a avaliação do melhor indivíduo, ao longo das gerações, não seja decrescente. A quantidade dos indivíduos selecionados é um parâmetro inicial do AG. Desta forma, em cada geração serão selecionados n indivíduos que participarão como pais da próxima geração.

3.3 Aplicação de Computação Evolutiva em Sistemas de Potência

A computação evolutiva é adequada a problemas de otimização, uma vez que se utiliza do processo de busca orientada baseado no comportamento de sistemas evolutivos. Dentre as áreas da computação evolutiva, os algoritmos genéticos apresentam características apropriadas para uso em sistemas de potência (LAI, 1998). Em aterramentos, a aplicação de algoritmos genéticos foi aplicada no estudo de estratificação do solo (CALIXTO, et al, 2010(1) e CALIXTO, et al, 2010(2)) e no projeto propriamente dito (HE, et al, 2007 e YI-MIN, et al, 2009). Esta técnica permite determinar valores máximos ou mínimos de funções. Tal característica é desejável neste estudo, onde objetiva-se encontrar valores de grandezas elétricas que permitam reproduzir o comportamento de um circuito elétrico com o menor erro possível entre o modelo e o sistema real.

CAPÍTULO 4

COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA NA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS SOB DESCARGA ATMOSFÉRICA

4.1 Introdução

O uso de algoritmo genético como ferramenta para análise de desempenho requer modelos e parâmetros de comparação, pois como esta técnica é caracterizada por um processo de busca evolutiva, há necessidade de comparar valores a fim de direcionar a busca de melhores soluções.

4.2 Desenvolvimento do Modelo de Análise

O objetivo deste trabalho, como já mencionado, é realizar uma transformação que permita a partir dos valores instantâneos V_{Exp} e I_{Exp} da Figura 2.6, obter as variações instantâneas V_D , conhecendo-se as variações instantâneas de I_D .

Os valores instantâneos V_{Exp} e I_{Exp} caracterizam o sistema “aterramento elétrico”, cujos parâmetros podem ser obtidos heurísticamente por meio de algoritmo genético.

Adotar um modelo matemático adequado é vital para acelerar o processo de obtenção de tais parâmetros. Embora o modelo seja puramente matemático, quando se trata de sistemas que se baseiam em fenômenos físicos, uma adoção adequada é procurar um modelo matemático que represente tais fenômenos. No caso em questão, os valores instantâneos de tensão V e corrente I , nos quais o aterramento elétrico é submetido, se relacionam entre si pelos fenômenos físicos envolvidos no mesmo. Através da interpretação física do funcionamento do aterramento elétrico quando submetido às rápidas variações de V_{Exp} e I_{Exp} conclui-se que, entre outros, existem dois fenômenos físicos predominantes (VISACRO, 2007):

- a) efeito indutivo que a corrente elétrica irá enfrentar ao circular pelos condutores enterrados;
- b) efeito resistivo que a corrente elétrica irá enfrentar ao se transferir dos condutores enterrados para o solo.

A predominância destes dois efeitos é ressaltada em GRCEV (2007), RAMAMOORTY et al. (1989).

Resultados teóricos e experimentais mostraram que, conservativamente, o potencial na tomada de terra cresce proporcional ou mais rapidamente em relação à corrente de descarga, mostrando assim os efeitos resistivo e indutivo como predominantes. Esta interpretação física sugere o modelo matemático do aterramento elétrico a ser analisado, como sendo originado do circuito elétrico da Figura 4.1, composto de resistências e indutâncias, de tal forma que os desvios de corrente estão nos ramos resistivos.

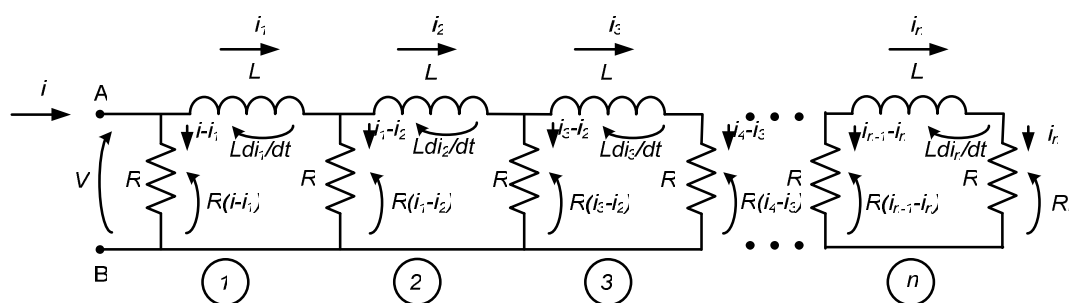


Figura 4.1- Aterramento Elétrico – Representação por Circuito Elétrico

Os modelos matemáticos utilizados na Engenharia, são equacionados a partir dos efeitos físicos básicos ao funcionamento de um equipamento, processo, método, sistema e outros a serem modelados. Porém, há de se distinguir tipos de modelagens em função de seu objetivo, onde neles o equacionamento é estruturado conhecendo-se parâmetros reais, havendo inclusive a possibilidade da obtenção experimental dos mesmos.

Sempre no equacionamento, é razoável que se priorize alguns dos efeitos físicos, considerando o objetivo a ser alcançado. Um exemplo simples é a modelagem matemática de um transformador. No caso do regime permanente senoidal, obtém-se a modelagem através do seu tradicional circuito elétrico. Se o regime não é senoidal, dependendo do conteúdo harmônico se faz necessário implementar o efeito capacitivo, por exemplo, entre espiras.

De qualquer forma, neste tipo de modelagem é equacionado o efeito físico como ele se processa realmente. Assim os parâmetros envolvidos são reais, como é o caso das resistências e reatâncias do exemplo do transformador.

Um outro tipo de modelagem matemática, utiliza a noção de “equivalência”. Neste caso, alguns ou todos os parâmetros são fictícios. Um exemplo clássico é a

modelagem matemática da máquina de indução trifásica em regime permanente senoidal balanceado, que resulta no seu circuito elétrico “equivalente”. Não seria possível obter um circuito elétrico de uma máquina elétrica, pois onde estariam as grandezas mecânicas? Exatamente neste ponto, onde se aplica o princípio da equivalência. No circuito elétrico existe uma resistência, cuja potência dissipada na mesma representa a potência mecânica desenvolvida pelo motor. Por este motivo, é que se considera este circuito elétrico como o equivalente. É importante notar que a resistência, anteriormente mencionada, não tem existência real, ou seja, um parâmetro fictício.

Como se verifica no circuito elétrico da Figura 4.1, seu modelo matemático pode ser classificado no segundo tipo, ou seja, modelagem matemática que utiliza a noção de equivalência.

É importante lembrar que os valores instantâneos da tensão $V=V_{Exp}$ e corrente $I=I_{Exp}$ aplicados no circuito da Figura 4.1, foram obtidos diretamente do aterramento elétrico a ser analisado, através do pulso de tensão aplicado, Figura 2.6. Ao ser possível obter os parâmetros do circuito elétrico da Figura 4.1, ou seja, calcular o número de setores em π e os valores das resistências e indutâncias, considerando os valores instantâneos da tensão $V=V_{Exp}$ aplicados entre A e B e da corrente $I=I_{Exp}$ resultante, pode-se afirmar que o referido circuito é o “circuito elétrico equivalente” ao aterramento elétrico analisado.

O modelo matemático do circuito, em estudo, utiliza como parâmetros resistência e indutância. Entretanto, tais parâmetros não são reais do aterramento elétrico em questão. Isto pode ser explicado, pois estes parâmetros não foram obtidos diretamente da estrutura do aterramento. Para obtê-los, basta conhecer os valores instantâneos V e I , e não a geometria e dimensões do aterramento, ou seja, seu projeto. Outra explicação vem do fato da possibilidade de existir, por exemplo, dois aterramentos com projetos diferentes, porém resultando nas medições os mesmos valores instantâneos de $V=V_{Exp}$ e $I=I_{Exp}$. Assim, o circuito elétrico equivalente da Figura 4.1 será o mesmo para ambos os aterramentos. Desta forma, entende-se que os parâmetros do circuito elétrico não representam os reais parâmetros de cada aterramento.

Do exposto, pode-se concluir que, de posse dos valores instantâneos da tensão $V=V_{Exp}$ e corrente $I=I_{Exp}$ obtidos por medição no aterramento elétrico, ao ser possível

obter o circuito elétrico através dos parâmetros de número de setores π , indutância e resistência, tem-se a modelagem matemática do aterramento representado pelo seu circuito elétrico equivalente, Figura 4.1.

O algoritmo genético possibilita a obtenção dos referidos parâmetros, inicialmente gerando uma população de cromossomos que contém valores preliminares do número N de setores π , considerando todas as indutâncias e resistências iguais, L e R , respectivamente. Cada cromossomo contém valores de N , R e L , permitindo obter valores instantâneos da tensão V entre os terminais A e B , correspondentes aos valores instantâneos da corrente $I=I_{Exp}$. Com os valores instantâneos de V , faz-se uma comparação com os correspondentes valores instantâneos de V_{Exp} . Os cromossomos que apresentam melhores resultados nas comparações, têm maior probabilidade de serem utilizados como “pais” da próxima geração. Desta forma, ocorrem novas gerações com a população de cromossomos sofrendo alterações, até que as referidas comparações possuam erros satisfatórios, ou outros critérios de avaliação sejam aplicados. Assim, obtêm-se os parâmetros do circuito da Figura 4.1, que representa o aterramento elétrico quando submetido a $V=V_{Exp}$ e $I=I_{Exp}$. Considera-se como Fase 1 o processo até neste ponto. De posse dos parâmetros N , R e L , aplicando-se os valores instantâneos da corrente de descarga atmosférica $I=I_D$, obtém-se pelo circuito da Figura 4.1 os valores instantâneos da tensão de descarga $V=V_D$. Esta última característica avalia o desempenho do aterramento elétrico sob descarga atmosférica. Esta segunda parte do processo é considerada como Fase 2.

Todos estes procedimentos estão implementados em um *software* denominado de Sistema de Avaliação de Desempenho de Aterramentos (SADA). Este aplicativo usa funções associadas ao algoritmo genético, conforme se explicita a seguir.

4.3 Características dos Sinais Experimentais

Os sinais experimentais utilizados no SADA foram obtidos por MEDEIROS (1998), são discretos no tempo com intervalo de 2×10^{-8} s entre os valores e apresentam ruídos. Visando evitar o processamento de ruídos, foi aplicado filtro *Butterworth* de quinta ordem com frequência de corte de 0,02Hz (MALVINO e BATES 2007). Tal filtro é adequado por não apresentar *ripple* e oscilações no início e término do sinal, com resposta de frequência plana tanto quanto possível (NILSSON e RIEDEL, 2008)

e (SEDRA e SMITH, 2000). No Capítulo 5, são apresentados os sinais experimentais com e sem ruídos.

4.4 Determinação da Tensão entre A e B no Circuito da Figura 4.1

Isolando o Setor 2 do circuito da Figura 4.1 e convertendo-o genericamente em J, tem-se a Figura 4.2, onde a Equação 4.1 pode ser escrita.

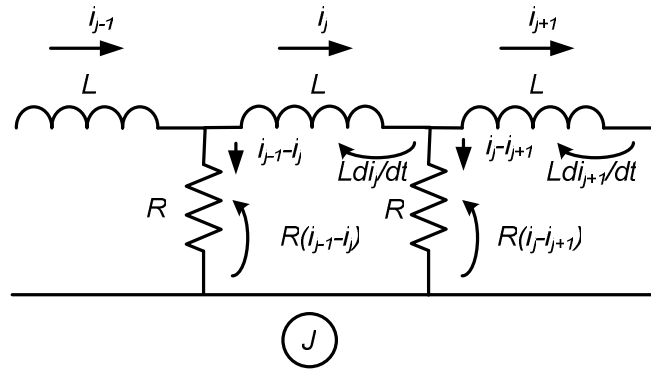


Figura 4.2 – Aterramento Elétrico – Representação por Circuito Elétrico (Setor J)

Como:

$$R(i_{j-1} - i_j) = R(i_j - i_{j+1}) + L \frac{di_j}{dt} \quad (4.1)$$

Para $j=1$ temos a 1ª malha:

$$R(i - i_1) = R(i_1 - i_2) + L \frac{di_1}{dt} \quad (4.2)$$

Para $j=n$ tem-se a n -ésima malha:

$$R(i_{n-1} - i_n) = Ri_n + L \frac{di_n}{dt} \quad (4.3)$$

Fazendo:

$$a = \frac{R}{L} \quad (4.4)$$

Aplicando 4.4 em 4.1, para $2 \leq j \leq n-1$:

$$\frac{di_j}{dt} = ai_{j-1} - 2ai_j + ai_{j+1} \quad (4.5)$$

Aplicando 4.4 em 4.2:

$$\frac{di_1}{dt} = ai - 2ai_1 + ai_2 \quad (4.6)$$

Aplicando 4.4 em 4.3:

$$\frac{di_n}{dt} = ai_{n-1} - 2ai_n \quad (4.7)$$

Representando em forma matricial:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ i_{n-2} \\ i_{n-1} \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ai \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + a \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ i_{n-2} \\ i_{n-1} \\ i_n \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Conhecendo-se i e a , tendo nulos os valores iniciais das variáveis de estado, as correntes são obtidas por meio de resolução de equações diferenciais ordinárias. Nesse procedimento, utiliza-se o Método de Runge-Kutta com ajuste de erro (DORMAND e PRINCE, 1980) e (HAIRER, NORSETT e WANNER, 1993).

A tensão entre os terminais A e B da Figura 4.1 pode ser obtida em:

$$V = R_1(i - i_1) \quad (4.9)$$

Na Fase 1, é encontrada a tensão:

$$V = R_1(I_{Exp} - I_1) \quad (4.10)$$

Na Fase 2, ocorre a determinação da tensão de descarga V_D :

$$V_D = R_1(I_D - I_1) \quad (4.11)$$

4.5 Ajuste de Tempo

A aplicação do método de Runge-Kutta, com ajuste de erro, ocasiona variação da quantidade de pontos processados e alterações dos intervalos de tempo. Para equalização do tempo, a função de interpolação *spline* cúbica (GRIFFITHS e SMITH, 1991) é utilizada para ajustar os valores para os mesmos intervalos de tempos.

4.6 Características do Algoritmo Genético

O algoritmo genético utilizado possui cromossomo real que contém dados de indutância, resistência e número de seções PI-RL. Após várias simulações, verificou-se que o método *Wright* apresentou melhores resultados, e, por este motivo foi usado como técnica de cruzamento, e para a seleção foi aplicado o método da roleta. Em seguida, foram realizadas simulações variando os parâmetros do AG. Novamente, os melhores resultados foram obtidos com os valores apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros do Algoritmo Genético

Crossover	Mutação	Elitismo	População	Gerações
0,9	0,6	20%	10	40

O cromossomo utilizado possui valores de resistência, indutância e número de setores π , o qual é apresentado na Figura 4.3.

501.8954	6,0493x10 ⁻⁶	22
Resistência (Ω)	Indutância (H)	Número de Setores π

F

Figura 4.3 – Cromossomo de Simulação

4.7 Cálculo e Avaliação da Aptidão

O processo de avaliação da aptidão do indivíduo consiste na comparação entre a tensão simulada V_S obtida através dos dados do indivíduo e a tensão experimental V_{Exp} (tensão de referência). O erro médio quadrático (COSTA, 1981) é utilizado como parâmetro da aptidão, uma vez que é possível quantificar o erro verdadeiro entre V_{Exp} e V_S . São utilizados 2.000 pontos de sinais para obter o erro médio quadrático do indivíduo. Este parâmetro de avaliação é definido como:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n}} \quad (4.12)$$

Onde:

m : é o erro médio quadrático

n : é o número de pontos do sinal

ϵ : é a diferença entre V_{Exp} e V_S

4.8 Diagrama Funcional

Para melhor detalhamento do SADA, é apresentado o seu diagrama funcional visto na Figura 4.4, onde na Fase 1 ocorre a filtragem e ajuste dos sinais experimentais I_{Exp} e V_{Exp} e as gerações do algoritmo genético representado pelo procedimento de laço. A Fase 2 ocorre após serem atingidos o número de gerações ou a meta de erro médio quadrático. Nesta fase, é encontrada a tensão de descarga V_D a partir dos parâmetros N , R e L determinados na Fase 1 e da corrente de descarga I_D escolhida.

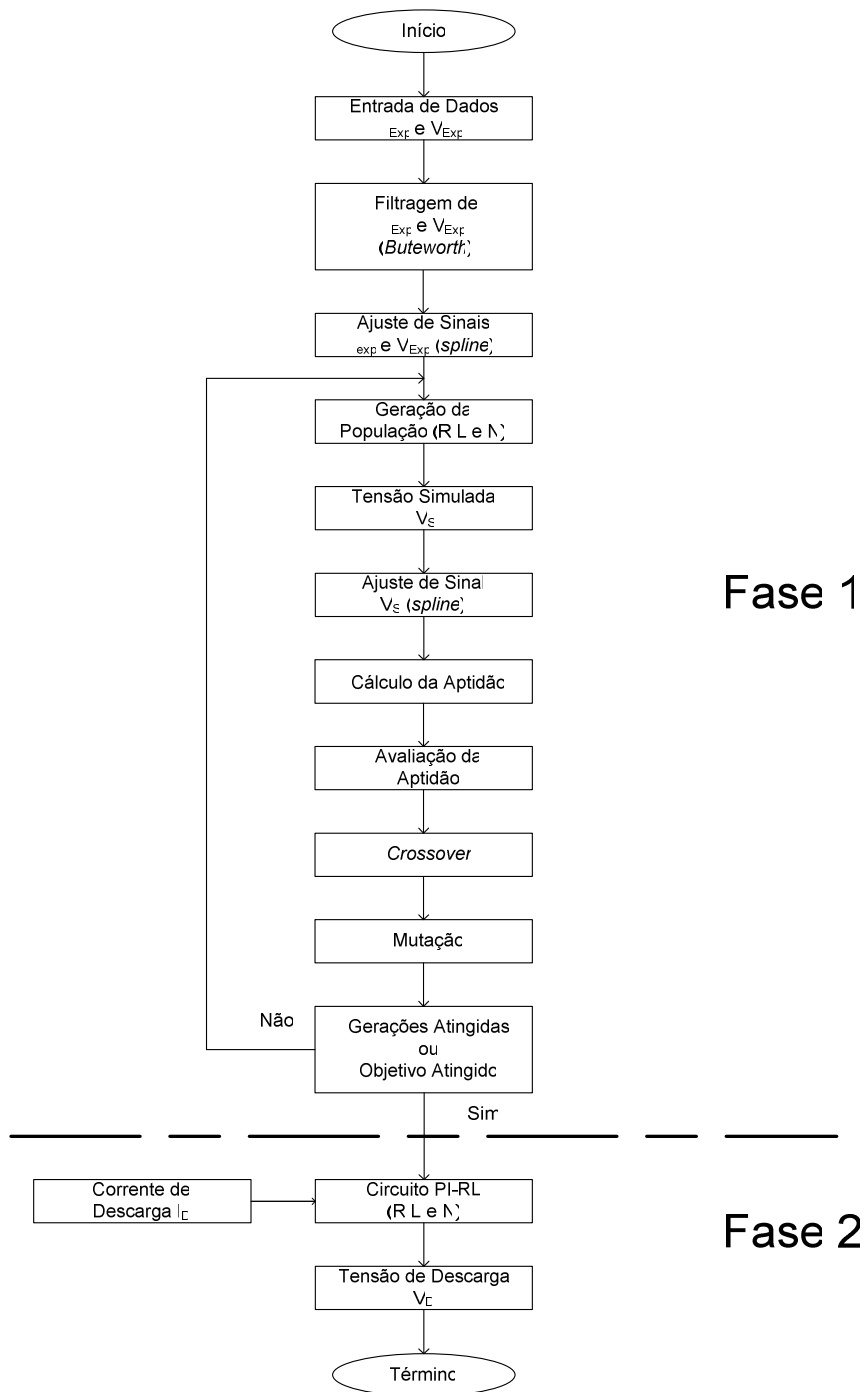


Figura 4.4 – Diagrama Funcional do SADA

Assim, neste Capítulo foram apresentadas as considerações para o desenvolvimento do modelo de análise do comportamento de um aterramento sob condição de descarga atmosférica, utilizando métodos heurísticos. Foi proposto o Sistema de Avaliação de Desempenho de Aterramentos (SADA) e suas

características. Para funcionamento do mesmo, são necessários sinais experimentais os quais serão apresentados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

O objetivo dos ensaios experimentais é obter valores instantâneos de tensão e corrente no aterramento que se deseja avaliar seu desempenho. Para tanto, utilizando-se uma área bastante extensa e livre de interferências eletromagnéticas, foi montado o sistema ilustrado na Figura 5.1.

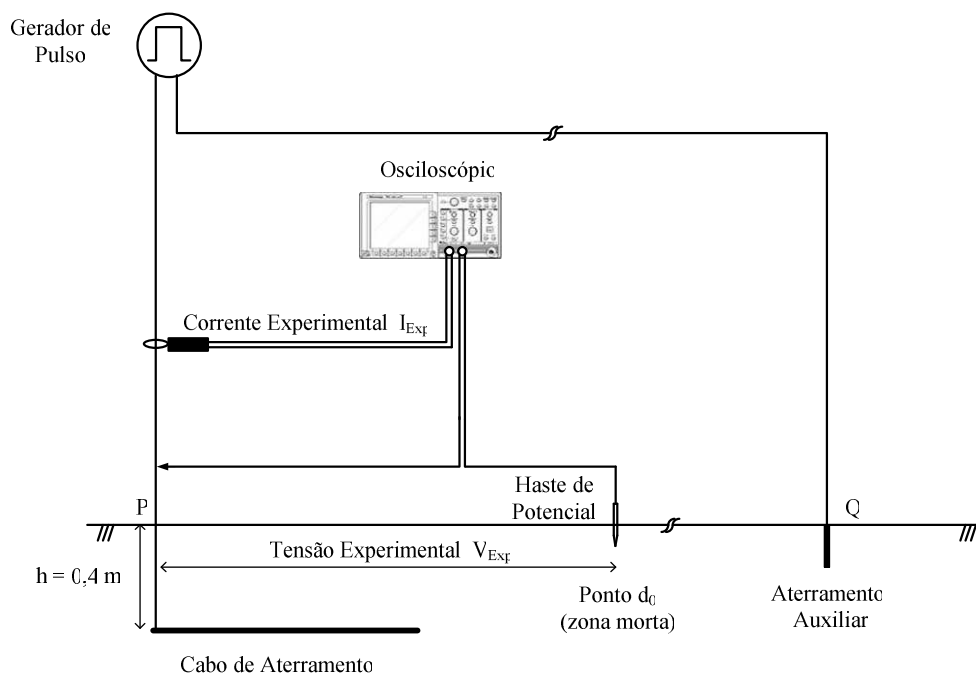


Figura 5.1 – Esquema Experimental de Medidas de Aterramento

A Figura 5.1 mostra um gerador de pulso, onde um dos seus terminais está ligado na tomada de terra P do aterramento que se deseja avaliar seu desempenho. O outro terminal está conectado na tomada de terra Q do aterramento auxiliar. Inicialmente, para locar o aterramento auxiliar, foi utilizado o método tradicional de medição de resistência de aterramento onde se determina a zona neutra, ou seja, a área de influência de ambos os aterramentos.

Para medir os valores instantâneos da corrente experimental I_{exp} , utiliza-se um dos canais do osciloscópio e um sensor de corrente. O outro canal do osciloscópio

mede diretamente a tensão entre a tomada de terra P e um ponto na superfície do solo locado na zona neutra. Esta tensão, denominada tensão experimental V_{Exp} , corresponde à resultante no aterramento a ser analisado, diante do pulso de tensão aplicado pelo gerador.

Este procedimento de medição e os resultados obtidos para diversos casos a serem adiante apresentados, foram realizados por MEDEIROS (1998).

5.2 Valores Experimentais

Os sinais de tensão e corrente experimentais foram obtidos para vários comprimentos do cabo horizontal, mantendo-se fixa a tomada de terra P da Figura 5.1, foram lançados cabos de comprimentos, conforme a Tabela 5.1, onde são identificados os casos experimentais.

Tabela 5.1 – Casos Experimentais

Caso	Comprimento(m)
1	20
2	30
3	40
4	50
5	60
6	70
7	80
8	100

As Figuras 5.2a a 5.17a apresentam as tensões e correntes experimentais correspondentes a cada comprimento de cabo. Como comentado no Item 4.3, é necessário filtrar os sinais experimentais os quais são apresentados nas Figuras 5.2b a 5.17b, sendo que o tempo inicial foi considerado no instante zero.

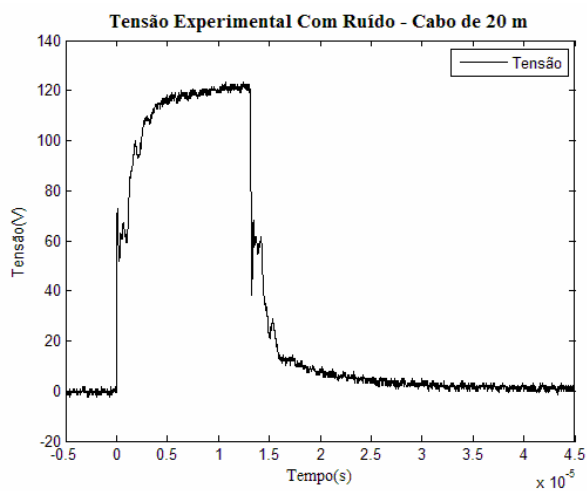


Figura 5.2a – Tensão Experimental Com Ruído – cabo de 20 m

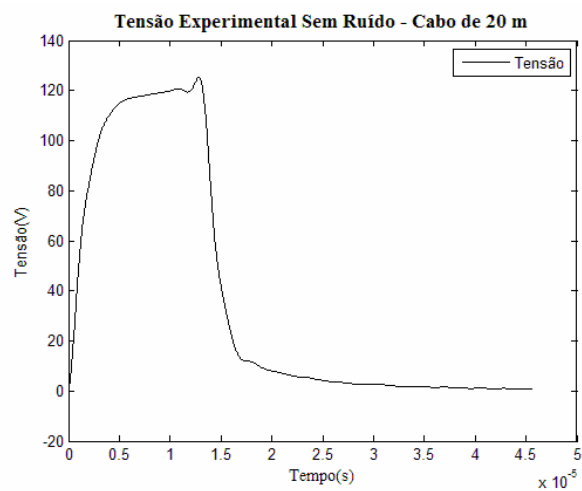


Figura 5.2b – Tensão Experimental Sem Ruído – cabo de 20 m

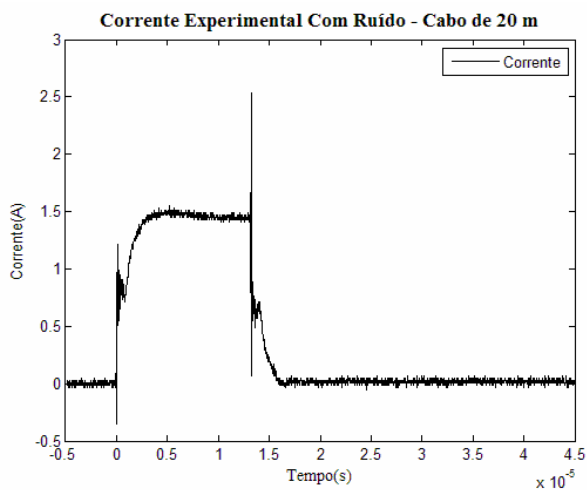


Figura 5.3a – Corrente Experimental Com Ruído – cabo de 20 m

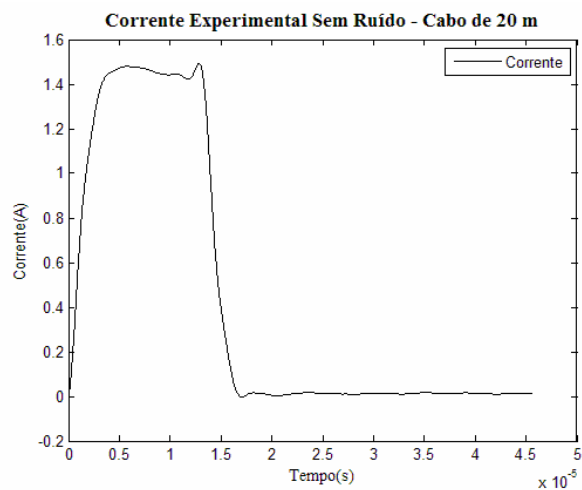


Figura 5.3b – Corrente Experimental Sem Ruído – cabo de 20 m

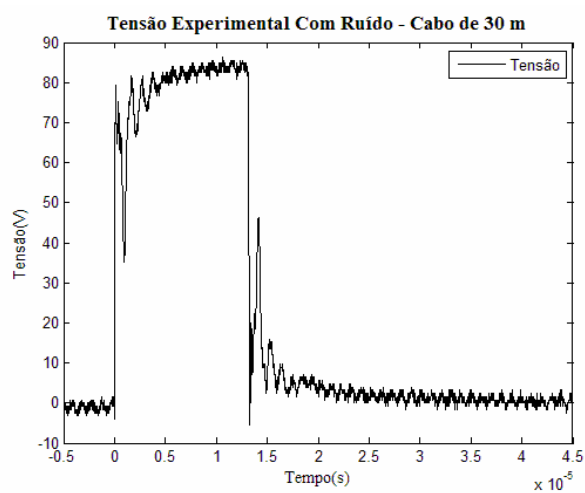


Figura 5.4a – Tensão Experimental Com Ruído – cabo de 30 m

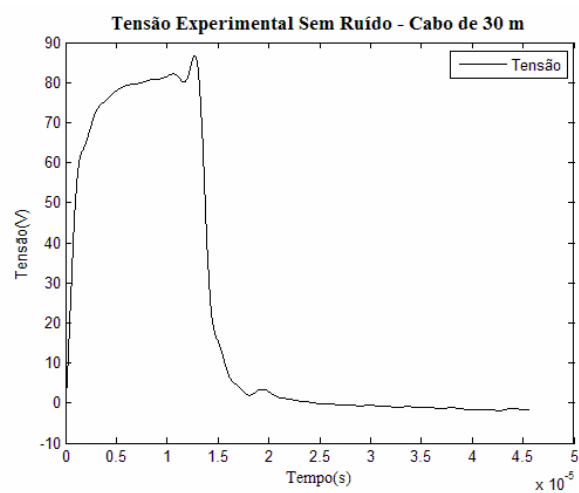


Figura 5.4b – Tensão Experimental Sem Ruído – cabo de 30 m

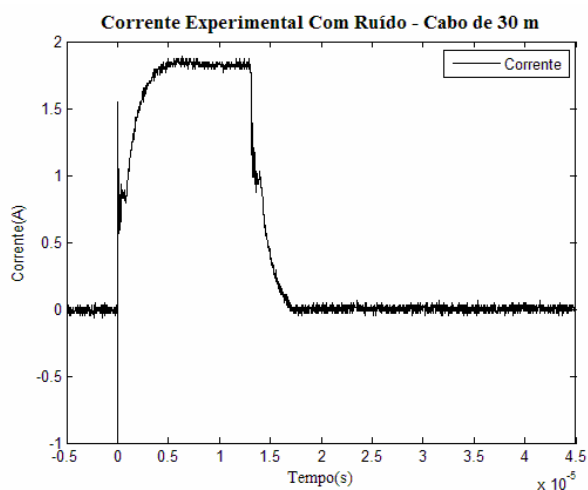


Figura 5.5a – Corrente Experimental Com Ruído – cabo de 30 m

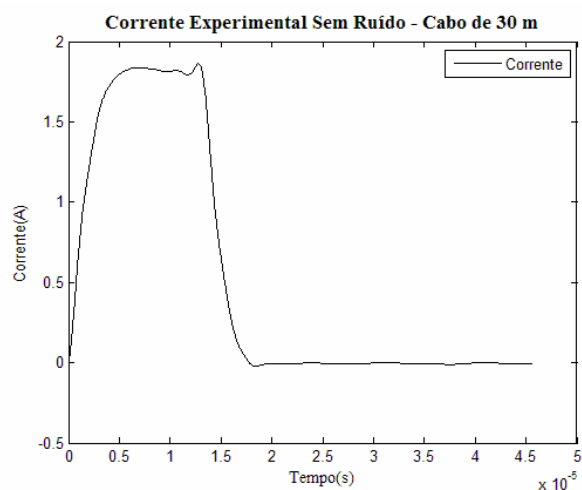


Figura 5.5b – Corrente Experimental Sem Ruído – cabo de 30 m

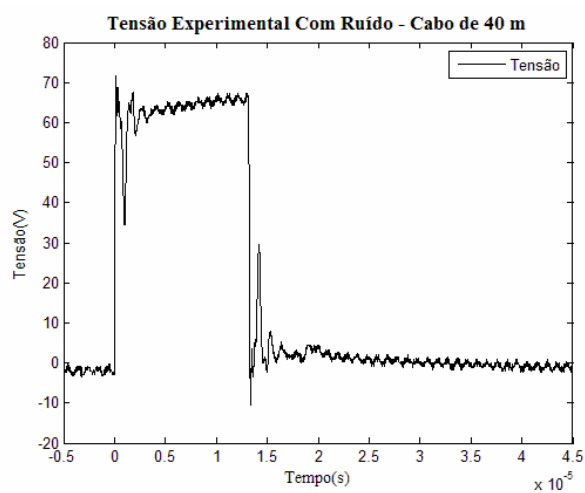


Figura 5.6a – Tensão Experimental Com Ruído – cabo de 40 m

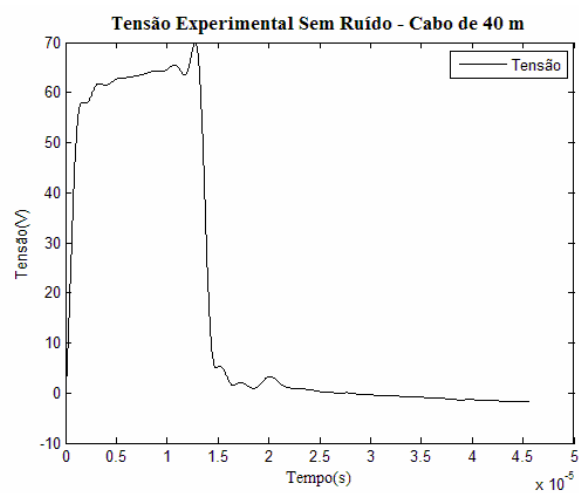


Figura 5.6b – Tensão Experimental Sem Ruído – cabo de 40 m

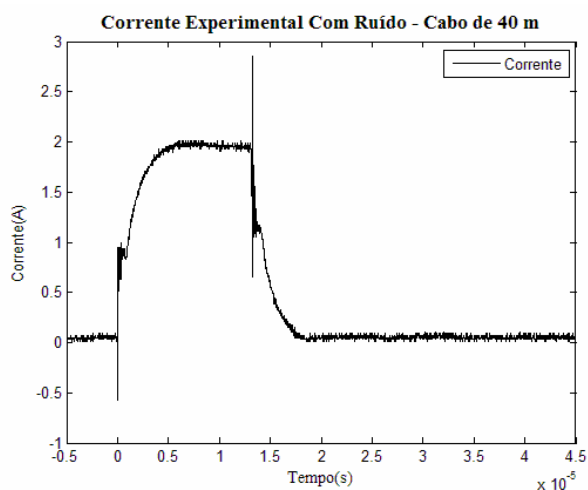


Figura 5.7a – Corrente Experimental Com Ruído – cabo de 40 m

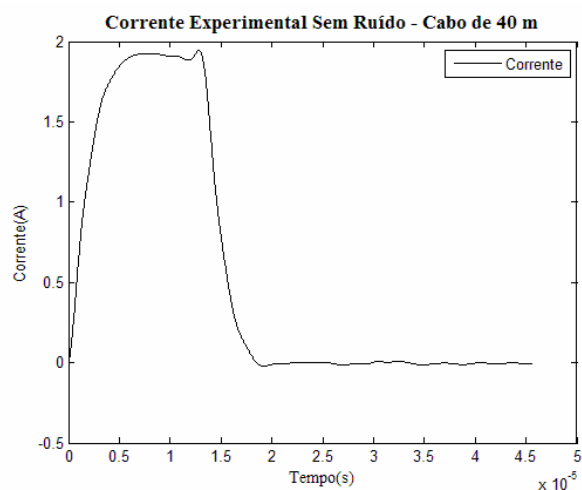


Figura 5.7b – Corrente Experimental Sem Ruído – cabo de 40 m

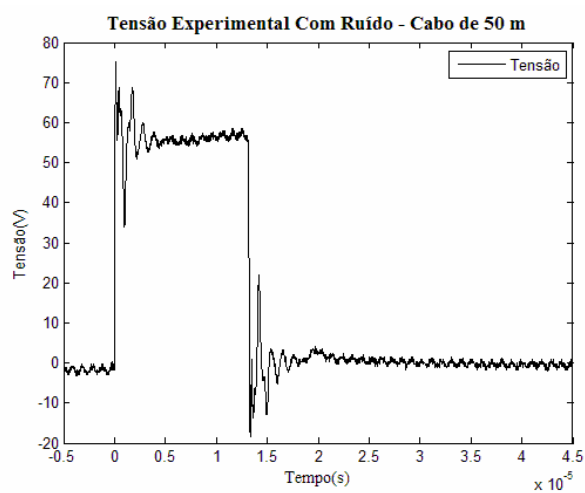


Figura 5.8a – Tensão Experimental Com Ruído – cabo de 50 m

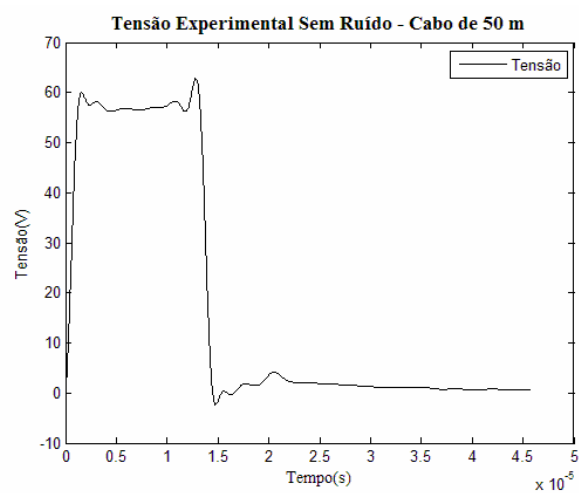


Figura 5.8b – Tensão Experimental Sem Ruído – cabo de 50 m

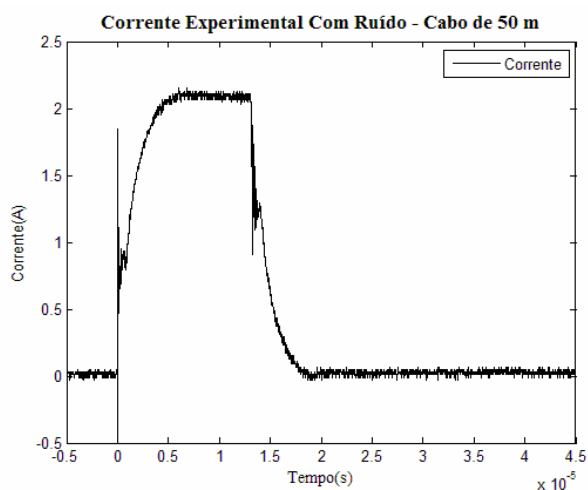


Figura 5.9a – Corrente Experimental Com Ruído – cabo de 50 m

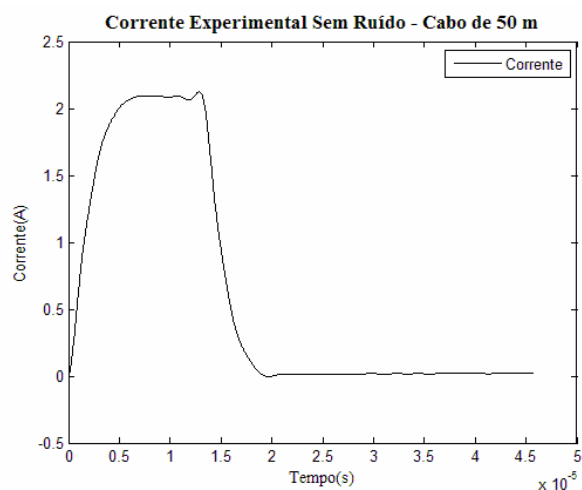


Figura 5.9b – Corrente Experimental Sem Ruído – cabo de 50 m

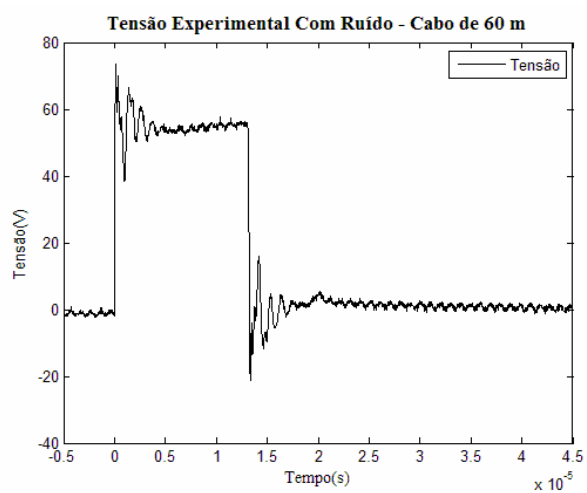


Figura 5.10a – Tensão Experimental Com Ruído – cabo de 60 m

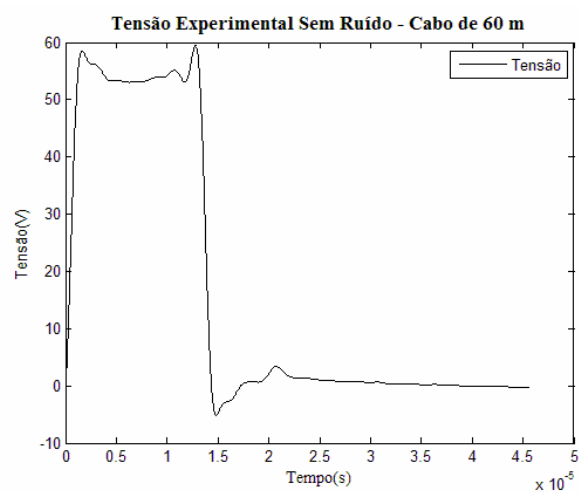


Figura 5.10b – Tensão Experimental Sem Ruído – cabo de 60 m

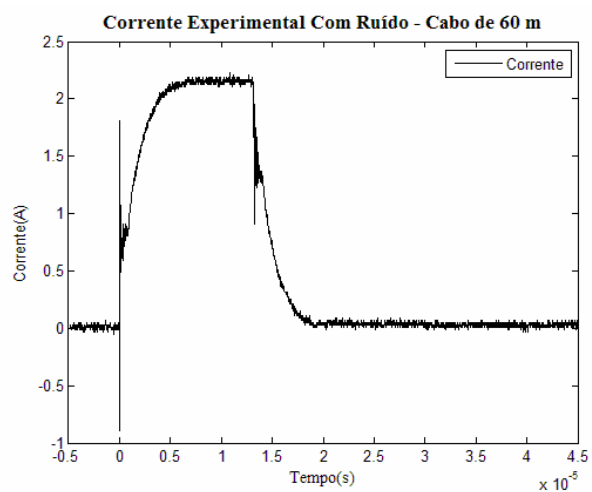


Figura 5.11a – Corrente Experimental Com Ruído – cabo de 60 m

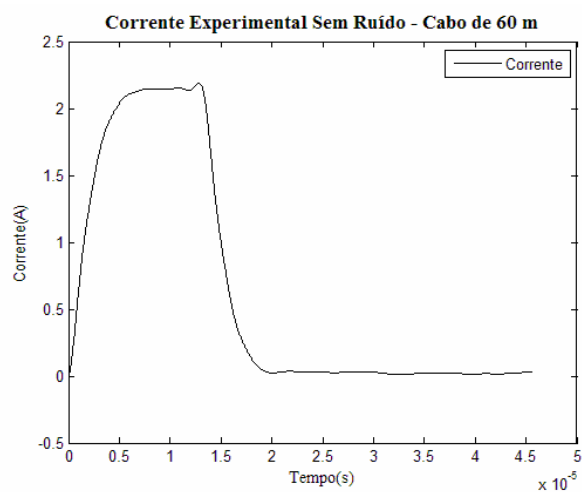


Figura 5.11b – Corrente Experimental Sem Ruído – cabo de 60 m

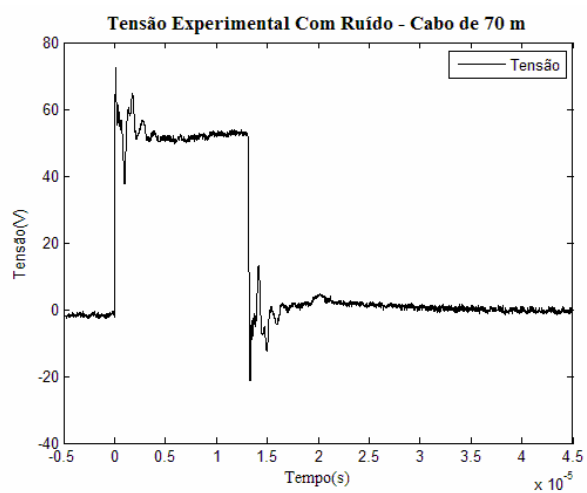


Figura 5.12a – Tensão Experimental Com Ruído – cabo de 70 m

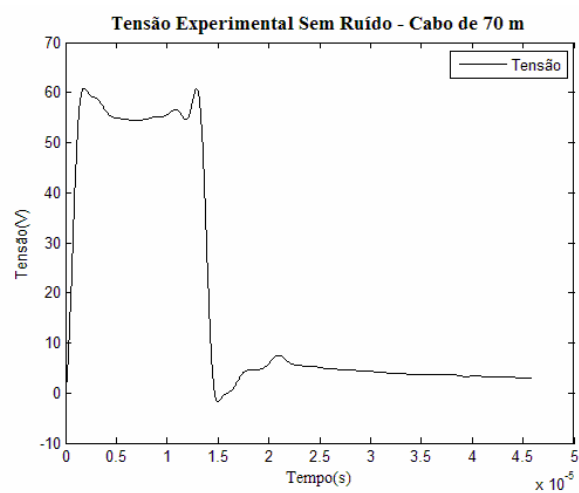


Figura 5.12b – Tensão Experimental Sem Ruído – cabo de 70 m

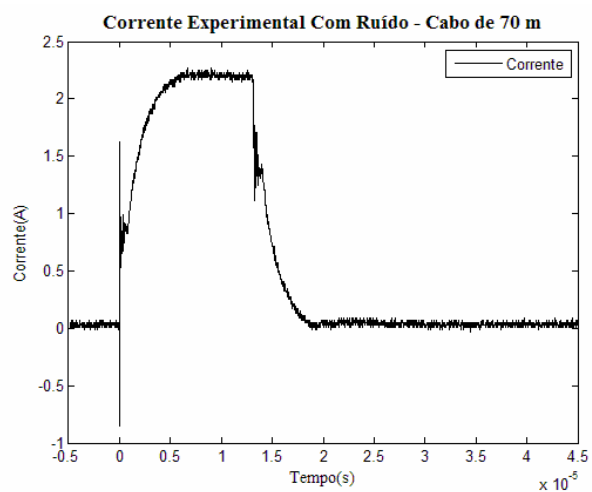


Figura 5.13a – Corrente Experimental Com Ruído – cabo de 70 m

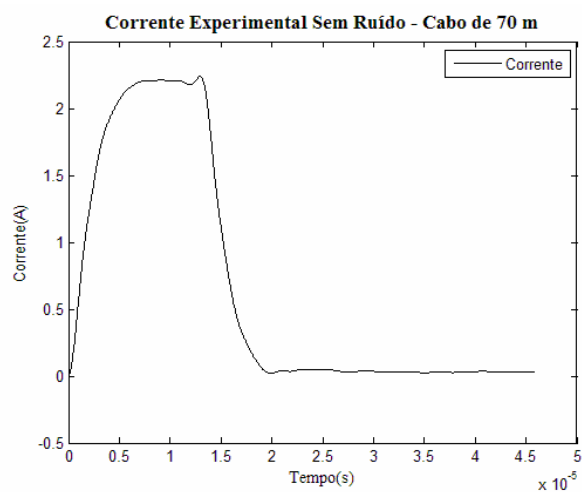


Figura 5.13b – Corrente Experimental Sem Ruído – cabo de 70 m

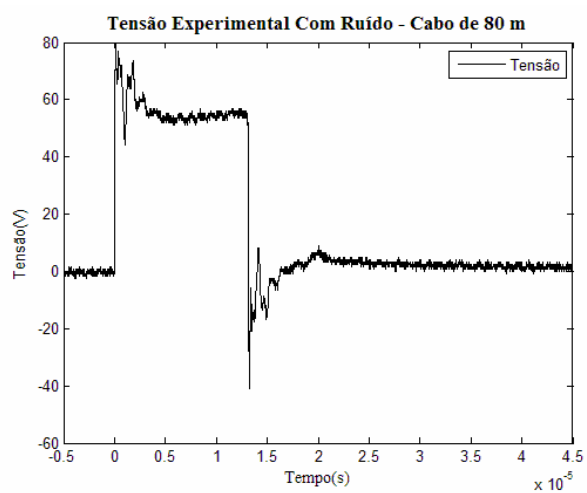


Figura 5.14a – Tensão Experimental Com Ruído – cabo de 80 m

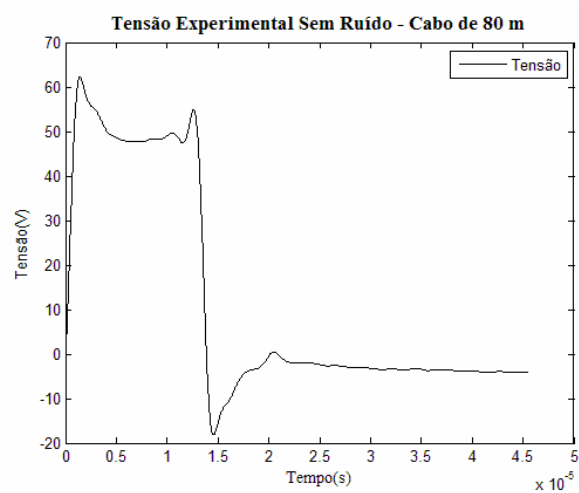


Figura 5.14b – Tensão Experimental Sem Ruído – cabo de 80 m

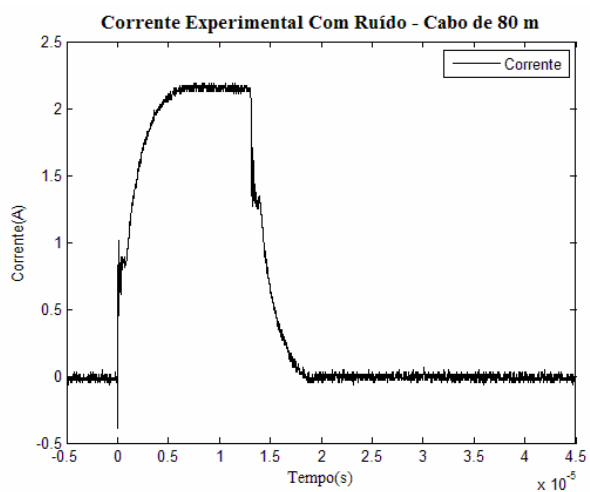


Figura 5.15a – Corrente Experimental Com Ruído – cabo de 80 m

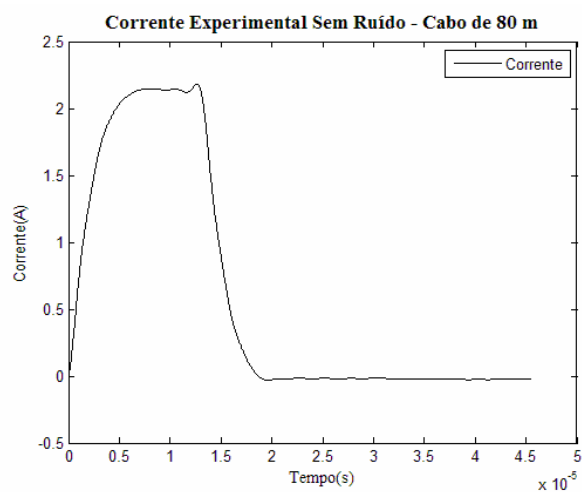


Figura 5.15b – Corrente Experimental Sem Ruído – cabo de 80 m

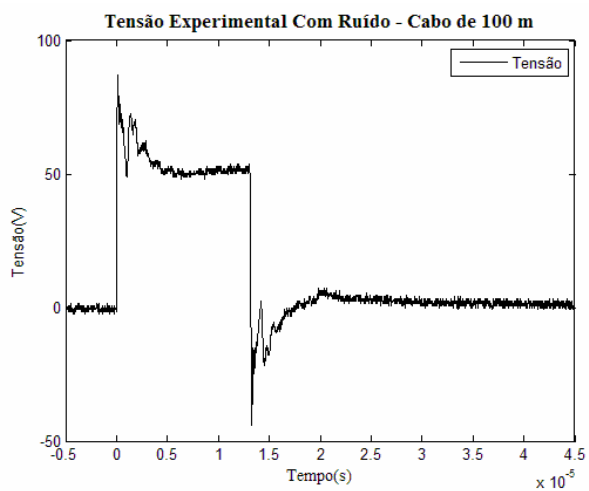


Figura 5.16a – Tensão Experimental Com Ruído – cabo de 100 m

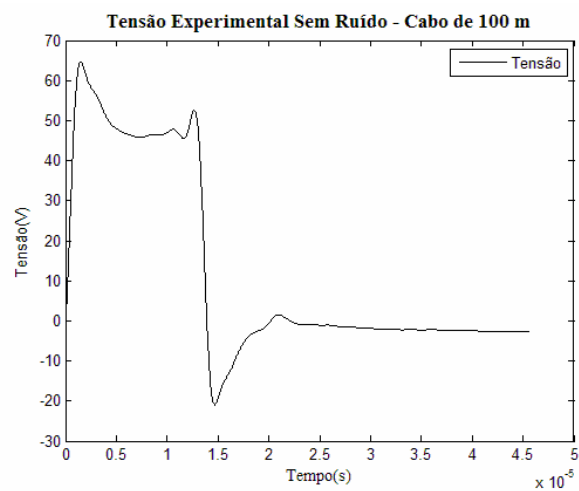


Figura 5.16b – Tensão Experimental Sem Ruído – cabo de 100 m

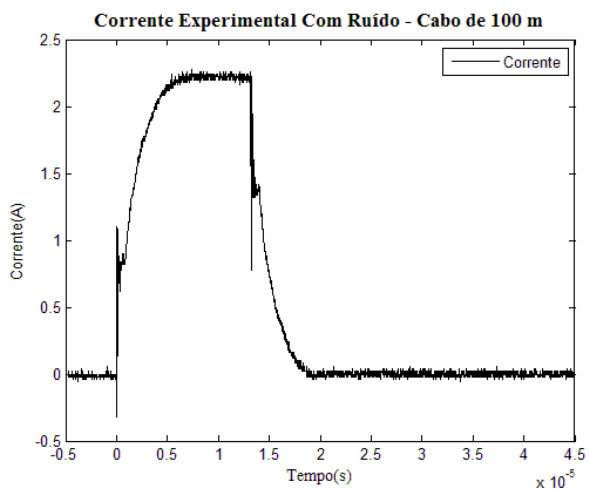


Figura 5.17a – Corrente Experimental Com Ruído – cabo de 100 m

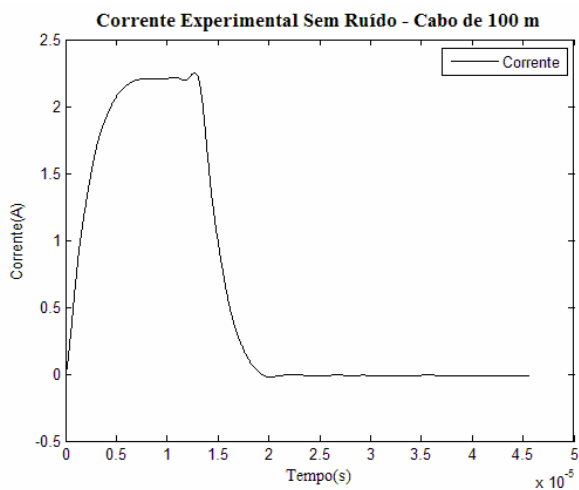


Figura 5.17b – Corrente Experimental Sem Ruído – cabo de 100 m

Portanto, este Capítulo apresentou os sinais experimentais com e sem ruídos, sendo que os sinais sem ruídos serão utilizados como dados de entrada para o SADA. Este *software* tem a função de simular a tensão de descarga desenvolvida em um aterramento sob ação de descarga atmosférica.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÕES

6.1 Introdução

Este Capítulo apresenta os resultados das simulações dos casos experimentais utilizando o SADA, efetuadas com as tensões e correntes experimentais filtradas, as quais foram apresentadas no Capítulo 5. Os parâmetros e as características do SADA foram descritos no Capítulo 4.

6.2 Resultados Gerais

Visando verificar a resposta do SADA nos sinais experimentais disponíveis, foram realizadas 20 simulações para cada comprimento de cabo. Para análise conjunta, foram agrupados dados de tensão de descarga e evolução do erro. Os resultados de tensão de descarga são apresentados na Figura 6.1. Como visto no Item 4.7, a análise de aptidão do algoritmo genético é feita a partir do erro médio quadrático. Portanto, a Figura 6.2 ilustra a evolução do erro para cada simulação vista na Figura 6.1.

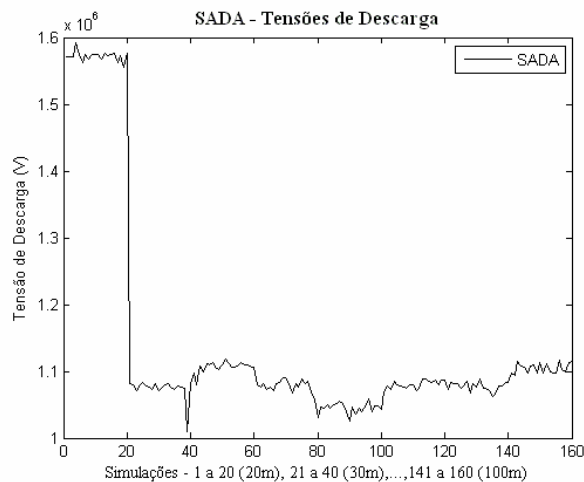


Figura 6.1 – SADA – Tensões de Descarga

Os resultados da Figura 6.1 indicam que para um dado comprimento de cabo, os valores de tensão de descarga estão próximos entre si, mostrando a estabilidade das respostas.

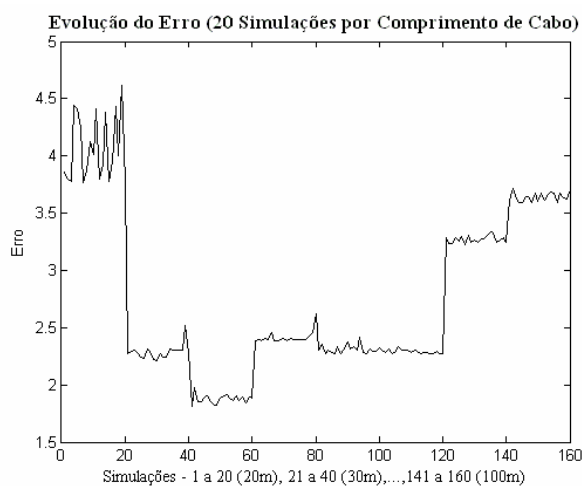


Figura 6.2 – SADA – Evolução do Erro

O erro médio quadrático apresentado na Figura 6.2, mostra valores próximos para cabos a partir de 30 m de comprimento. Nas simulações realizadas em cabos de 20 m, este parâmetro apresentou oscilações entre 3,8 e 4,5.

6.3 Resultados Específicos

Para análise do SADA, em relação a cada comprimento de cabo específico, foram utilizadas 20 simulações. Como critério de seleção dos dados de simulação em cada comprimento de cabo, foi utilizado o resultado de menor erro médio quadrático. Nas Figuras de tensões de descarga, foram incluídas curvas referentes às correntes de descargas. Os valores delas foram ajustados para o valor máximo das tensões de descargas, visando avaliar características de tensões. As Figuras 6.3 a 6.10, itens a,b,c e d apresentam características de simulação para cada comprimento de cabo. Elas estão representadas com seus respectivos itens, da seguinte forma:

- a) “a” tensões de descarga para correntes de descargas de 20 kA;
- b) “b” correntes em situação de descarga atmosférica;
- c) “c” determinação de parâmetros, tendo V_{Exp} como referência;
- d) “d” evolução do erro médio quadrático.

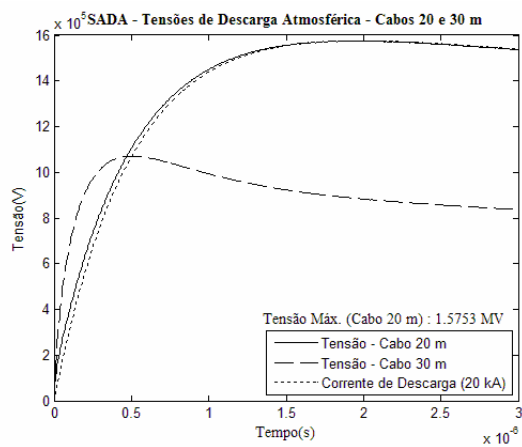


Figura 6.3a – SADA – Tensões de Descarga
– cabos de 20 e 30 m

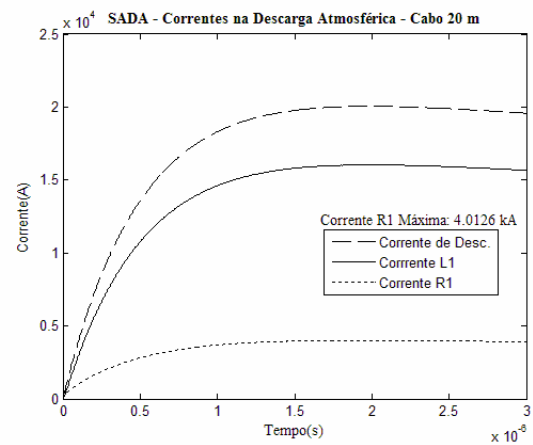


Figura 6.3b – SADA – Correntes na Descarga
– cabo de 20 m

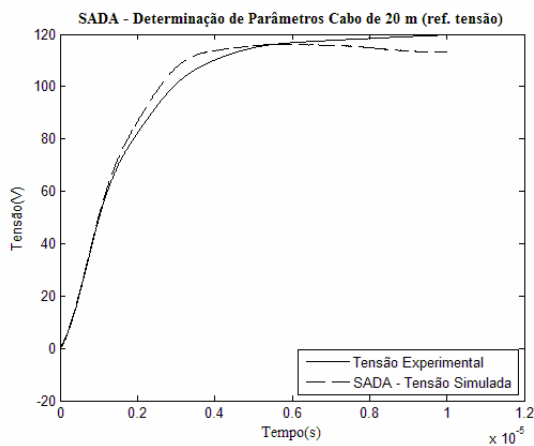


Figura 6.3c – SADA – Determinação de
Parâmetros – cabo de 20 m (ref. tensão)

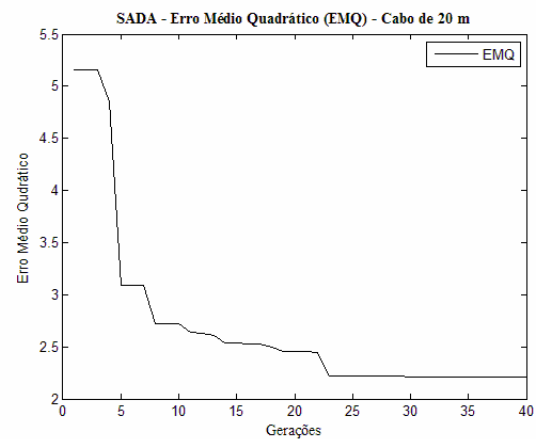


Figura 6.3d – SADA – Erro Médio Quadrático
– cabo de 20 m

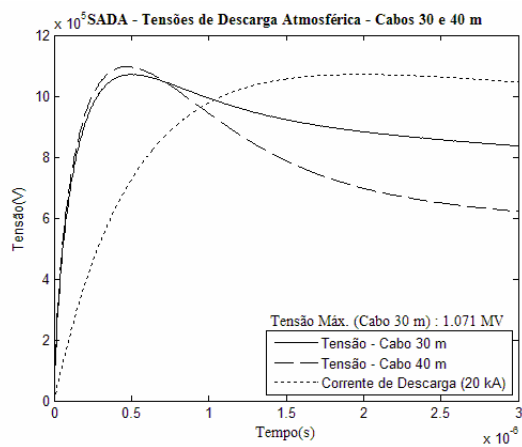


Figura 6.4a – SADA – Tensões de Descarga
– cabos de 30 e 40 m

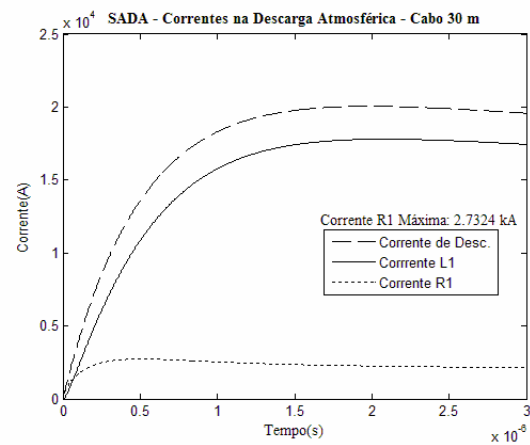


Figura 6.4b – SADA – Correntes na Descarga
– cabo de 30 m

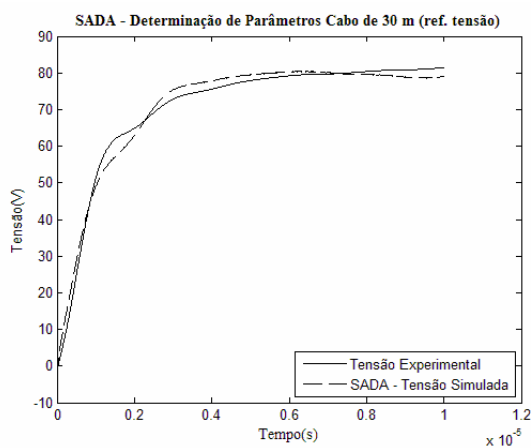


Figura 6.4c – SADA – Determinação de
Parâmetros – cabo de 30 m (ref. tensão)

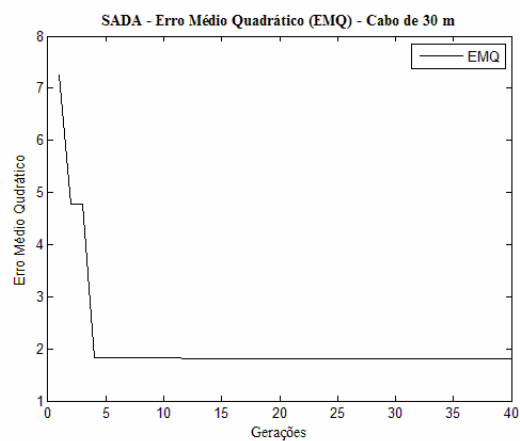


Figura 6.4d – SADA – Erro Médio Quadrático
– cabo de 30 m

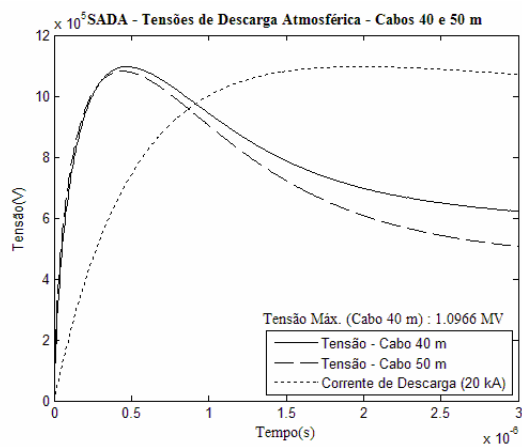


Figura 6.5a – SADA – Tensões de Descarga
– cabos de 40 e 50 m

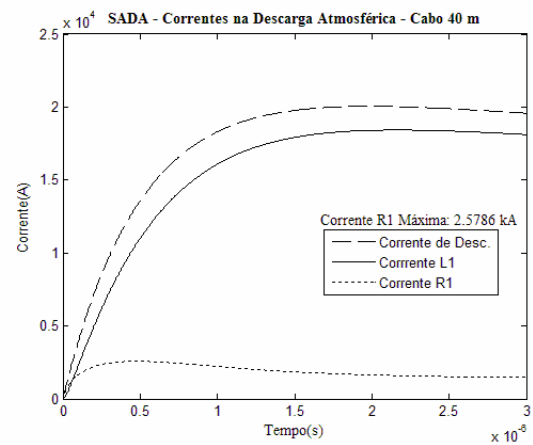


Figura 6.5b – SADA – Correntes na Descarga
– cabo de 40 m

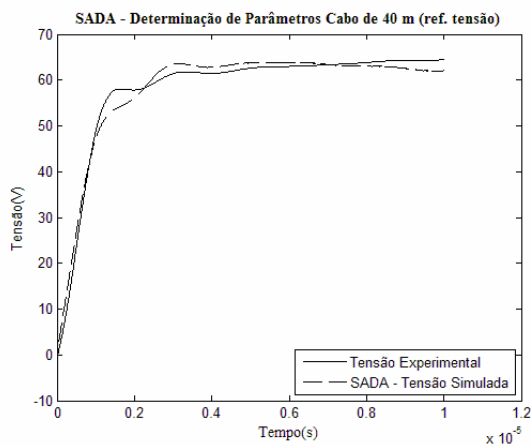


Figura 6.5c – SADA – Determinação de
Parâmetros – cabo de 40 m (ref. tensão)

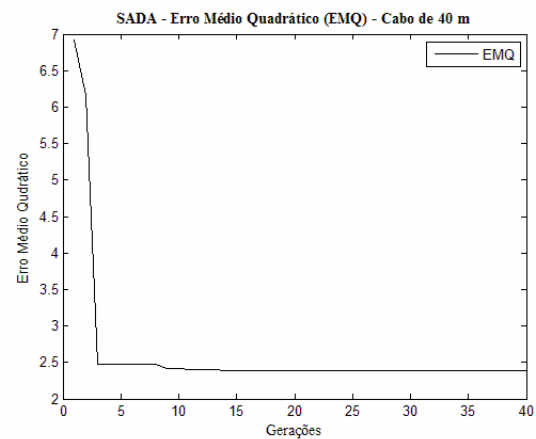


Figura 6.5d – SADA – Erro Médio Quadrático
– cabo de 40 m

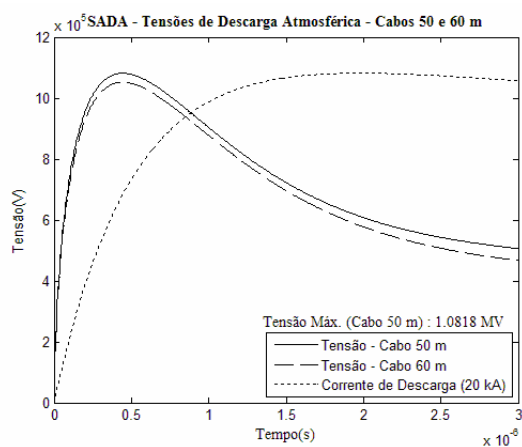


Figura 6.6a – SADA – Tensões de Descarga
– cabos de 50 e 60 m

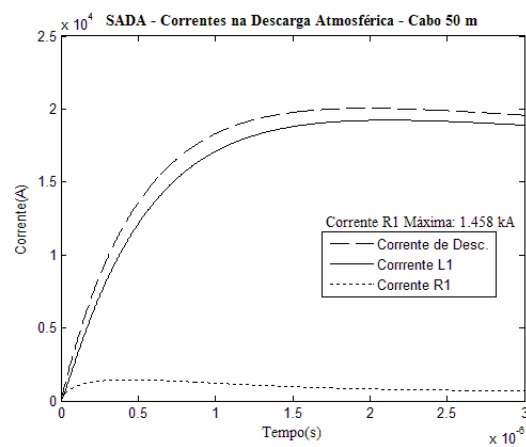


Figura 6.6b – SADA – Correntes na Descarga
– cabo de 50 m

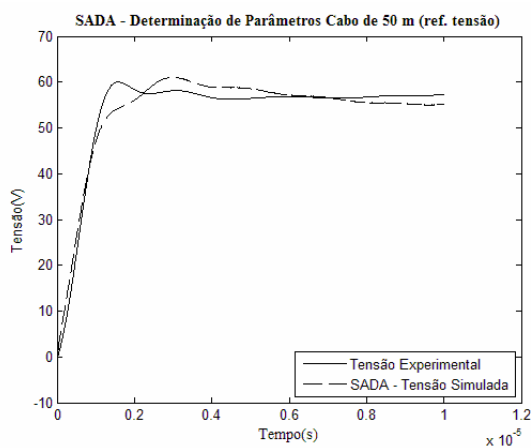


Figura 6.6c – SADA – Determinação de
Parâmetros – cabo de 50 m (ref. tensão)

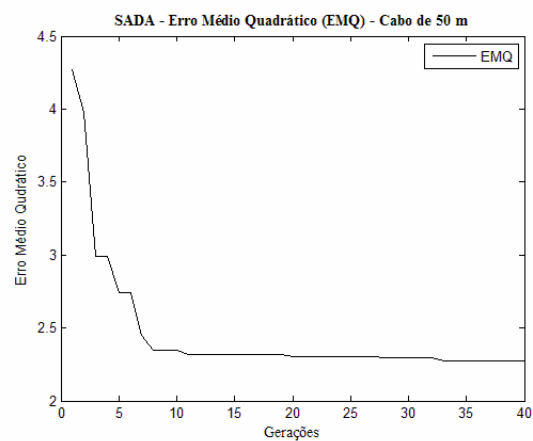


Figura 6.6d – SADA – Erro Médio Quadrático
– cabo de 50 m

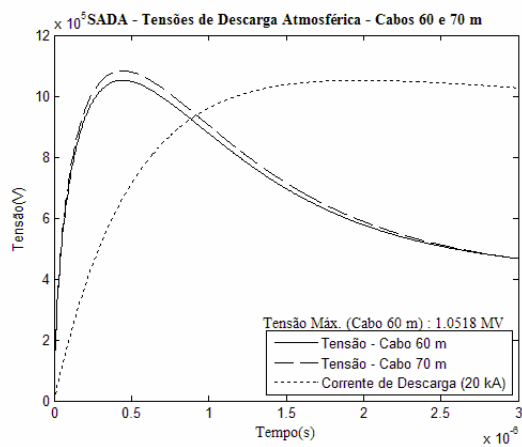


Figura 6.7a – SADA – Tensões de Descarga
– cabos de 60 e 70 m

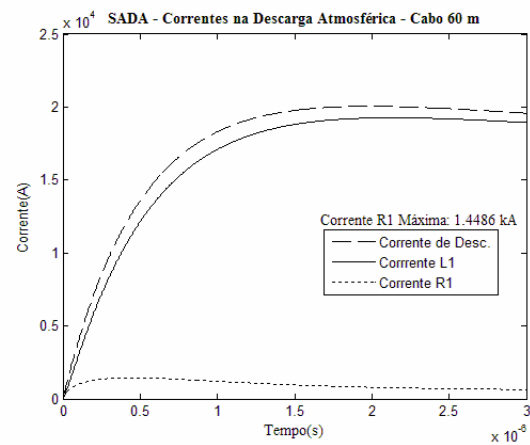


Figura 6.7b – SADA – Correntes na Descarga
– cabo de 60 m

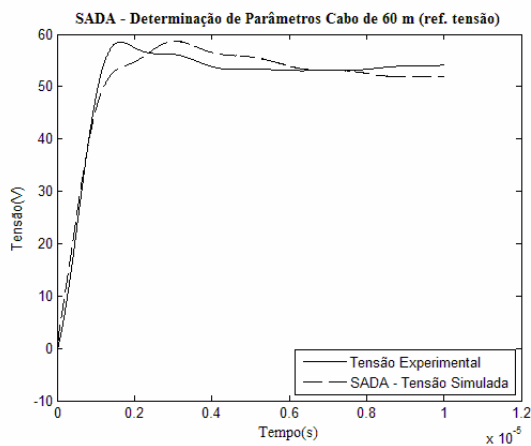


Figura 6.7c – SADA – Determinação de
Parâmetros – cabo de 60 m (ref. tensão)

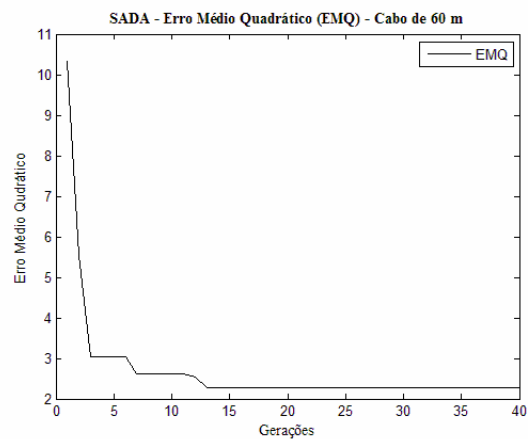


Figura 6.7d – SADA – Erro Médio Quadrático
– cabo de 60 m

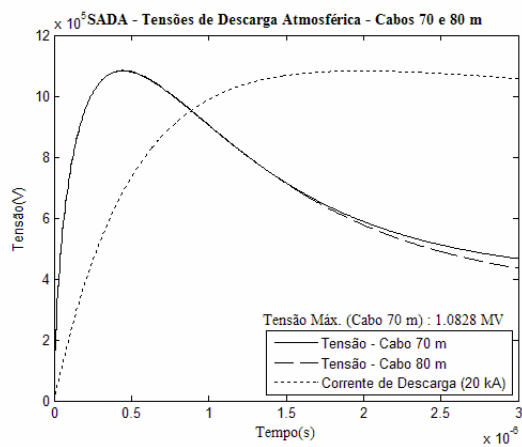


Figura 6.8a – SADA – Tensões de Descarga
– cabos de 70 e 80 m

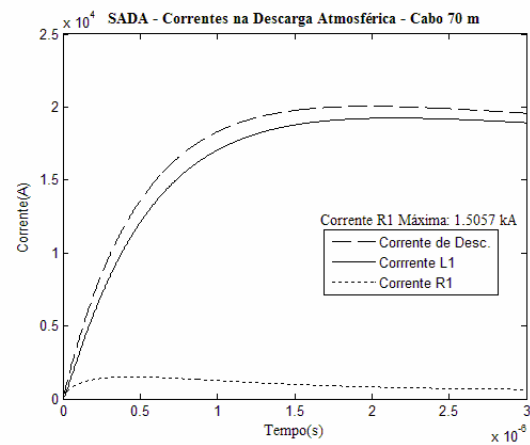


Figura 6.8b – SADA – Correntes na Descarga
– cabo de 70 m

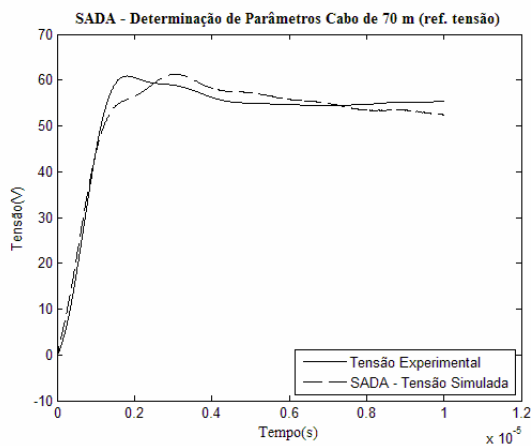


Figura 6.8c – SADA – Determinação de
Parâmetros – cabo de 70 m (ref. tensão)

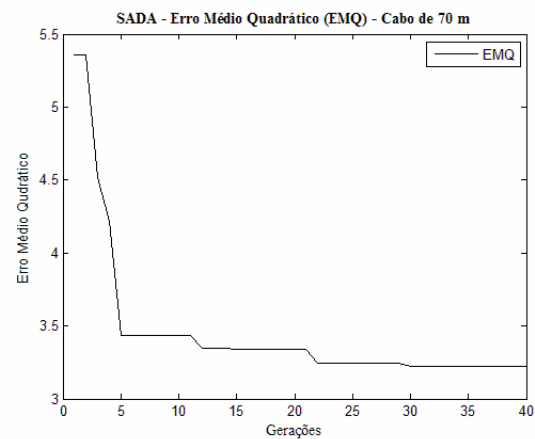


Figura 6.8d – SADA – Erro Médio Quadrático
– cabo de 70 m

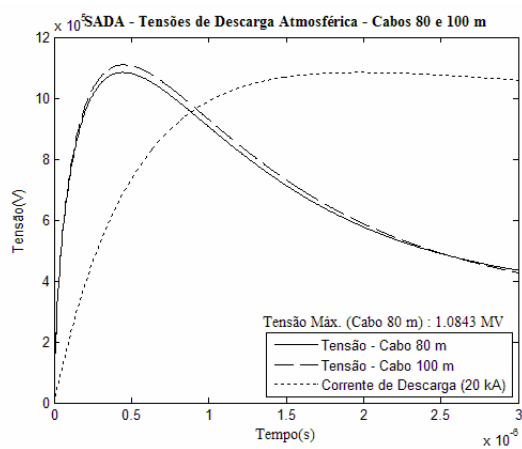


Figura 6.9a – SADA – Tensões de Descarga
– cabos de 80 e 100 m

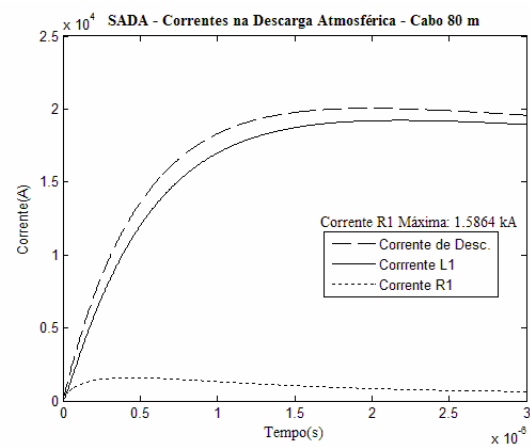


Figura 6.9b – SADA – Correntes na Descarga
– cabo de 80 m

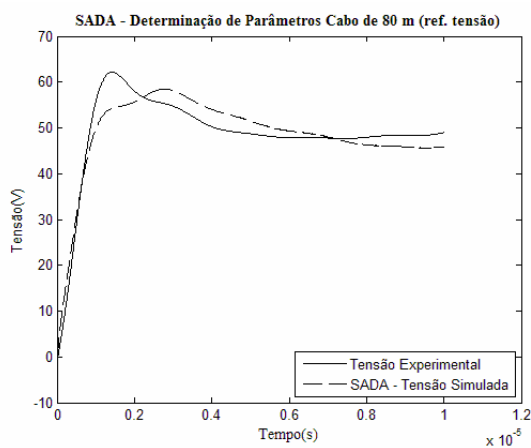


Figura 6.9c – SADA – Determinação de
Parâmetros – cabo de 80 m (ref. tensão)

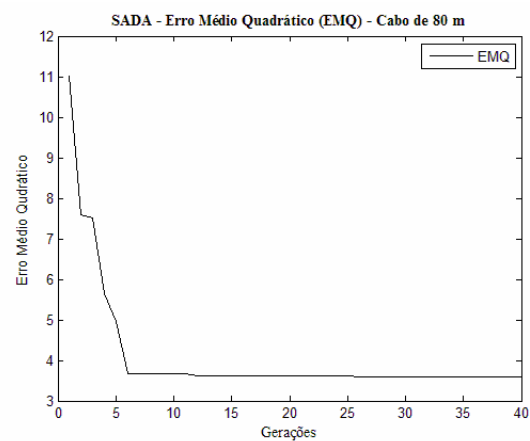


Figura 6.9d – SADA – Erro Médio Quadrático
– cabo de 80 m

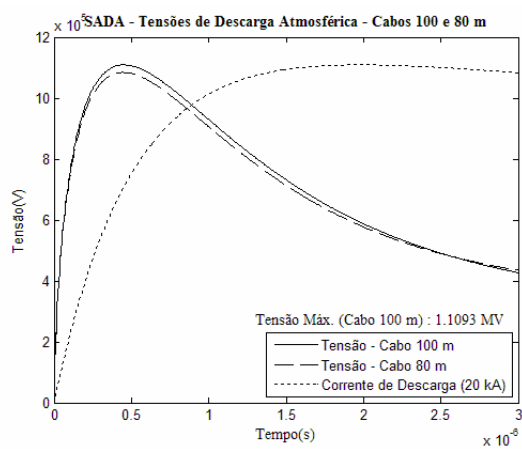


Figura 6.10a – SADA – Tensões de Descarga
– cabos de 100 e 80 m

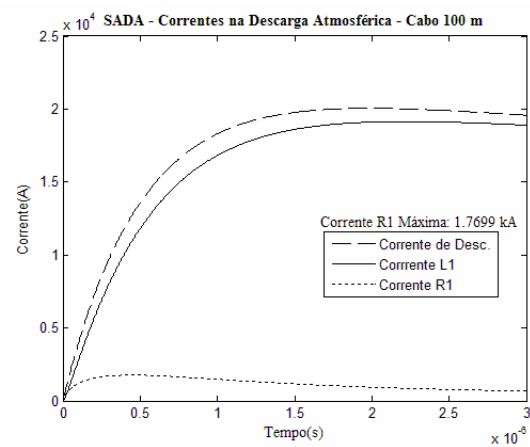


Figura 6.10b – SADA – Correntes na Descarga
– cabo de 100 m

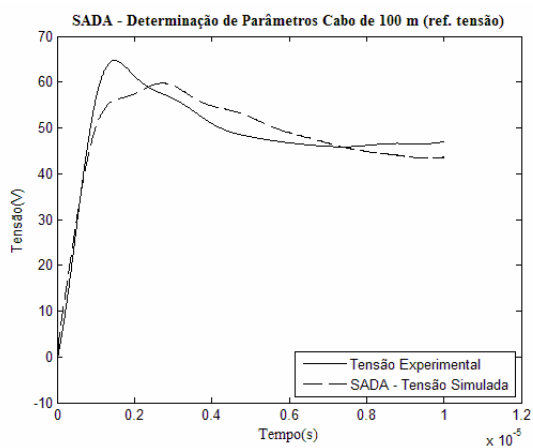


Figura 6.10c – SADA – Determinação de
Parâmetros – cabo de 100 m (ref. tensão)

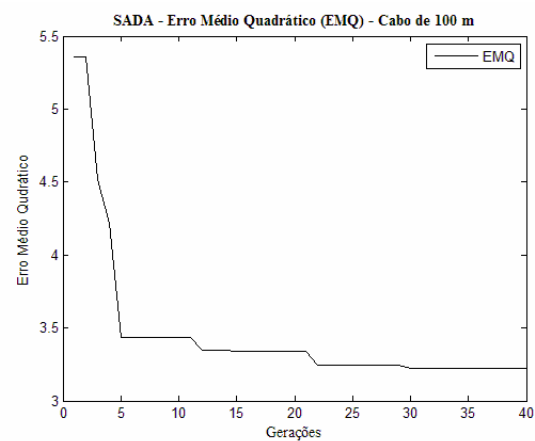


Figura 6.10d – SADA – Erro Médio Quadrático
– cabo de 100 m

Os gráficos de item “a” apresentam tensões de descargas V_D em cabos com comprimentos próximos e a corrente de descarga expandida $I_{D\text{Expandida}}$ que apresenta valor absoluto idêntico ao da tensão de descarga. A partir da comparação entre as tensões pode-se verificar a alteração dos circuitos equivalentes PI-RL para cada comprimento de cabo. Já a corrente de descarga expandida $I_{D\text{Expandida}}$ permite observar a defasagem entre a tensão de descarga V_D devido a influência do efeito indutivo.

Nos gráficos de item “b” são apresentadas as correntes no resistor R_1 e indutor L_1 que compõem o primeiro setor do circuito PI-RL. Estas correntes são provenientes da corrente de descarga normalizada I_D também apresentada neste gráfico.

Para os gráficos de item “c” são ilustradas a tensão experimental V_{Exp} e a tensão obtida através do SADA para determinar os parâmetros PI-RL V_{Parm} .

Os gráficos de item “d” apresentam a evolução do erro médio quadrático de acordo com o número de gerações do algoritmo genético do SADA.

Na Figura 6.3a, a defasagem de V_D do cabo de 20m em comparação com $I_{D\text{Expandida}}$ é mínima demonstrando que o efeito indutivo devido ao comprimento do cabo é pequeno, este fenômeno também é visto na Figura 6.3b onde os valores de correntes I_D e I_{L1} são próximos. O gráfico da Figura 6.3c mostra que a tensão simulada pelo SADA é semelhante à tensão experimental, esta característica pode ser observada pela evolução do erro médio quadrático da Figura 6.3d que apresenta redução significativa à medida evoluem as gerações do algoritmo genético do SADA.

As curvas de tensão de descarga da Figura 6.4a apresentam valores próximos e defasagem em relação à corrente de descarga expandida, há redução da corrente sobre R_1 quando são comparadas as Figuras 6.3b e 6.4b indicando maior efeito indutivo no cabo de 30m. A Figura 6.4c mostra a aproximação de V_{Parm} com V_{Exp} que reflete na evolução do erro médio quadrático visto na Figura 6.4d onde ocorre a estabilidade deste parâmetro a partir da décima geração do algoritmo genético.

Na Figura 6.5a as tensões máximas são próximas. Observa-se que na fase inicial as respostas são praticamente as mesmas. A partir do valor máximo de tensão, a redução do valor das tensões é menos acentuada no cabo de 40m. A corrente sobre R_1 na Figura 6.5b tem menor intensidade quando comparada com a Figura 6.4b, indicando que o circuito possui maior quantidade de setores π que a simulação anterior (cabo de 30m). De forma semelhante às respostas do cabo de 30m, ocorre a semelhança V_{Parm} com V_{Exp} que é observada com a redução do erro médio quadrático da Figura 6.5d.

Nos gráficos relacionados com as simulações para cabos de 50, 60, 70, 80 e 100m os resultados são praticamente os mesmos, ocorrendo aproximação das tensões de descarga V_D , aumento da corrente sobre L_1 , respostas equivalentes das tensões V_{parm} e V_{Exp} e variações do erro médio quadrático sempre abaixo de 4.

Tabela 6.1 – Valores de Resistências Simuladas e Experimentais

Cabo Comp. (m)	$V_{D\text{máx}}$ (V)	$I_{DR1\text{máx}}$ (A)	$V_{D\text{máx}}/I_{DR1\text{máx}}$($\Omega$)	N	$R_S(\Omega)$	$R_{\text{Exp}}(\Omega)$
20	1,5753e+006	4,0126e+003	392,5900	4	98,1475	97,2
30	1,0710e+006	2,7324e+003	391,9700	8	48,9963	53,5
40	1,0966e+006	2,5786e+003	425,2600	12	35,4383	39,1
50	1,0818e+006	1,4580e+003	742,0100	27	27,4819	31,6
60	1,0518e+006	1,4486e+003	726,0900	29	25,0376	29,9
70	1,0828e+006	1,5057e+003	719,1200	29	24,7972	28,0
80	1,0843e+006	1,5864e+003	683,5000	31	22,0484	29,8
100	1,1093e+006	1,7699e+003	626,7500	31	20,2177	27,0

Para determinar a resistência simulada R_S para cada comprimento de cabo, foram utilizados valores obtidos em simulação do SADA de tensão de descarga máxima $V_{D\text{máx}}$, corrente de descarga máxima sobre o resistor R1 $I_{DR1\text{máx}}$ e o número de setores N. Já os valores experimentais de resistência R_{Exp} foram efetuados por MEDEIROS (1998). Verifica-se que os valores simulados acompanham os medidos experimentalmente por meio de terrômetro.

Este Capítulo apresentou os resultados de simulações do SADA. Os sinais utilizados foram dados experimentais. O erro médio quadrático foi utilizado como parâmetro de avaliação da aptidão do algoritmo genético, através dos gráficos correspondentes, verificou-se a redução deste parâmetro e, após certo número de gerações, o mesmo tende à estabilidade, indicando a obtenção de resposta satisfatória e demonstrando que os gráficos de ajuste de sinais são outra forma de avaliar, visualmente, a aproximação de tensão determinada por meio de algoritmo genético no SADA com a tensão experimental.

Verificou-se, então, que os valores simulados no SADA são compatíveis com os experimentais tanto nas tensões ajustadas para determinação de parâmetros, quanto nas resistências de aterramento quando comparadas com dados experimentais.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

As evoluções científica e tecnológica, em muitos casos, dependem de comprovações de modelos, a fim de verificar que determinada situação pode ser reproduzida mediante estudos determinísticos ou probabilísticos. A computação é uma ferramenta que facilita enormemente estas comprovações, basta comparar os resultados e os tempos envolvidos nos cálculos feitos por pesquisadores no passado, com o que é realizado atualmente. Percebemos a disponibilidade de uma infinidade de equipamentos eletrônicos que fazem parte do nosso cotidiano, a maioria possui um processador que realiza o gerenciamento de suas funções, conforme o comando dos usuários. Embora toda essa facilidade exista, muitos problemas com maior complexidade apresentam tempo de resolução extremamente elevados da ordem de vários anos, mesmo utilizando os recursos computacionais existentes.

Vemos que a computação evolutiva tem a habilidade de resolver problemas de complexidade elevada, tais como busca em sistemas multimodais. Tais problemas são comuns em sistemas de potência, onde ajustes de valores de parâmetros exigem processos complexos e às vezes de difícil solução. Surge, então, o uso de algoritmos genéticos como ferramenta da computação evolutiva para colaborar na resolução destes problemas.

O sistema de proteção elétrico é projetado para evitar danos humanos e materiais. Uma situação que deve ser observada é o comportamento de um aterramento elétrico sob ação de descarga atmosférica. O aterramento elétrico é estudado sob vários pontos de vista, um deles relata que o efeito indutivo é muito maior que o capacitivo. Este estudo utilizou estas observações, bem como da representação elétrica da malha de aterramento como sendo um conjunto de resistores e indutores associados em setores π . Uma vez definido o modelo, foi necessário um mecanismo que permitisse avaliar sinais de entrada e saída neste sistema, de modo a obter parâmetros elétricos do mesmo. Para tanto, foram utilizadas técnicas de algoritmos genéticos na elaboração do Sistema de Análise de Desempenho de Aterramentos (SADA).

Ao utilizar algoritmos genéticos para identificar as características de um aterramento modelado, foi possível encontrar as tensões de descargas desenvolvidas a partir de quaisquer correntes de descarga, possibilitando avaliar o aterramento sob ação de várias situações de descargas atmosféricas. Outro aspecto de uso desta metodologia, permite encontrar parâmetros de circuitos elétricos sem uso de técnicas invasivas.

A partir do resultado do SADA, foi possível avaliar se o sistema de aterramento é capaz de suportar a corrente de descarga, e qual seria a tensão desenvolvida pelo circuito, nesta condição. Caso o comportamento seja diferente do projetado, o responsável pelo sistema poderá tomar providências no sentido de alterar as características elétricas e tornar este sistema compatível com as especificações, evitando, deste modo, danos às pessoas e instalações.

Pelo exposto, a contribuição deste trabalho consistiu em:

- a) identificar os algoritmos genéticos como técnica de inteligência artificial para solução do problema proposto;
- b) desenvolver ferramenta computacional baseada em algoritmos genéticos, para viabilizar, na prática, uma transformação dos resultados experimentais obtidos de campo por Carlos Medeiros, em valores que caracterizam o aterramento diante da descarga atmosférica;
- c) utilizar algoritmos genéticos na avaliação e identificação de circuitos elétricos;
- d) possibilitar a utilização do modelo funcional baseado em algoritmos genéticos para aplicar os demais métodos de análise de aterramentos em condição de descarga atmosférica.

Como resultado associado ao tema desta pesquisa, foi solicitado registro de patente para o processo de medição de tensão e correntes experimentais junto ao INPI, e por este motivo não foram submetidos artigos sobre o tema deste trabalho.

Deseja-se como trabalho futuro, alterar a codificação para linguagem funcional, a qual usa representação matemática de suas funções, bem como manipulação de listas, possibilitando o uso de outras técnicas de computação evolutiva. Outro aspecto, é a redução do tempo de execução, permitindo explorar outras características do problema. Finalmente, vislumbra-se utilizar um gerador de tensão de alta capacidade para obter experimentalmente dados de tensão e corrente em malhas de aterramentos, objetivando com isso, validar os dados obtidos pelo SADA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGER, G. **Lightning-Caused Accidents and Injuries to Humans**, IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, 2007.
- BEWLEY, L. V. **Theory and Tests of the Counterpoise**, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Vol. 53, No. 8, pp. 1163-1172, Aug. 1934.
- CALIXTO, W. P.; NETO, L. M.; WU, M.; FILHO, H. B. M. **Horizontal Stratification of the Soil in Multi-Layer Using Non-Linear Optimization**, Revista Ciências Exatas e Naturais, RECEN. Vol. 11, No. 1, p 67-89, Jan/Jun 2009.
- CALIXTO, W. P.; NETO, L. M.; WU, M.; KLIEMANN, H.; CASTRO, S. S.; YAMANAKA, K. **Calculation of Soil Electrical Conductivity Using a Genetic Algorithm**. Computers and Electronics in Agriculture, v. 71, p. 1-6, April, 2010.
- CALIXTO, W. P.; NETO, L. M.; WU, M.; YAMANAKA, K.; MOREIRA, E. P. **Parameters Estimation of a Horizontal Multilayer Soil Using Genetic Algorithm**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 25, p. 1250-1257, June, 2010.
- CBRN. página do IX CBRN, disponível em <http://www.cbrn2009.lps.ufrj.br/>. Acesso em 06/11/2009.
- COSTA, J. J. S. **Elementos de Estatística**, Rio de Janeiro, Campus, 1981.
- DAWALIBI, F. **Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors, Part 1; Single Conductor**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, p. 105-111, October, 1986.
- _____. **Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors, Part 2; Ground Networks**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, p. 112-119, October 1986.
- DE PAULA, S. C. M.; DE MENDONÇA, R. G.; NETO, L. M.; MEDEIROS, C. A. G; SILVA, R. V. R. **Evaluation of Performance of Groundings Electrics in Conditions of Lightning Current**, Electrical and Computer Engineering, Volume 2, Toronto, Canada, p. 737-742, 2001.
- DE PAULA, S. C. M. **Utilizando a Técnica de Identificação de Sistemas para Subsidiar o Futuro Desenvolvimento de um Equipamento para Avaliação do Comportamento do Aterramento Submetido a Descargas Atmosféricas**, Tese, UFU, Uberlândia, 2003.
- DORMAND, J. L.; PRINCE, P. J. **A family of embedded Runge-Kutta formulae**, Journal of Computational and Applied Mathematics, Volume 6, No. 1, p 19-26, 1980.

- EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to Evolutionary Computing**, 1st ed, Springer, 2003.
- GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A.; TELLÓ, M. **Metologias Aplicadas para a Modelagem e Análise de Sistemas de Aterramento Impulsivo – Revisão do Estado da Arte**, 11th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering, Zaragoza, Spain, 2009.
- GRCEV, L.; DAWALIBI, F. **An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems**, IEEE Transactions on Power Delivery, V. PWRD-5, No. 4, pp. 1773-1781, November 1990.
- GRCEV, L. **Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems**, IEEE Transactions on Power Delivery, V. PWRD-11, No. 2, p. 815-823, April 1996.
- _____. **Impulse Efficiency of Simple Grounding Electrode Arrangements**, Proceedings, 18th Int. Zurich Symposium on EMC, Munich, p. 325-328, 2007
- GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**, Wiley-Interscience, 1971.
- GRIFFITHS, D. V.; SMITH, I. M. **Numerical Methods for Engineers**, CRC Press, 1991.
- GUPTA, B. R.; THAPAR, B. **Impulse Impedance of Grounding Grids**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, V. PAS-99, No. 6, p. 2357-2362, November/December 1980.
- GUPTA, B. R.; SINGH, V. K. **Impulse Impedance of Rectangular Grounding Grids**, IEEE Transactions on Power Delivery, V. PWRD-7, No. 1, p 214-218, January 1992.
- _____. **Inductance of Rectangular Grids**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-7, No. 3, p. 1218-1222, July 1992.
- HAUPT, R. L.; HAUPT, S. H. **Practical Genetic Algorithms**, second edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2004.
- HAIRER, E.; NORSETT, S. P.; WANNER, G. **Solving Ordinary Differential Equations I**, 2ed., Springer-Verlag, 1993.
- HE, J.; GAO, Y.; ZENG, R.; ZOU, J.; LIANG, X.; ZHANG, B.; LEE, J.; CHANG, S. **Effective Length of Counterpoise Wire Under Lightning Current**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol . 20, No. 2, p 1585-1591, April 2005.
- HE, Z.; WEN, X.; WANG, J. **Optimization Design of Substation Grounding Grid Based on Genetic Algorithm**, vol. 4, pp.140-144, Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007), 2007.

- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, University of Michigan Press, 2nd ed., MIT Press, 1992.
- INPE. Página do Laboratório de Eletricidade Atmosférica do INPE, disponível em <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>. Acesso em 31/03/2009.
- KOSZTALUK, R.; LOBODA, M.; MUKHEDKAR, D. **Experimental Study of Transient Ground Impedances**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11, p 4653-4660, November 1981.
- LAI, L. L. **Intelligent System Applications in Power Engineering**, England, John Wiley & Sons, England, 1998.
- LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**, 2^a. Edição, BRASPORT, 2008.
- LIU, Y. **Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments**, PhD Thesis, ACTA Universitatis Upsaliensis, Uppsala, 2004.
- MALVINO, A.; BATES, D. J. **Eletrônica Volume 2**, 7a. Edição, São Paulo, McGraw-Hill, 2007.
- MATTOS, M. A. F. **Grounding Grids Transient Simulation**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, p. 1370-1378, April 2005.
- MAZZETI, C.; VECA, G. M. **Impulse Behavior of Ground Electrodes**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, V. PAS-102, No. 9, September, p 3148-3156, 1983.
- MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The Electrical Nature of Storms**, Oxford University Press, 1998.
- MEDEIROS, C. A. G. **Avaliação do Desempenho de Aterramentos Elétricos em Descargas Atmosféricas – Efeitos Resistivo e Indutivo**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Maio, 1998.
- MELIOPOULOS, A. P.; MOHARAM, M. G. **Transient Analysis of Grounding Systems**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, V. PAS-102, No. 2, p. 389-399, February 1983.
- MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**, MIT Press, 1998.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**, 8a. Edição, São Paulo, Pearson, 2008.
- PAPALEXOPOULOS, A. D.; MELIOPOULOS, A. P. **Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems**, IEEE Transactions on Power Delivery, V. PWRD-2, No. 4, p. 1073-1081, October 1987.

- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Physics and Effects**, Cambridge University Press, 2005.
- RAMAMOORTY, M.; NARAYANAN, M. M. B.; PARAMESWARAN, S.; MUKHEDKAR, D. **Transient Performance of Grounding Grids**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, p. 2053-2059, October 1989.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**, 4a. Edição, São Paulo, Makron Books, 2000.
- SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**, D. Van Nostrand Company, 1948.
- VERMA, R.; MUKHEDKAR, D. **Impulse Impedance of Buried Grounding Wire**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, V. PAS-99, No. 3, p. 2003-2007, September/October 1980.
- _____. **Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 3, p. 1023-1030, March 1981.
- VISACRO, S. **A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, p. 381-386, January 2007.
- XIONG, W.; DAWALIBI, F. **Transient Performance of Substation Grounding Systems Subjected to Lightning and Similar Surge Currents**, IEEE Transactions on Power Delivery, V. PERD-9, No. 3, p. 1412-1420, July, 1994.
- YI-MIN, Y.; MIN-FANG, P.; HAI-TAO, H.; YUE-HUA, Y. **Optimal Design of Grounding Grids Based on Genetic Algorithm**, 3rd International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, 2009. WGEC '09, p. 129-132, October, 2009.