

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA OPERACIONAL E
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL
MESTRADO EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

LEANDRO SOARES MACHADO

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO ALGORITMO GENÉTICO – FUZZY PARA
MALHAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES**

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ

Junho de 2020

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA OPERACIONAL E
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL
CURSO DE MESTRADO EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL

LEANDRO SOARES MACHADO

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO ALGORITMO GENÉTICO – FUZZY PARA
MALHAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado em Pesquisa Operacional e
Inteligência Computacional da Universidade
Candido Mendes – Campos/RJ, para
obtenção do grau de MESTRE EM
PESQUISA OPERACIONAL E
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL.

Orientador: Prof. Ítalo de Oliveira Matias, D.Sc.

CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ

Junho de 2020

Catálogo na Fonte

Preparada pela Biblioteca da **UCAM – CAMPOS** 013/2021

Machado, Leandro Soares.

Modelo de otimização algoritmo genético – fuzzy para malhas de aterramento de subestações. / Leandro Soares Machado. – 2020.
81 f.

Orientador(a): Ítalo de Oliveira Matias.

Dissertação de Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional – Universidade Candido Mendes – Campos. Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.

Referências: f. 77-80.

1. Algoritmos genéticos. 2. Fuzzi. I. Matias, Ítalo de Oliveira, orient. II. Universidade Candido Mendes – Campos. III. Título.

CDU – 004.021

Bibliotecária Responsável: Flávia Mastrogirólamo CRB 7^a-6723

LEANDRO SOARES MACHADO

MODELO DE OTIMIZAÇÃO ALGORITMO GENÉTICO-FUZZY PARA MALHAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional da Universidade Candido Mendes – Campos/RJ, para obtenção do grau de MESTRE EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL.

Aprovada em: 22 de junho de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ítalo de Oliveira Matias, D.Sc. – Orientador
UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES (UCAM)

Prof. Milton Erthal Júnior, D.Sc.
UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES (UCAM)

Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva, D.Sc.
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO (UENF)

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ

2020

Dedico este trabalho a minha filha. Que ele possa servir de incentivo aos seus estudos e em suas formações e, principalmente, para a vida.

Dedico também aos meus pais, que me orientaram e me incentivaram a buscar continuamente novos conhecimentos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pois dele vem nossa sabedoria e energia para seguir nessa longa jornada.

Também agradeço aos professores e amigos pela ajuda e incentivo durante esse período.

A UCAM – Campos/RJ e seu corpo docente, que realiza um excelente trabalho nesse curso de mestrado, contribuindo para a formação acadêmica e profissional de seus alunos.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo a aplicação da inteligência computacional, por meio de algoritmos genéticos e lógica Fuzzy com o software Matlab, na elaboração de um modelo de otimização para projeto de malhas de aterramento de subestações. Este estudo busca o desenvolvimento de um modelo em que seja possível alcançar a resistência desejada com a menor área e com menor quantidade possível de materiais. Esse modelo foi aplicado a uma subestação elevadora de uma Usina de Solar Fotovoltaica (USF). Inicialmente foi feita uma pesquisa bibliométrica na base Scopus a fim de mapear o interesse por parte dos pesquisadores para o tema abordado. A segunda etapa deste estudo foi a aplicação da lógica Fuzzy para determinar a influência eletromagnética do sistema de aterramento em função do espaçamento entre as hastes. Por fim, com base nos quesitos normativos, foi desenvolvido um modelo de otimização para malha de aterramento de subestações. Por meio do algoritmo genético (AG) foi possível encontrar parâmetros otimizados que possibilitaram o desenvolvimento de um modelo de otimização Fuzzy. O modelo contemplou os parâmetros da malha da USF e mais quatro faixas de resistividade, num total de cinco valores. Para o projeto da malha da subestação da USF, com resistividade de 325 Ohms, foi encontrada uma área de 1640m² e comprimento total de cabos igual a 570 metros. Além disso, ele pôde correlacionar os parâmetros de entrada com os resultados encontrados pelo AG com divergências inferiores a 3%. Os resultados obtidos mostraram que os algoritmos genéticos é um caminho eficiente para busca de parâmetros otimizados para o desenvolvimento de projeto de sistemas de aterramento com baixo custo. Através da lógica Fuzzy é possível o desenvolvimento de modelos que correlacionam variáveis de entrada com resultados do projeto com baixa divergência dos valores esperados.

PALAVRAS-CHAVE: Aterramento. Fuzzy. Matlab. Otimização. Subestação.

ABSTRACT

The present study aims at the application of computational intelligence, through genetic algorithms and Fuzzy logic with the Matlab software, in the elaboration of an optimization model for the design of substation grounding meshes. This study seeks to develop a model in which it is possible to achieve the desired resistance with the smallest area and with the least possible amount of materials. This model was applied to an elevating substation of a USF (Solar Photovoltaic Plant). Initially, a bibliometric survey was carried out on the Scopus database in order to map the interest of the researchers to the topic addressed. The second stage of this study was the application of Fuzzy logic to determine the electromagnetic influence of the grounding system as a function of the spacing between rods. Finally, based on the normative requirements, an optimization model was developed for the substation grounding grid. Through the genetic algorithm (AG) it was possible to find optimized parameters that enabled the development of a Fuzzy optimization model. The Fuzzy model included the parameters of the USF grid and four more resistivity ranges, for a total of five values. For the design of the USF substation mesh, with resistivity of 325 Ohms, an area of 1640m² was found and the total cable length was 570 meters. The model can correlate the input parameters with the results found by the AG with divergences below 3%. The results obtained showed that genetic algorithms are an efficient way to search for optimized parameters for the development of low-cost earthing systems design. Through the Fuzzy logic it is possible to develop models that correlate input variables with project results with a low divergence from the expected values.

KEYWORDS: Grounding. Fuzzy. Matlab. Optimization. Substation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estruturação da lógica Fuzzy	23
Figura 2 - Número de publicações realizadas por ano.	25
Figura 3 - Número de produção científica distribuída por país.	26
Figura 4 - Autores com maiores números de publicações.	26
Figura 5 - Número de artigos por áreas de interesse.	27
Figura 6 - Mapa das principais palavras-chave dos artigos.	27
Figura 7 - Hastes de aterramento alinhadas.....	37
Figura 8 - Parâmetros da resistência mútua entre duas hastes em paralelo.	38
Figura 9 - Circuito equivalente do aterramento composto por um único eletrodo.	38
Figura 10 - Instrumentos de medição da resistência, corrente e potência do sistema de aterramento.	40
Figura 11 – Local onde foram realizados os experimentos	41
Figura 12 - Corrente elétrica em função da resistência.....	42
Figura 13 - Entrada 1(Espaçamento).....	44
Figura 14 - Entrada 2 (Fator de redução).....	44
Figura 15 - Entrada 3 (Corrente elétrica).....	44
Figura 16 - Saída (Desempenho).....	44
Figura 17 - Superfície gerada do modelo 1 Fuzzy (Triangular).	45
Figura 18 - Entrada 1 (Espaçamento).....	46
Figura 19 - Entrada 2 (Fator de Redução)	46
Figura 20 - Entrada 3 (Corrente elétrica).....	47
Figura 21 - Saída (Desempenho).....	47
Figura 22 - Superfície desempenho gerada pelo modelo com funções do tipo Gaussiana.	47
Figura 23 - Entrada 1 (Espaçamento).....	48
Figura 24 - Entrada 2 (Fator de redução).....	48
Figura 25 - Entrada 3 (Corrente elétrica).....	49
Figura 26 - Saída (Desempenho).....	49
Figura 27 - Superfície desempenho gerada pelo modelo com funções do tipo Trapezoidal.....	49
Figura 28 - Regras e resultados do modelo com funções do tipo Trapezoidal.....	50

Figura 29 - Ciclo básico de um algoritmo genético.....	57
Figura 30 - Sistema FUZZY.....	58
Figura 31 - Tensão de passo provocada por correntes de falha	61
Figura 32 - Distribuição de cabos na malha.	66
Figura 33 - Funções de pertinências para a entrada (Área).	67
Figura 34 - Funções de pertinências para a entrada (Espaçamento).....	68
Figura 35 - Funções de pertinência para entrada (Comprimento de cabos).	68
Figura 36 - Elaboração de regras do modelo Fuzzy no Toolbox Matlab.	69
Figura 37 - Variáveis de saída (Resistência e Tensão de passo).	70
Figura 38 - Visualização gráfica das regras de associação do modelo proposto.	71
Figura 39 - Superfície gerada através dos resultados das regras do sistema Fuzzy para saída Resistência.	72
Figura 40 - Superfície gerada através dos resultados das regras do sistema Fuzzy. para saída Tensão de passo.....	73

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - As principais referências utilizadas nos artigos analisados na base Scopus para os termos {"FUZZY and ELECTRICAL GROUNDING) or (ELECTRICAL EARTH")}	28
Tabela 1 - Resistividade dos solos	36
Tabela 2 - Materiais utilizados no experimento	39
Tabela 3 - Fator de redução em função do espaçamento entre as hastes	41
Tabela 4 - Variáveis de entrada e saída para desenvolvimento do modelo Fuzzy	43
Tabela 5 - Regras de associação do modelo triangular	45
Tabela 6 - Resultados do desempenho do modelo 1	46
Tabela 7 - Resultados do desempenho do modelo Gaussiano	48
Tabela 8 - Desempenho do modelo Fuzzy Trapezoidal	50
Tabela 9 - Parâmetros do Algoritmo Genético Proposto	65
Tabela 10 - Resultados da otimização com AG e divergências do modelo Fuzzy	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IC	Inteligência Computacional
ICC	Corrente de Curto-Circuito
ICFT	Corrente de Curto-Circuito Fase-Terra
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
M.T	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
PO	Pesquisa Operacional
R	Resistência Elétrica
SCC3f	Potência de Curto-Circuito Trifásico
Vtoque	Tensão de Toque
Vpasso	Tensão de Passo
ρ_a	Resistividade Aparente
Rm	Resistência Mútua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA	16
1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	16
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1.1 Aterramento	18
2.1.2 Lógica Fuzzy	19
3 ARTIGO A – MAPEAMENTO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA NA BASE SCOPUS: ANÁLISE DA LÓGICA FUZZY EM SISTEMAS DE ATERRAMENTO	20
3.1 INTRODUÇÃO	21
3.2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.2.1 Aterramento	21
3.2.2 Lógica Fuzzy.....	22
3.3 MAPEAMENTO DA PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.4 METODOLOGIA	25
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
3.6 PRINCIPAIS REFERÊNCIAS CITADAS.....	28
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
3.8 REFERÊNCIAS	29
4 ARTIGO B – O USO DA MODELAGEM FUZZY NA PREDIÇÃO DO DESEMPENHO DO ATERRAMENTO	32
4.1 INTRODUÇÃO	33
4.2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	34
4.2.1 Lógica Fuzzy.....	34
4.2.2 Aterramento	35
4.2.2.1 Aterramento com hastes alinhadas.....	36

4.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.4.1 Modelagem com função do tipo Triangular	43
4.4.2 Modelagem com função do tipo Gaussiana.....	46
4.4.3 Modelagem com função do tipo Trapezoidal	48
4.5 CONCLUSÕES	51
4.6 REFERÊNCIAS.....	52
5 ARTIGO C – MODELO DE OTIMIZAÇÃO GA-FUZZY PARA MALHAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES	54
5.1 INTRODUÇÃO	55
5.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	56
5.2.1 Aterramento de subestações	56
5.2.2 Algoritmos Genéticos	56
5.2.3 Lógica Fuzzy	57
5.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
5.3.1 Parâmetros e Quesitos Para Modelagem da Malha	59
5.3.1.1 Estratificação do solo.....	59
5.3.1.2 Cálculo da Resistência da Malha.....	59
5.3.1.3 Máxima Tensão de Passo Tolerável.....	61
5.3.1.4 Máxima Tensão de Toque Tolerável.....	63
5.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA POR ALGORITMO GENÉTICO	63
5.4.1 Dados de Entrada e Delimitações do Estudo	63
5.4.2 Modelagem do Problema.....	64
5.4.3 Resultados.....	65
5.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO FUZZY.....	66
5.5.1 Entradas do Sistema Fuzzy	66
5.5.1.1 Área a ser utilizada	67
5.5.1.2 Comprimento de cabos.....	67
5.5.1.3 Resistividade.....	68
5.5.2 Regras Criadas	69
5.5.3 Saídas do Sistema Fuzzy	69
5.5.4 Resultados das simulações	70
5.5.5 Superfície da Resistência Gerada pelas regras Estabelecidas	71
5.5.6 Superfície da Tensão de Passo em função das Regras estabelecidas	72

5.5.7 Resultados e discussão	73
5.6 CONCLUSÃO	74
5.7 REFERÊNCIAS.....	74
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
7 REFERÊNCIAS.....	77
APÊNDICE A: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO DESENVOLVIDO UTILIZADO NA SEÇÃO 5.4.3	81

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O aterramento de sistemas elétricos é uma área de grande importância da engenharia elétrica. As principais pesquisas nessa área estão relacionadas à qualidade da energia elétrica, proteção das instalações elétricas e segurança das pessoas ligadas direta ou indiretamente à eletricidade (MAMED FILHO, 2017).

O aterramento é uma estrutura condutora enterrada no solo, de modo a garantir um bom contato elétrico com a terra por meio de eletrodos de aterramento. Esse sistema tem como objetivo proporcionar uma superfície equipotencial no solo dentro dos valores suportáveis por animais e seres humanos (CANNABRAVA; FERREIRA; PASQUA, 2016).

Na maioria das ocasiões, uma única haste de aterramento não é suficiente para propiciar um adequado sistema de aterramento. Dessa forma, necessita-se de uma malha de aterramento, que consiste de um reticulado normalmente formado pela união de condutores de cobre dispostos horizontalmente, configurados de forma perpendicular e uniformemente espaçados. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

A malha de aterramento deve ser projetada de forma que os potenciais de toque e de passo sejam inferiores aos máximos potenciais suportáveis por uma pessoa (SATO; FREITAS, 2015). Além disso, deve limitar a tensão de passo, tensão de toque, assegurar a atuação do sistema de proteção e possuir menor resistência possível à passagem da corrente elétrica.

Existe uma quantidade significativa de parâmetros e variáveis para elaboração do projeto de malhas de aterramento. Dentre as principais destacam-se: a resistividade do solo, a potência de curto-circuito, a área disponível, dentre outros. A elevada resistividade do solo da maioria das regiões brasileiras e os altos níveis de curto-circuito existentes em subestações contribuem para elevação do custo do projeto.

O atendimento dos quesitos normativos do projeto pode ser alcançado por diferentes configurações, ou seja, por diferentes áreas de ocupação, com maior ou menor quantidade de materiais, com profundidades variadas, dentre outros. Apesar de a busca pela melhor configuração da malha de aterramento (utilização de pequena área, pequena quantidade de cabos e de materiais de recobrimento) ser considerada

uma tarefa complexa, a aplicação da inteligência computacional tem sido eficiente na solução de problemas de elevada complexidade nas engenharias.

O conhecimento científico através da combinação de estudos de campo com aplicação da inteligência computacional pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de projetos mais eficientes. Neste estudo houve duas contribuições importantes, a primeira foi encontrar os melhores resultados de desempenho do aterramento em função do espaçamento para hastes alinhadas. A segunda contribuição foi o desenvolvimento de um modelo de inteligência computacional que pode encontrar os parâmetros para projeto de malhas de aterramento de subestações com menor custo possível.

1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral desenvolver um modelo de otimização de malhas de aterramento de subestações utilizando algoritmos genéticos e lógica Fuzzy a partir da menor área e quantitativo de cabos para as resistividades e correntes de curto-circuito especificadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantar o estado da arte sobre utilização da lógica Fuzzy aplicada em sistemas de aterramento;
- Apresentar os principais quesitos normativos para projeto de malhas, permitindo que o projeto seja confiável;
- Propor modelo matemático baseado em inteligência computacional para otimizar custo de projeto de sistemas de aterramento;
- Analisar os resultados encontrados por meio do Algoritmo Genético, comparando com método analítico;
- Propor variáveis, ajustando valores de forma que o modelo Fuzzy permita representar os parâmetros encontrados pelo AG com menor divergência possível.

1.3 JUSTIFICATIVA

O objetivo principal do sistema de aterramento é manter a tensão de passo, de toque e resistência dentro dos limites estabelecidos pela norma IEEE Std 80. Essa etapa do projeto é essencial para a segurança da instalação e das pessoas direta ou indiretamente associadas. Com isso, a tomada de decisão pela melhor configuração da malha possui considerável nível de complexidade, uma vez que as variáveis utilizadas no dimensionamento da malha não são isoladas e sim dependes. A escolha por uma configuração que atenda a todos os quesitos normativos e com baixo custo é resultado de várias combinações obtidas por meio de simulação.

Por meio do estudo bibliométrico, descrito a seguir, verificou-se que a inteligência computacional tem resolvido de forma eficaz diversos problemas dessa natureza a partir da utilização do AG e da lógica Fuzzy, que propiciaram a definição dos parâmetros do projeto da malha de aterramento.

Ochoa *et al.* (2018) implementaram um algoritmo genético para calcular parâmetros de solos horizontais multicamadas. No estudo foi utilizado o Algoritmo Genético e duas aproximações: a função Kernel, com o método de Prony e outra, para resistividade aparente.

Perng *et al.* (2018), por sua vez, utilizaram o algoritmo genético multiobjetivo para otimizar a resistência e custo do sistema de aterramento de subestações.

Zhang *et al.* (2007), utilizaram a inteligência computacional por meio de rede neural Fuzzy para localização de falhas de linhas de transmissão para falta à terra por meio da impedância da linha e impedância do sistema de aterramento.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

No âmbito da pesquisa bibliométrica, neste estudo, foi feita a busca dos termos (“FUZZY and ELECTRICAL GROUNDING”) or (“ELECTRICAL EARTH”) na Base Scopus no período de 1998, onde surgiram as primeiras publicações, até 10 de Junho de 2020.

A pesquisa se propôs a desenvolver um modelo de otimização para malhas de aterramento de subestações em dimensões regulares, ou seja, terrenos retangulares.

O modelo adotou a distribuição dos cabos da malha de forma que se tenha o mesmo espaçamento.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo está estruturado em forma de três artigos científicos, com um total de 6 capítulos. Cada artigo possui respectivamente seus conteúdos fundamentais para publicação científica, tais como resumo, abstract, introdução, revisão de literatura, metodologia, resultados e discussão, bem como conclusão e referências bibliográficas.

O capítulo 1 trata da introdução, contextualização e justificativa, além da definição dos objetivos e estrutura da pesquisa.

O capítulo 2 se refere à metodologia para o desenvolvimento do estudo, aos procedimentos técnicos adotados e trabalhos correlatos.

O capítulo 3 é referente ao Artigo A que contém o mapeamento da produção científica na base Scopus para o tema: análise da lógica Fuzzy em sistemas de aterramento.

O capítulo 4 é referente ao Artigo B que trata da utilização da lógica Fuzzy na predição do desempenho do aterramento.

O capítulo 5 se refere ao Artigo C que apresenta o desenvolvimento de um modelo de otimização GA-Fuzzy para malhas de aterramento de subestações.

Por último, estão apresentadas as considerações finais e as referências bibliográficas utilizadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Através de pesquisas realizadas na base Scopus, conforme proposta do artigo A do capítulo 3, foi montada uma base de dados de artigos para desenvolver o referencial teórico a critério do tema abordado neste estudo.

2.1 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1.1 – Aterramento

O aterramento elétrico é elemento essencial nos sistemas elétricos e apresenta singular importância para o bom desempenho do sistema aterrado e, principalmente, para segurança de seres vivos (GUO, 2017).

As ligações à terra devem ser estáveis e de resistência adequada pois o desempenho, a qualidade, confiabilidade e segurança das instalações elétricas, estão estritamente vinculados as condições dos seus aterramentos. Além disso, um rompimento nas conexões do aterramento de um sistema transmissão de redes monofilares, por exemplo, gera tensões perigosas (WANG, W.; ZENG *et al.*, 2005).

Quando um sistema de aterramento é submetido a uma corrente em frequência industrial (considerada baixa frequência), seu comportamento assume uma característica quase que resistiva, devido à baixa impedância e pequenas influências eletromagnéticas (reatâncias indutivas e capacitivas) (VISACRO, 2017).

No projeto de malhas de aterramento em baixa frequência deve-se considerar o aspecto de desempenho e a segurança relacionada ao valor da resistência de aterramento e com o potencial na superfície do solo (LIU *et. al.*, 2005).

O funcionamento adequado de um sistema de aterramento depende que a resistência seja suficientemente baixa para garantir a segurança das instalações elétricas (BARUA, 2011).

Existem vários estudos aplicados no desempenho de sistemas de aterramentos sob diversos aspectos, como por exemplo em regimes transitórios e em alta frequência. Zhang *et al.* (2016), apresentaram uma avaliação de possíveis intervenções em uma malha de aterramento com o intuito de melhorar o seu desempenho transitório.

2.1.2 – Lógica Fuzzy

Um modelo fuzzy basicamente segue esses passos para processamento de informação: Fuzzifica a(s) variável(is) de entrada, faz a checagem da base de conhecimento (podendo haver aprendizado de máquina no processo ou não) de forma a extrair os dados e a lógica de tomada de decisão necessária e Defuzzifica a resposta para a saída (TAKAGI e SUGENO, 1985).

Este processo tem como objetivo transformar a variável de entrada real em número fuzzy, que então passa pelo processo de inferências fuzzy e gera uma tomada de decisão e, ao final, transforma a resposta obtida em fuzzy para uma linguagem real, ou eletrônica; se for este o caso (WANG; MENDEL, 1994).

No contexto das equações relacionais, o pioneirismo deve-se às pesquisas desenvolvidas por Wang e Zhang (1992), cujas definições e teoremas permitiram o desenvolvimento teórico de um algoritmo para a construção de modelos, mediante o uso de equações relacionais fuzzy e raciocínio aproximativo.

Todas as informações sobre o processo, sobre as variáveis, sobre a forma de agir e sobre os comandos de processamento residem na base de conhecimento. É através dela que a variável de entrada é convertida para valores fuzzy no intervalo $[0,1]$, associada a funções de pertinência linguísticas e então efetuando a estratégia de controle determinada (WANG; MENDEL, 1992).

Um cálculo interno é realizado pelo modelo para determinar então se o valor daquela variável naquele momento é mais pertinente a qual função, trazendo consigo a condição linguística daquela variável naquele momento, e ao passar pelas regras no próximo passo permite uma tomada de decisão (CHEN; KUO, 1995).

Todo o processamento feito é com base em variáveis linguísticas e funções de pertinência, com determinados graus de pertinência para as variáveis defuzzificadas. Isso cria áreas como resposta (os graus de verdade) que devem ser traduzidos para valores reais novamente (WANG; MENDEL, 1992).

3 ARTIGO A – MAPEAMENTO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA NA BASE SCOPUS: ANÁLISE DA LÓGICA FUZZY EM SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Resumo

Este artigo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica da aplicação da lógica Fuzzy na otimização de resultados aplicados a sistemas de aterramento. A pesquisa constituiu-se de uma busca por artigos indexados na base de dados Scopus em 10 de junho de 2020. Foram encontrados 320 artigos com a aderência aos termos “Fuzzy e Electrical Grounding ou Electrical Earth”, para o período compreendido entre 1998 e 10 de junho de 2020. A China, com 219 publicações, destacou-se como a principal potência mundial na produção científica em lógica Fuzzy aplicado a sistemas de aterramento elétrico. As palavras-chave que mais sobressaíram nos artigos foram: sistema, aterramento, modelagem, investigação e lógica Fuzzy. A maior área de interesse para os termos da pesquisa foi a engenharia.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy. Aterramento. Bibliometria.

Abstract

This article aims to perform a bibliometric analysis of the application of Fuzzy logic in the optimization of results applied to grounding systems. The search consisted of a search for articles indexed in the Scopus database on June 10, 2020. 320 articles were found with the adherence to the terms “Fuzzy and Electrical Grounding or Electrical Earth”, for the period between 1998 and 10 June 2020. China, with 219 publications, stood out as the main world power in scientific production in Fuzzy logic applied to electrical grounding systems. The keywords that stood out most in the articles were: system, grounding, modeling, research and Fuzzy logic. The biggest area of interest for the search terms was engineering.

Keywords: Fuzzy Logic. Grounding. Bibliometrics.

3.1 INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico é responsável por garantir a segurança dos equipamentos e das pessoas. Por isso, o sistema de aterramento deve ser projetado para que possua a menor resistência possível e que os potenciais gerados por correntes de falta à terra não sejam superiores aos limites de segurança.

Existem vários fatores que influenciam o comportamento e o projeto do sistema de aterramento. Dentre eles se destacam: a resistividade do solo; a área a ser utilizada; a intensidade da corrente de falta fase-terra; a corrente de curto-circuito presumida; e a estratificação do solo.

A cada dia novos estudos são desenvolvidos com o objetivo de melhorar o desempenho e a otimização de projetos. A aplicação da inteligência artificial tem-se tornado uma metodologia eficiente e confiável na busca de melhores resultados em diversas análises e projetos de aterramento.

Coelho *et al.* (2014) desenvolveram um modelo aplicado a sistemas de aterramento por meio do método dos elementos finitos para determinar a distribuição do potencial elétrico no solo.

Wazen (2010), por meio dos algoritmos genéticos, conseguiu determinar os valores de resistência dos cabos de aterramento de uma estrutura metálica autoportante. Ochoa *et al.* (2015) aplicaram o algoritmo genético para refinar os resultados dos parâmetros em solos estratificados de duas camadas.

Em 2015, a lógica Fuzzy em Matlab foi usada na simulação do teste de integridade da malha de aterramento. Os fatores e parâmetros considerados para classificar a integridade do sistema de aterramento incluíram o condutor de aterramento (condutividade), resistência da terra e o eletrodo de aterramento (Ω -mm) (DIMAYUGA *et al.*, 2015).

Através do mapeamento da produção científica na base Scopus foi possível montar um base de dados de artigos que foi utilizado para a fundamentação teórica, apresentada no capítulo 2 deste estudo.

3.2 REFERENCIAL TEÓRICO

3.2.1 Aterramento

A principal finalidade do sistema de aterramento em uma instalação elétrica é a proteção das pessoas. O acidente mais comum em que as pessoas estão submetidas, principalmente trabalhadores de operação e manutenção de sistemas industriais, é o toque em partes metálicas energizadas (MAMED FILHO, 2017).

O choque elétrico é o efeito patofisiológico resultante da passagem de uma corrente elétrica através do corpo de uma pessoa ou de um animal. Dependendo do tempo e da intensidade da exposição, poderá ser fatal (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

A NBR-5410 (ABNT, 2008) estabelece que as massas metálicas devem ser ligadas a condutores de proteção, compondo uma rede de aterramento. Além disso, um dispositivo de proteção deve seccionar automaticamente a alimentação do circuito por ele protegido, sempre que uma falta entre parte viva e massa der origem a uma tensão de contato perigosa.

Aterramento é a ligação de estruturas ou instalações com a terra, com o objetivo de estabelecer uma referência para a rede elétrica e permitir o fluxo para a terra de correntes elétricas de naturezas diversas (CREDER, 2007).

A função do aterramento é proporcionar uma referência comum para as tensões do sistema. Eles devem estar presentes em todas as instalações elétricas, seja por motivos operacionais, proteção ou ambos. A terra, por apresentar em condições normais o mesmo potencial em todos os pontos, pode ser considerada como potencial neutro ou zero em relação ao qual se medem as outras tensões (TELLÓ *et al.*, 2007). Sua função principal é dispersar a corrente de falta para a terra sem causar diferenças de potenciais ou tensões induzidas perigosas para seres vivos ou que possam danificar equipamentos localizados nas proximidades (MATTOS, 2004).

3.2.2 Lógica Fuzzy

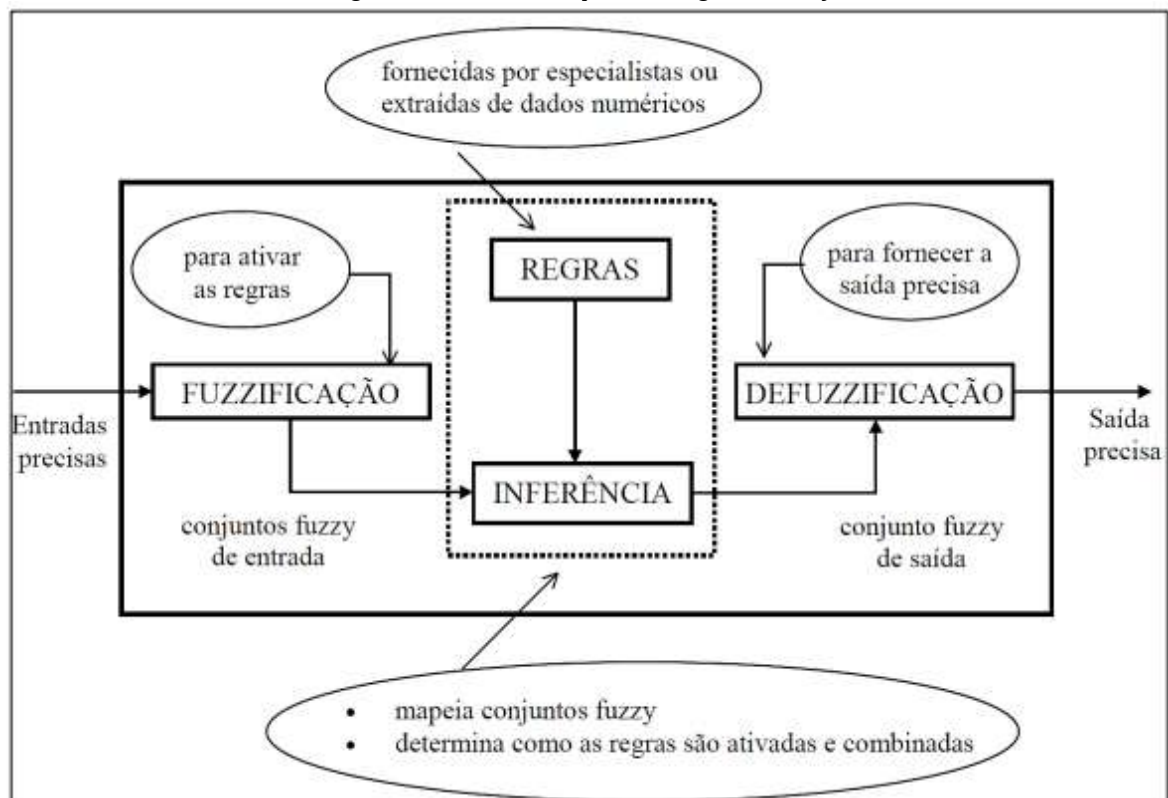
A teoria de conjuntos Fuzzy foi introduzida por Lotfi Asker Zadeh, em 1965, como uma teoria matemática aplicada a conceitos difusos. A partir daí, a pesquisa e a aplicação dessa teoria em sistemas de informação têm crescido. Uma área de aplicação da teoria Fuzzy é o chamado raciocínio aproximado, semelhante à forma do pensamento humano. Nesses casos, as variáveis linguísticas são representadas por conjuntos Fuzzy, interpretando uma variável linguística como uma variável cujos

valores são palavras ou sentenças em linguagem natural, além da existência de variação nas opções (ZADEH, 1965).

A modelagem e o controle Fuzzy são técnicas para se manusear informações qualitativas de uma maneira rigorosa. Tais técnicas consideram o modo como a falta de exatidão e a incerteza são descritas e, fazendo isso, tornam-se suficientemente poderosas para manipular de maneira conveniente o conhecimento (LEE, 1990).

A estrutura do sistema Fuzzy é composta por quatro subsistemas: fuzzificação; base de regras; máquina de inferência; e defuzzificação. Inicialmente ocorre a fuzzificação, em que as entradas são convertidas em valores linguísticos, com o uso de funções de pertinência. Posteriormente, ocorre o mecanismo de inferência. Nessa etapa são criadas as regras, combinando graus de pertinência para formar as variáveis de saída. Por fim, o conjunto Fuzzy tem a defuzzificação para obtenção da variável de saída (DADIOS, 2012). Na Figura 1 encontra-se a estrutura do sistema Fuzzy.

Figura 1 - Estruturação da lógica Fuzzy.



Fonte: CALDEIRA *et al.* (2007).

Após conhecimento sobre a estruturação da lógica Fuzzy a próxima etapa foi a descrição da metodologia utilizada.

3.3 MAPEAMENTO DA PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa científica é um procedimento que envolve intelectualidade, curiosidade e indagação do ser humano pela busca de novas verdades e explicações de determinados fatos sobre a realidade (SOUZA, 2018).

Com o aperfeiçoamento das tecnologias digitais e com o desenvolvimento de um conjunto de avanços relacionados às leis bibliométricas e estatísticas, a bibliometria ganhou popularidade no meio acadêmico. Com isso, houve mais buscas por embasamentos teóricos na conceituação, elaboração e metodologias das pesquisas (PIMENTA *et al.*, 2017).

A gestão e a avaliação da atividade científica exigem a formulação de técnicas e principalmente a formação de recursos humanos habilitados para compreender os fenômenos da criação do conhecimento e como transformá-lo em resultados econômicos ou estratégicos (SANTOS, 2003).

A avaliação da produção científica permite um entendimento sobre a análise de temáticas, o mapeamento de comportamentos e identificação de oportunidades para o desenvolvimento de áreas, assim como a investigação de campos do conhecimento já consolidados (SILVA *et al.*, 2012).

Os periódicos científicos, por sua vez, são um tipo de publicação que tem como um de seus principais objetivos divulgar os resultados de pesquisas científicas, sobre os mais variados assuntos nas mais diversas áreas do conhecimento humano. Representam o tipo de fonte de informação científica mais utilizada para recuperar e manter os cientistas atualizados acerca das descobertas e dos avanços das ciências (FACHIN; HILLESHEIM, 2006).

Tendo em vista o exposto, a seguir, são apresentados os resultados e discussão deste estudo.

3.4 METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma análise quantitativa do estudo bibliográfico. Os dados foram coletados por meio da pesquisa no Portal de Periódicos da Capes, na base Scopus, realizada no dia 10 de junho de 2020, com utilização dos termos “Fuzzy e Aterramento elétrico” (em inglês, *Fuzzy and electrical ground*).

A expressão de busca por meio de operadores booleanos foi: {("FUZZY and ELECTRICAL GROUNDING) or (ELECTRICAL EARTH")}. Na busca retornaram 320 artigos, distribuídos entre os anos de 1998 a 10 junho de 2020.

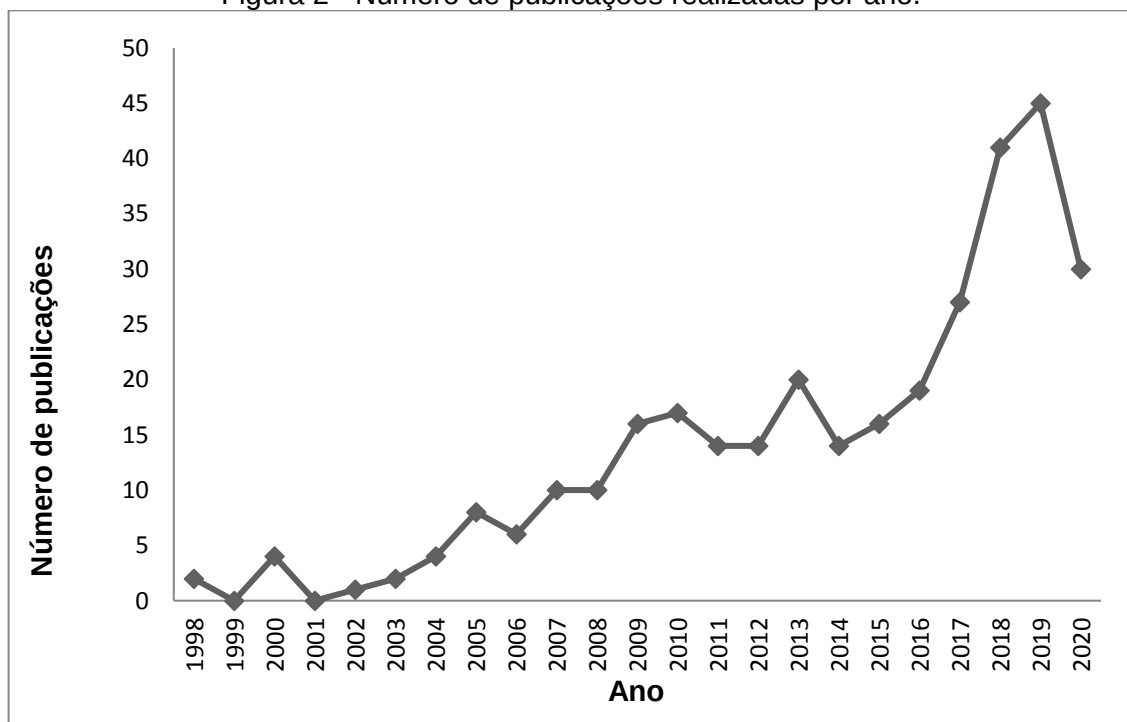
Os artigos foram analisados sob diversos parâmetros com o objetivo de extrair informações do quantitativo por país, autores com maiores citações, as principais áreas de interesse, as principais palavras-chave e os artigos com mais publicações.

Para elaboração do mapa das principais palavras-chave foi utilizado o software VOSviewer desenvolvido por Van Eck e Waltman (2017).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa realizada, sem aplicação filtros para período, entre os períodos de 1998 a 3 de junho de 2020 retornaram 320 artigos. Como pode ser visto na Figura 2, as duas publicações mais antigas ocorreram em 1998. Em 2019 foi o ano em que ocorreu o pico no número de publicações, com um total de 45 publicações.

Figura 2 - Número de publicações realizadas por ano.

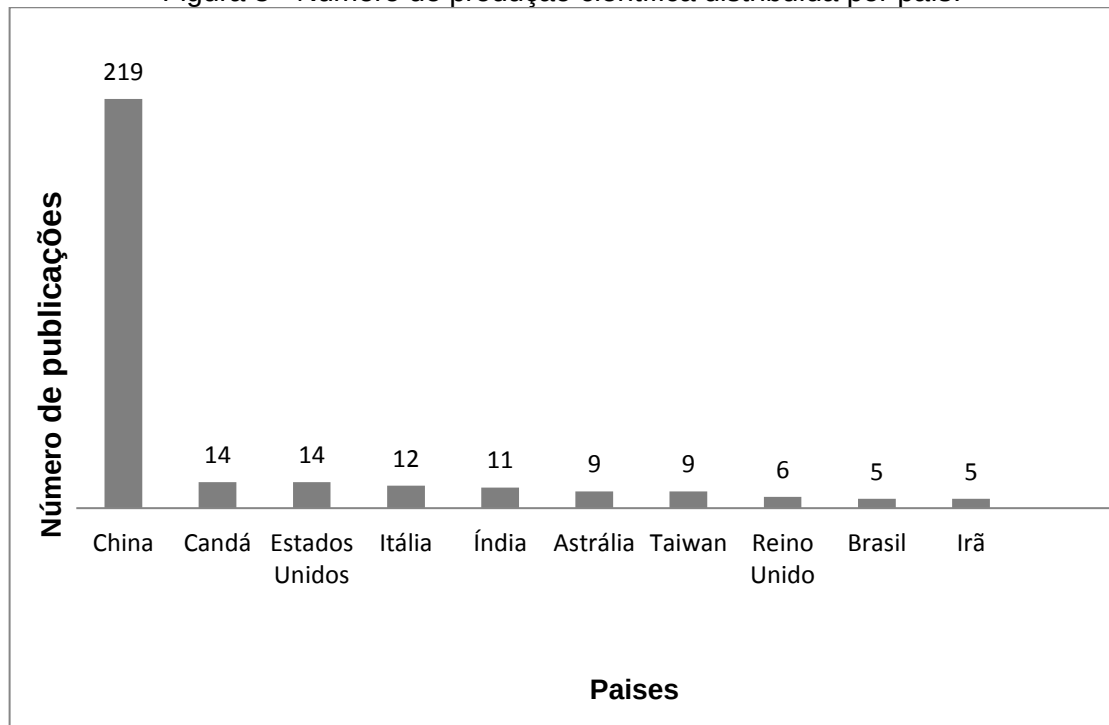


Fonte: Adaptado da base Scopus (2020).

Na Figura 3, é possível identificar os dez países que mais publicaram na base Scopus com o tema “Fuzzy e Aterramento Elétrico”. O Brasil, para o mesmo período de análise, publicou 5 artigos científicos. A China é o país com maior número de

publicações (219), seguidos pelos Estados Unidos e Canadá, ambos com 14 publicações.

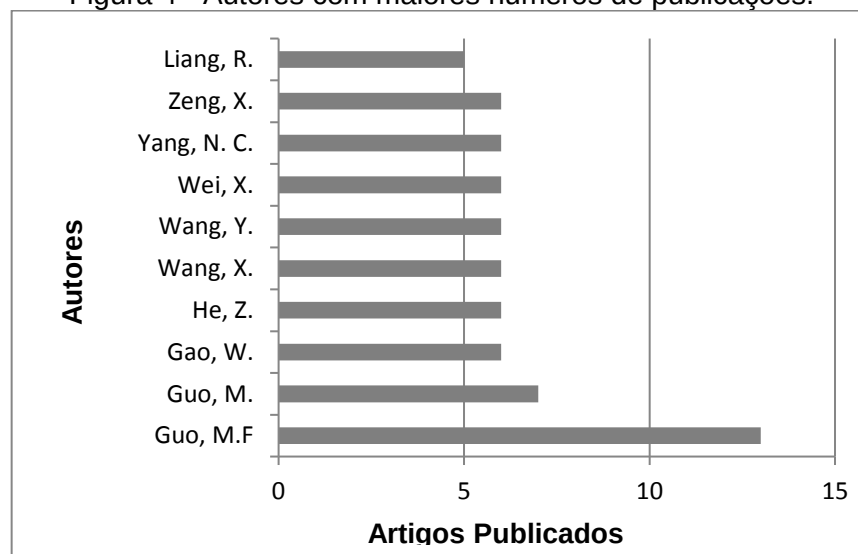
Figura 3 - Número de produção científica distribuída por país.



Fonte: Adaptado da base Scopus (2020).

Na Figura 4 encontra-se a lista dos dez autores com maior número de publicações. A maior parte dos autores tiveram 6 publicações, o autor de destaque para o número de publicações foi Mou-Fa Guo, com treze publicações.

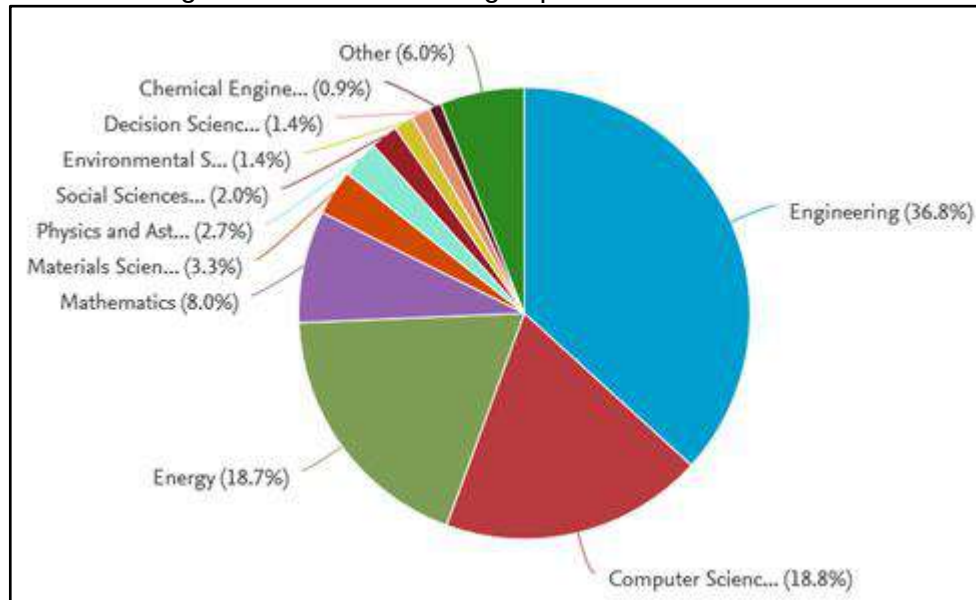
Figura 4 - Autores com maiores números de publicações.



Fonte: Adaptado da base Scopus (2020).

Nota-se na Figura 5 o número de artigos por áreas de interesse. Observa-se que a engenharia representa 36,8% do total das publicações, seguida pelas áreas de ciência da computação e energia, com 18,8 e 18,7%.

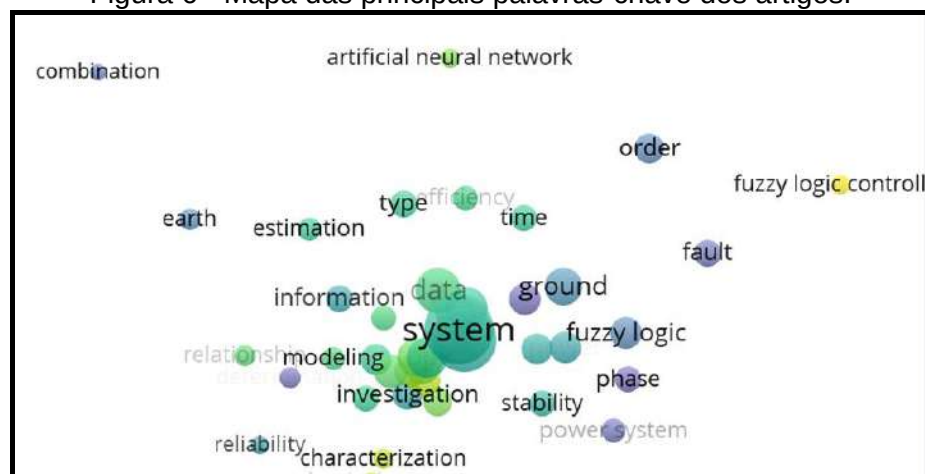
Figura 5 - Número de artigos por áreas de interesse.



Fonte: Adaptado da base Scopus (2020).

A Figura 6 representa o mapa das principais palavras-chave, elaborado no software VOSviewer. As palavras-chave que mais se destacaram nos artigos foram: *system* (sistema); *ground* (aterramento); *modeling* (modelagem); *investigation* (investigação) e *Fuzzy logic* (lógica Fuzzy).

Figura 6 - Mapa das principais palavras-chave dos artigos.



Fonte: Adaptado da base Scopus (2020).

As palavras apresentadas no mapa da Figura 6 possuem tamanho proporcional

a seus destaques em artigos.

3.6 PRINCIPAIS REFERÊNCIAS CITADAS

Dentre um total de 360 referências citadas para os artigos analisados, o artigo mais citado foi o de Erdinc, Vural e Uzunoglu (2009), com um total de 218 (Tabela 1). O estudo utilizou a estratégia de gerenciamento de energia baseada em lógica Wavelet e Fuzzy no sistema veicular híbrido desenvolvido.

Quadro 1 - As principais referências utilizadas nos artigos analisados na base Scopus para os termos {"FUZZY and ELECTRICAL GROUNDING) or (ELECTRICAL EARTH")}

Nº.	Autores	Ano	Título dos trabalhos	Fonte da publicação	Citações
1	Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M.	2009	A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system	Journal of Power Sources	218
2	Zhang, J., He, Z., Jia, Y.	2011	Fault line identification approach based on S-transform	Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering	38
3	Barua, A., Khorasani, K.	2011	Hierarchical fault diagnosis and fuzzy rule-based reasoning for satellites formation flight	IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems	26
4	Zhang, J. Li, X., He, Z.		Fault classification technique for power distribution network using adaptive network based fuzzy inference system	Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/ Proceedings of Chinese Society of Electrical Engineering	15

Fonte: Adaptado da base Scopus (2020).

Na segunda colocação das referências mais citadas está a pesquisa de Zhang, He e Jia (2011), com um total de 38 citações. Trata-se de um estudo de aplicação da lógica Fuzzy para aumento da confiabilidade em detecção de falhas em linhas de transmissão de energia elétrica.

O artigo de Barua e Khorasani (2011), com 26 citações, ocupa o terceiro lugar nesta análise. Seu estudo foi a proposta de uma nova estrutura e metodologia de diagnóstico de falhas hierárquicas em voo de naves espaciais. A sistemática consiste no raciocínio baseado em regras Fuzzy para aumentar o nível de autonomia alcançável no diagnóstico de falhas em estações terrestres.

Por último, ocupando a quarta posição dos artigos mais citados, com 15 citações o artigo de Zhang, J; Li, X. e He, Z. utilizaram a inferência Fuzzy para classificação de falha de redes de energia com neutro aterrado.

Por meio da análise das principais referências foi possível identificar a interface entre os termos de busca utilizados na base Scopus.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo descreveu e analisou o mapeamento da produção científica da aplicação da lógica Fuzzy em sistemas de aterramento. A busca retornou 230 artigos publicados no mundo ao longo de 22 anos. A China, com 219 publicações, destacou-se como a principal potência mundial na produção científica em lógica Fuzzy aplicado a sistemas de aterramento elétrico. A maior área de interesse para os termos da pesquisa foi a engenharia. As principais palavras-chave dos artigos foram sistema, aterramento, modelagem, investigação, e lógica Fuzzy. Dentre os autores mais citados, com um total de 193 citações, estão: ERDINC, O.; VURAL, B.; UZUNOGLU, M.

3.8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BARUA, A.; KHORASANI, K. Hierarchical Fault Diagnosis and Fuzzy Rule-Based Reasoning for Satellites Formation Flight. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, Montreal, Canada, [s.l.], v. 47, n. 4, p. 2435-2456, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/taes.2011.6034643>.

CALDEIRA, A. M.; MACHADO, M. A. S.; SOUZA, R. C.; TANSCHKEIT, R. **Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab®**. São Paulo: Cengage, 2007. 370 p.

COELHO, R.; PONTES, R. S. T.; PONTES, M. das G. S. R. Projeto de Malhas de Aterramento Através do Método dos Elementos Finitos. *In*: Simpósio Brasileiro de sistemas elétricos, 5., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2014.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 420 p.

DADIOS, E. P. **Fuzzy logic – controls, concepts, theories and applications**. Rijeka, Croatia. Intech, 2012. 428 p.

DAMOUSIS, I. G.; SATSIOS, K. J.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. Combined fuzzy logic and genetic algorithm techniques: application to an electromagnetic field problem: application to an electromagnetic) eld problem. **Elsevier**, Thessaloniki, Greece, p. 371-386, maio 2001.

DIMAYUGA, B. M.; JARON, K. M. E.; MONTERO, A. T.; PEROS, M. K. Z.; CALDO, R. B. Ground Grid Integrity Testing Using Matlab Fuzzy Logic Toolbox. **Lecture**

Notes In Electrical Engineering, Berlin, p. 759-766, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47200-2_80.

ERDINC, O.; VURAL, B.; UZUNOGLU, M. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system. **Journal of Power Sources**, Oxford, v. 194, n. 1, p. 69-380, out. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.04.072>.

FACHIN, G. R. B.; HILLESHEIM, A. I. A. **Periódico Científico: Padronização e Organização**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006.

HOCELLA JR., M. F. There's plenty of room at the bottom: nanoscience in geochemistry. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [s. l.], v. 66, n. 5, p.735-743, mar. 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7037\(01\)00868-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7037(01)00868-7).

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M.. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sacra - D.c. Luzzatto, 1995. 214 p.

LEE, C. C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. II. **IEEE Transactions on Systems**, California. Man, and Cybernetics, v. 20, n. 2, p. 419-435, 1990. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/21.52552>.

LIU, J.; SOUTHEY, R. D.; DAWALIBI, F. P. Application of advanced grounding design techniques to plant grounding systems. In: **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific**, DALIAN, 2005, p.1-6.

MAMED FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017. 71291 p.

MATTOS, M. A. **Técnicas de Aterramento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Okime, 2004. OCHOA, J. P.; OLIVEIRA, R. V. de; MOURA, R. A. R. de. Aplicação de Algoritmo Genético Aperfeiçoado por um Algoritmo Elipsoidal no Cálculo da Resistividade Considerando Solo Estratificado em Duas Camadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 6., 2015. **Anais [...]**. [s.l.], p.1-6, 2015. <http://dx.doi.org/10.20906/cps/sbse2016-0109>.

GUO, MOU-FA; QIU, WEI-QIANG; YANG, GENG-JIE. Model-Predictive-Control-Based Flexible Arc-Suppression Method for Earth Fault in Distribution Networks. **IN IEEE ACCESS**, Australia, v. 7, p. 16051-16065, 18 jan. 2019.

GUO, MOU-FA. Features-clustering-based earth fault detection using singular-value decomposition and fuzzy c-means in resonant grounding distribution systems. **Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Fuzhou, China, p. 97-108. dez. 2017.

PIMENTA, A. A.; PORTELA, A. R. M. R.; OLIVEIRA, C. B. de; RIBEIRO, R. M. A bibliometria nas pesquisas acadêmicas. **Scientia**, Sobral - CE, v. 4, n. 7, p. 1-13, 2017.

SANTOS, R. N. M. Produção Científica: Por que medir? O que medir? **Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, Campinas, v. 1, n. 1, p. 22-38, jul./dez. 2003.

SILVA, F. M. e; SOBRAL, N. V.; SANTANA, G. A.; CRUZ, T. L. Mapeamento da produção científica brasileira sobre acesso aberto: 2001 a 2011. **Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, Florianópolis - Sc, v. 17, n. 2, p. 19-35, 2012.

SOUZA, M. Produção científica brasileira: caminhos direcionadores para instituições de fomento à pesquisa. **Brazilian Journal of Information Science: research trends**, v. 12, n. 1, p. 46-60, maio 2018.

TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H. D.; MUSTAFA, T. I.; COELHO, V. L. **Aterramento Elétrico Impulsivo Em Baixa e Alta Frequências**. Porto Alegre - RS: Edipucrs, 2007. 328 p.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer Manual**. Leiden. 2017. Disponível em: https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.6.pdf. Acesso em: 12 jul. 2019.

WAZEN, R. N. Análise do Sistema de Aterramento de Estruturas Metálicas com aplicação de Algoritmos Genéticos. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 19., 2010, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo - SP: Sendi - 2010, 2010. p. 1-9.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, Oxford, v. 8, n. 3, p.338-353, jun. 1965. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x).

ZHANG, J.; HE, Z. Y.; JIA, Y. Fault line identification approach based on S-transform. **Proceedings of the CSEE**, Jiaozuo, China, v. 31, n. 10, p. 109-155, 2011.

4 ARTIGO B – O USO DA MODELAGEM FUZZY NA PREDIÇÃO DO DESEMPENHO DO ATERRAMENTO

Resumo

O aterramento elétrico é área de relevância da engenharia elétrica e, nos últimos anos, tem sido objeto de estudo por vários centros de pesquisa. Este trabalho tem como objetivo geral a aplicação de métodos analíticos e experimentais para análise da influência do espaçamento na resistência e no desempenho do aterramento em baixa frequência. Este estudo contribui para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e com baixo custo. De posse dos resultados obtidos nos métodos, buscou-se desenvolver um modelo de inteligência computacional com lógica Fuzzy que relacionasse as combinações das variáveis com o desempenho do aterramento. Por meio de método experimental e analítico, o melhor desempenho encontrado foi de aproximadamente 98%, valor correspondente ao espaçamento quatro vezes superior ao comprimento da haste. Para distâncias próximas a um terço do comprimento da haste o desempenho foi abaixo dos 70%. A modelagem de inteligência computacional com a lógica Fuzzy foi desenvolvida por meio do software Matlab. Devido aos pequenos intervalos das variáveis de entrada e à linearidade existente, os melhores resultados encontrados na modelagem foram com uso da função de pertinência do tipo trapezoidal. A menor divergência encontrada entre os desempenhos dos modelos desenvolvidos e dos desempenhos analisados do aterramento foi de 6,3%.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy. Aterramento. Desempenho. Modelagem.

Abstract

Electrical grounding is an area of relevance for electrical engineering and, in recent years, has been the object of study by several research centers. This work has as a general objective the application of analytical and experimental methods to analyze the influence of spacing on resistance and low-frequency grounding performance. This study contributes to the development of more efficient and low-cost projects. With the results obtained in the methods, it was sought to develop a computational intelligence model with Fuzzy logic that related the combinations of the variables with the grounding performance. Through an experimental and analytical method, the best performance found was approximately 98%, a value corresponding to the spacing four times greater than the length of the nail. For distances close to one third of the length of the rod, the performance was below 70%. The computational intelligence modeling with Fuzzy logic was developed using the Matlab software. Due to the small intervals of the input variables and the existing linearity, the best results found in the modeling were with the use of the trapezoidal pertinence function. The smallest divergence found between the performances of the developed models and the analyzed performances of the grounding was 6.3%.

Keywords: Fuzzy Logic. Grounding. Performance. Modeling.

4.1 INTRODUÇÃO

Toda instalação elétrica de alta e baixa tensão, para funcionar com desempenho satisfatório e ser suficientemente segura contra risco de acidentes fatais, deve possuir um sistema de aterramento dimensionado adequadamente para as condições de cada projeto (MAMED FILHO, 2017). A principal função do aterramento é dispersar a corrente de falta para a terra sem causar diferenças de potenciais ou tensões induzidas perigosamente para seres vivos ou que possam danificar equipamentos localizados nas proximidades (MATTOS, 2014).

Os sistemas de aterramento se comportam como uma impedância complexa ao serem percorridos por uma corrente impulsiva. Eles podem ser representados por resistências, indutâncias e capacitâncias, principalmente quando da incidência de surtos atmosféricos. Em frequência industrial, devido à pequena influência das reatâncias indutivas e capacitivas, considera-se que o solo se comporta como uma resistência pura (TELLÓ *et al.*, 2007).

A avaliação simples de um sistema de aterramento em função da resistência obtida por meio de um terrômetro não reflete as reais condições a que estará submetido um equipamento ou instalação protegida por esse sistema (RAIZER *et al.*, 2016). Já a resistência e o desempenho do sistema de aterramento estão associados à resistividade e tipo do solo, geometria e constituição da haste de aterramento, formato em que as hastes são distribuídas, etc. (CAPELLI, 2000).

Dentre os vários fatores que influenciam na resistência e impedância do sistema de aterramento, este estudo busca associar o desempenho do sistema em função do espaçamento entre eletrodos. O desempenho abordado neste estudo é determinado pela relação entre impedâncias em regime permanente em baixa frequência e as resistências medidas em função dos espaçamentos entre eletrodos.

Quando o aterramento é projeto somente pelo valor da resistência a presença as reatâncias indutivas e capacitivas podem afetar o valor da impedância e o desempenho do aterramento, como por consequência pode-se citar a diminuição da corrente de falta para à terra e aumento do tempo de atuação da proteção (Disjuntor, fusível ou interruptor diferencial (DR)).

De posse dos resultados dos desempenhos, este artigo tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de inteligência computacional, com uso da lógica difusa Fuzzy, a fim de associar combinações das variáveis de entrada com seus

respectivos desempenhos. O ambiente computacional utilizado para o desenvolvimento e simulação da lógica difusa Fuzzy foi o Toolbox Fuzzy do software Matlab.

4.2 REFERENCIAL TEÓRICO

4.2.1 Lógica Fuzzy

A teoria dos conjuntos nebulosos foi desenvolvida a partir de 1965 por Lotfi Zadeh, para tratar do aspecto vago da informação. A teoria dos conjuntos nebulosos, quando utilizada em um contexto lógico, como o de sistemas baseados em conhecimento, é conhecida como lógica nebulosa, lógica difusa ou lógica “Fuzzy” (SANDRY; CORREA, 1999).

A lógica Fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos Fuzzy. Ela difere dos sistemas lógicos tradicionais em suas características e seus detalhes. Nessa lógica, o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição de relações nebulosas (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

A Lógica Fuzzy utiliza variáveis linguísticas no lugar de variáveis numéricas. Variáveis linguísticas admitem como valores apenas expressões linguísticas (ou termos primários), como "muito grande", "pouco frio", "mais ou menos jovem", que são representadas por conjuntos Fuzzy (FURTADO, 2012).

Os conjuntos nebulosos (Fuzzy Sets) são funções que mapeiam, em uma escala de zero a um, essa pertinência de um determinado elemento ao conjunto. O valor zero indica que o elemento não pertence ao conjunto, enquanto o valor um (1) significa que o elemento é completamente representativo do conjunto; valores entre esses dois indicam graus intermediários de pertinência (WUERGES; BORBA, 2010).

Nas aplicações, a teoria Fuzzy tem sido empregada em diversas áreas, como na engenharia, na medicina, na biologia e também na economia (WONG e WANG, 1991).

Segundo Sampaio (2004), o ciclo do processo Fuzzy é composto de cinco elementos:

- 1- Fuzzificação** - Transforma as variáveis de entrada (medidas crisp ou exatas) em conjuntos nebulosos que representam incertezas. Transforma informação quantitativa em informação qualitativa, através de um processo de generalização;
- 2- Base das Regras** - Direcionam o conhecimento do sistema através das regras que regem as relações das variáveis;
- 3- Inferência** - O mecanismo da inferência avalia a relevância das regras de controle num determinado momento e decide qual saída deve ter o processo;
- 4- Agregação** - São as técnicas utilizadas na obtenção de um conjunto nebuloso de saída a partir de um conjunto de inferência nas regras; e
- 5- Defuzzificação** - Converte a decisão tomada pelo mecanismo de inferência num valor Crisp (valor numérico), transformando a informação qualitativa em informação quantitativa, por meio de um processo de especificação.

A próxima etapa deste estudo foi a busca de conhecimento científico a respeito do comportamento do aterramento formado por hastes linhadas.

4.2.2 Aterramento

A caracterização do solo, bem como o seu comportamento quando de corrente elétrica, é de fundamental importância na análise de fenômenos ligados à aterramento elétrico. A caracterização do solo é um dos parâmetros mais críticos que afetam o projeto de um sistema de aterramento. Em baixas frequências, a condutividade elétrica, a permissividade elétrica e a permeabilidade elétrica são consideradas constantes (TELLÓ *et al.*, 2007).

Os principais fatores que podem alterar o valor da resistividade do solo são: o tipo de solo, a umidade, temperatura, estratificação oriunda de sua formação geológica, além da quantidade de sais dissolvidos (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Os tipos de solo não possuem um valor específico de resistividade, pois fatores externos como a temperatura e índice de precipitação da região variam conforme a época do ano e podem causar mudanças acentuadas no valor da resistividade do terreno. Na Tabela 1 encontram-se os principais tipos de solos e suas respectivas resistividades.

Tabela 1 - Resistividade dos solos

Tipos de solo	Resistividade ($\Omega.m$)
Lama	5 a 100
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Areia molhada	1.300
Areia seca 3000 a 8000	3.000 a 8.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Fonte: Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).

Segundo Kindermann e Campagnolo, a resistência de aterramento efetuado por uma única haste é calculada de acordo com a equação (1).

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi.L} \ln \frac{4L}{d} \quad (1)$$

Onde:

R_1 - Resistência de uma haste (Ω);

ρ_a - Resistividade do solo ($\Omega.m$);

L - Comprimento da haste (m);

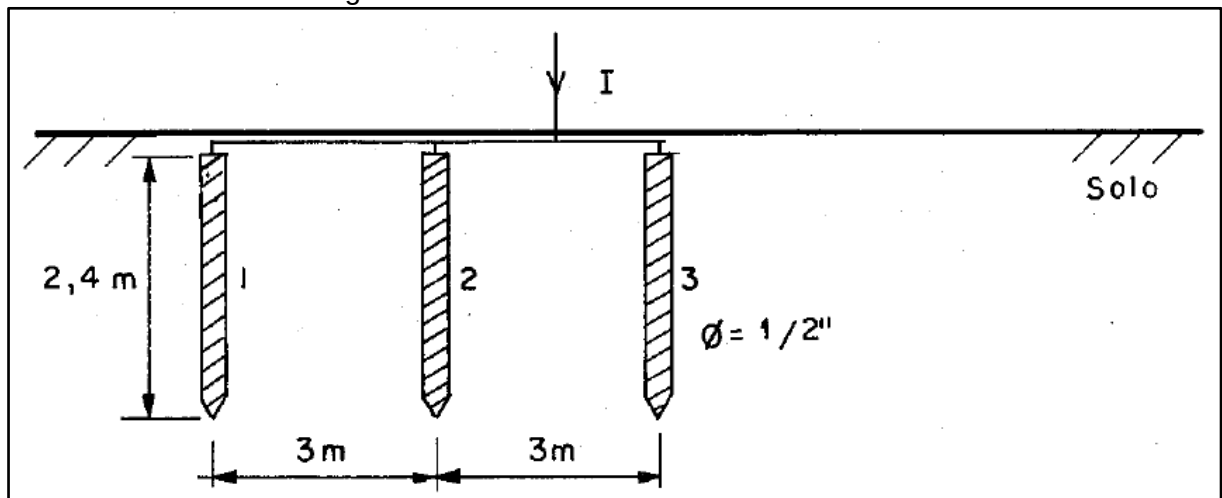
d - Diâmetro da haste (m).

Existem diversas geometrias de aterramento elétrico. Quando se deseja avaliar a resistência de um sistema composto de eletrodos interligados em geometria simples, imersos em solo homogêneo, existem métodos simplificados que permite a obtenção aproximada do desempenho. Nesses métodos é empregado um reduzido conjunto de equações (TELLÓ, 2007).

4.2.2.1 Aterramento com Hastes Alinhadas

Segundo Kindermann e Campagnolo (1995), existem diversos tipos de configurações de sistemas de aterramento, na Figura 7 encontra-se a configuração para 3 hastes alinhadas, com diâmetro de 1/2", 2,40 m de comprimento, com espaçamento de 3 m.

Figura 7 – Hastes de aterramento alinhadas.



Fonte: Fonte: Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).

Nesse tipo de configuração ocorre zona de interferência das linhas equipotenciais que causa área de bloqueio do fluxo de corrente elétrica. Como resultado ocorre aumento da resistência individual e, dessa forma, não podem ser consideradas simplesmente com associação paralela de resistores. Isso se deve ao fato da existência de interferência mútua entre as hastes. A resistência de dois conjuntos comporta-se conforme equação (2).

$$(R_{1\text{haste}}/2) < R_{2\text{hastes}} < R_{1\text{haste}} \quad (2)$$

A resistência individual de uma haste “h” (R_h), inserida em um sistema de aterramento formado por conjunto de hastes alinhadas em paralelo, pode ser calculada conforme equação (3):

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1}^n R_{hm} \quad (3)$$

Onde:

R_h – Resistência apresentada pela haste “h” inserida no conjunto considerando as interferências de outras hastes;

n – Número de hastes paralelas;

R_{hh} – Resistência individual de cada haste sem a presença de outras hastes;

R_{hm} – Acréscimo da resistência na haste “h” devido à interferência mútua da haste “m”, esta variável pode ser determinada com uso da equação (4).

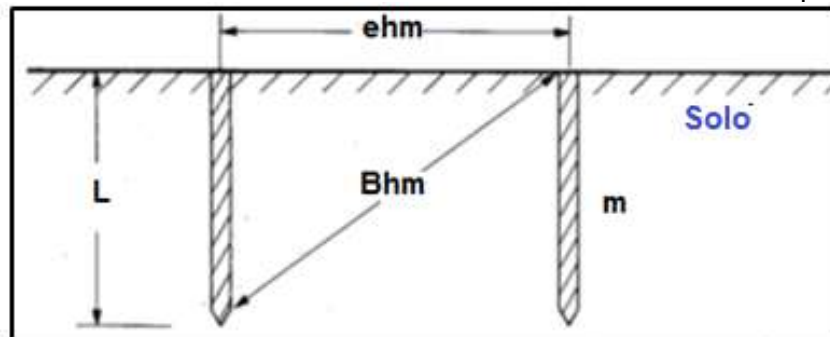
$$R_{hm} = \frac{\rho a}{4 \pi L} \ln \left[\frac{(B_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (B_{hm} - L)^2} \right] \quad (4)$$

e_{hm} – Espaçamento entre a haste “h” e a haste “m” (m);

L – Comprimento da haste (m).

Na Figura 8 estão representados os parâmetros de interferência mútua entre duas hastes em paralelo.

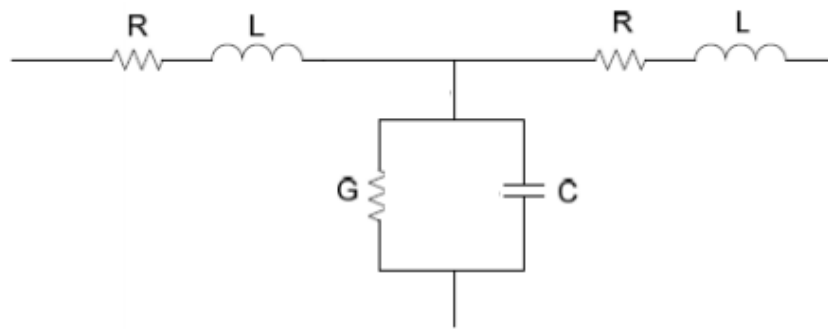
Figura 8 - Parâmetros da resistência mútua entre duas hastes em paralelo.



Fonte: Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).

Quando o sistema de aterramento é analisado em parâmetros de alta frequência devem ser consideradas as resistências, capacitâncias e indutâncias do circuito. Na Figura 9 encontra-se o circuito T, que representa um sistema de aterramento composto por um único eletrodo. Neste circuito a resistência (R) do eletrodo está em série com a indutância (L) do sistema. Em paralelo estão representadas a condutância (G) e a capacitância (C) do solo (BARRACHINA; CATALAN-IZQUIERDO; CAÑAS-PEÑUELAS, 2011).

Figura 9 - Circuito equivalente do aterramento composto por um único eletrodo



Fonte: Adaptado de BARRACHINA, CATALAN-IZQUIERDO e CAÑAS-PEÑUELAS (2011).

O sistema de aterramento quando é submetido a uma tensão alternada, a corrente elétrica de dispersão no solo é limitada pela impedância do aterramento (Z) (BRÉDER; SILVA, 2016).

$$Z(\Omega) = \frac{V}{I} \quad (5)$$

Onde:

V - Tensão elétrica (V);

Z - Impedância (Ω);

I - Corrente elétrica (A).

Segundo Hayt, Kemmerly e Durbin (2014), a impedância (Z) é definida pela razão entre a tensão fasorial (V) e a corrente fasorial (I) do circuito.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

A parte inicial deste estudo busca, por meio de método experimental e analítico, determinar a influência do espaço entre hastes no comportamento do sistema de aterramento linear (hastes alinhadas). A análise da impedância foi realizada em regime permanente na frequência industrial (60 Hz).

Os experimentos foram realizados em um período de três dias. Na Tabela 2 encontra-se a lista das ferramentas e instrumentos utilizados.

Tabela 2 - Materiais utilizados no experimento

Materiais/Ferramentas	Quantidade
Alicate Universal	1 unidade
Chave ajustável	1 unidade
Terrômetro Minipa MTR-1522 Minipa	1 unidade
Alicate Wattímetro	1 unidade
Haste de aterramento ½" x 1,2 m	3 unidades
Conector para haste	3 unidades
Cabo 6 mm ²	10 metros
Marreta	1 unidade
Resistência de 230,4 Ohms	1 unidade
Trena de 50 metros	1 unidade
Disjuntor termomagnético, monopolar B10 A	1 unidade

Fonte: Própria (2020).

Na Figura 10 encontram-se os instrumentos de medição utilizados nos experimentos: o terrômetro, o alicate wattímetro e o alicate amperímetro.

Figura 10 - Instrumentos de medição da resistência, corrente e potência do sistema de aterramento.



Fonte: Própria (2020).

Os experimentos foram realizados com cabos enterrados a uma profundidade de 15 cm em um solo cuja resistividade medida foi equivalente a 40 Ω .m. Com utilização do terrômetro, alicate amperímetro e alicate wattímetro foram efetuadas medições de corrente, resistência e potência aparente do sistema. As medições das resistências do sistema aterramento foram realizadas pelo método da queda de potencial, estabelecido pela norma NBR-15749 (ABNT, 2009).

Para criação do sistema Fuzzy foi necessário definir as variáveis de entrada, o conjunto de regras linguísticas, método de inferência Fuzzy e um defuzzificador, responsável para geração um número real de saída. As variáveis de entrada do sistema Fuzzy foram espaçamento (ESP(m)), fator de redução da resistência (K) e a corrente elétrica (CORR(A)).

A variável (K) foi obtida por meio de medições realizadas com o terrômetro e cálculo de relação com a resistência medida para uma haste. O sistema medido era composto por três hastes de 1,2 m alinhadas e interligadas por um cabo de 6 mm².

A resistência do sistema (R_{sistema}) pode ser determinada pela resistência de uma haste multiplicada pelo fator de redução (K), conforme equação (6).

$$R_{\text{sistema}} (\Omega) = R1 \text{ haste} \cdot K \quad (6)$$

Onde:

R1 haste - resistência de uma haste (Ω);

K - Fator de redução.

O experimento de campo foi realizado no município de Campos dos Goytacazes (RJ), em uma localidade cuja resistividade pode ser caracterizada como baixa, conforme Figura 11.

Figura 11 - Local onde foram realizados os experimentos.



Fonte: Google Maps (2020).

4.4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 encontram-se os fatores de redução (K), obtidos de forma analítica a partir das medições de resistências para diferentes espaçamentos.

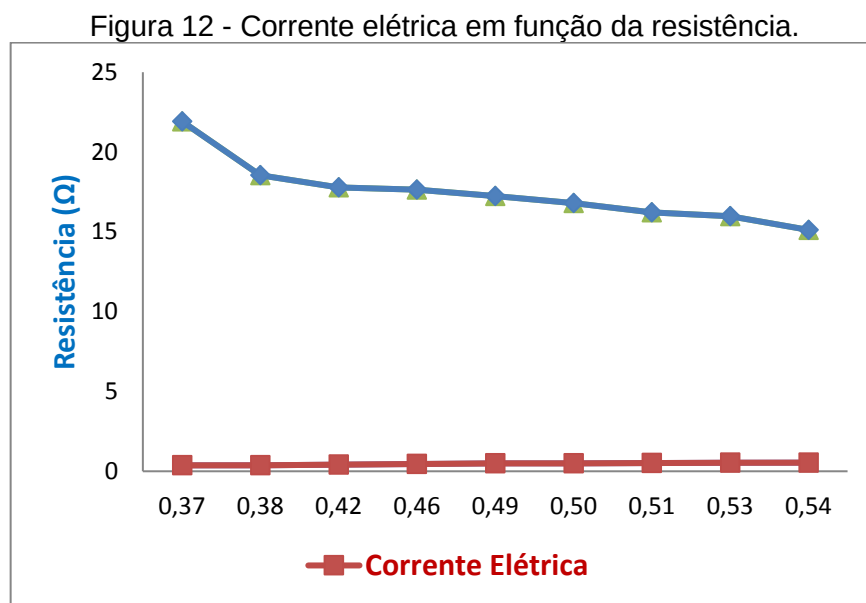
Tabela 3 - Fator de redução em função do espaçamento entre as hastes

Espaçamento entre hastes (m)	Fator de redução (K)
0,45	0,431
0,60	0,364
0,90	0,349
1,20	0,347
1,80	0,339
2,40	0,330
3,00	0,318
3,60	0,314
4,80	0,299

Fonte: Própria (2020).

Os valores da variável corrente elétrica foram obtidos por meio de medições utilizadas com alicate amperímetro. Nas medições das correntes elétricas, com objetivo de limitá-las, foi feita a inserção de uma resistência de 230,4 Ohms em série com o sistema de aterramento. Foi aplicada a tensão alternada de fase 127 V na frequência industrial, 60 Hz. Na Figura 12 encontram-se os resultados das medições de correntes elétricas do sistema de aterramento em função das resistências medidas.

Como pode ser observado no gráfico, com a diminuição da resistência do aterramento ocorre elevação da corrente elétrica, fenômeno fundamentado pela lei de Ohm.



Fonte: Própria (2020).

A impedância do aterramento é oposição à passagem da corrente elétrica devido à resistência equivalente do sistema e as reatâncias indutâncias e capacitâncias em função da frequência.

Segundo Telló *et al.* (2007), a impedância (Z) do sistema de aterramento é determinada pela equação (7).

$$Z = \sqrt{\frac{R+jwL}{G+jwC}} \quad (7)$$

Onde:

R – Resistência (Ω);

G – Condutância (S);

jwL – Reatância indutiva (Ω);

jwC – Reatância capacitiva (Ω).

Por meio da relação entre a tensão de alimentação utilizada nos experimentos e os resultados das medições correntes elétricas foi possível avaliar as impedâncias dos circuitos para vários espaçamentos. O desempenho do sistema de aterramento foi determinado pela relação entre as impedâncias e as resistências medidas para os respectivos espaçamentos. Na Tabela 4 encontram-se as variáveis que serão utilizadas para o desenvolvimento do modelo de inteligência computacional com uso da lógica Fuzzy no software Matlab. Na primeira coluna encontram-se os espaçamentos experimentados com as hastes alinhadas, seguido das resistências medidas com utilização do terrômetro. Por meio das medições das correntes elétricas e resistências foi possível através do modelo de inteligência computacional determinar o desempenho do sistema de aterramento

Tabela 4 - Variáveis de entrada e saída para desenvolvimento do modelo Fuzzy

Espaçamento entre hastes (m)	Resistência medida (Ω)	Corrente medida a 127 V em série com a Resistência de 230 Ω	Desempenho (%) a 60 Hz	Fator de redução (K)
0,45	21,92	0,37	67,0	0,431
0,60	18,55	0,38	68,8	0,364
0,90	17,78	0,42	76,1	0,349
1,20	17,65	0,46	83,3	0,347
1,80	17,23	0,50	88,7	0,339
2,40	16,80	0,50	90,6	0,330
3,00	16,21	0,51	92,4	0,318
3,60	15,97	0,53	96,0	0,314
4,80	15,22	0,54	97,8	0,299

Fonte: Própria (2020).

O modelo foi desenvolvido com base no fundamento da impedância dos circuitos, de forma em que os maiores rendimentos são aqueles em que os valores de impedâncias se aproximam dos valores das resistências. Desta forma a presença de influências eletromagnéticas, reatâncias indutivas e ou capacitivas, podem ser desconsideradas. Por fim na última coluna encontram-se os valores do fator de redução da resistência de aterramento, conforme mencionado na equação 6.

Após serem estabelecidas as variáveis e determinação do desempenho para cada espaçamento, a etapa seguinte foi o desenvolvimento do modelo.

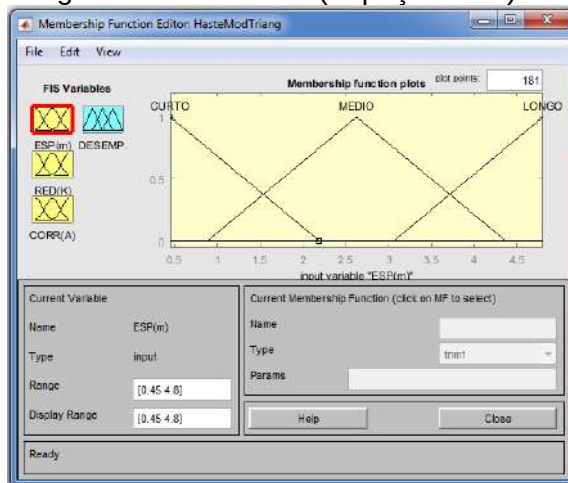
4.4.1 Modelagem com Função do Tipo Triangular

De posse dos dados e resultados encontrados por meio de experimentos, o primeiro modelo Fuzzy foi desenvolvido, com funções de pertinências do tipo triangular. Esse tipo de função foi aplicado nas entradas e na saída do modelo de inteligência computacional Fuzzy. A primeira variável de entrada do sistema foi o espaçamento. Para essa função foram criadas três funções de pertinência, conforme Figura 13.

Na Figura 14 encontra-se a segunda variável de entrada: o fator de redução (K). Para essa entrada foram criadas três funções de pertinência: baixo, médio e alto. A terceira variável de entrada foi a corrente elétrica. Nela as três funções de pertinência foram: baixa, média e alta (Figura 15).

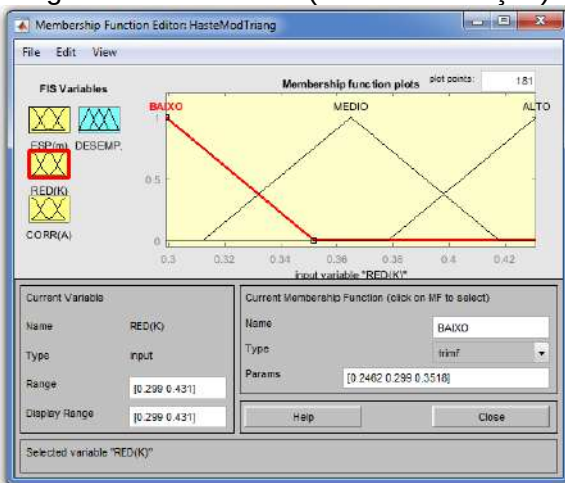
Com três funções de pertinência (baixo, médio e alto), na Figura 16 encontra-se a saída do modelo com suas respectivas faixas de valores de desempenho.

Figura 13 - Entrada 1 (Espaçamento)



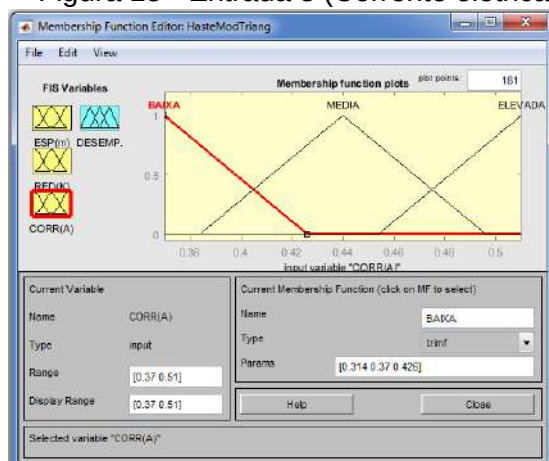
Fonte: Toolbox Fuzzy Matlab (2020).

Figura 14 - Entrada 2 (Fator de redução)



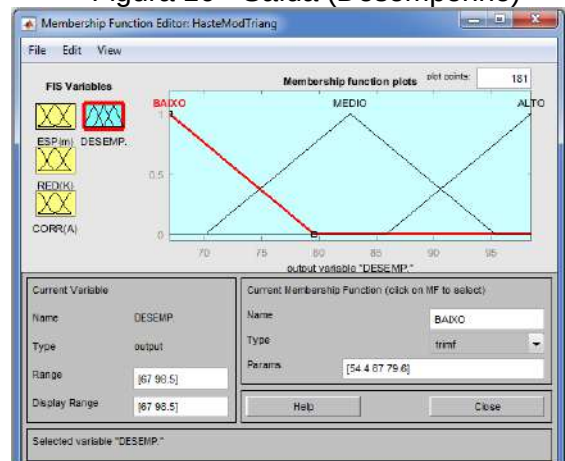
Fonte: Toolbox Fuzzy Matlab (2020).

Figura 15 - Entrada 3 (Corrente elétrica)



Fonte: Toolbox Fuzzy Matlab (2020).

Figura 16 - Saída (Desempenho)



Fonte: Toolbox Fuzzy Matlab (2020).

Nesse modelo foram criadas 27 regras de associação. Na Tabela 5 encontram-se as associações entre as funções das entradas com as funções da saída.

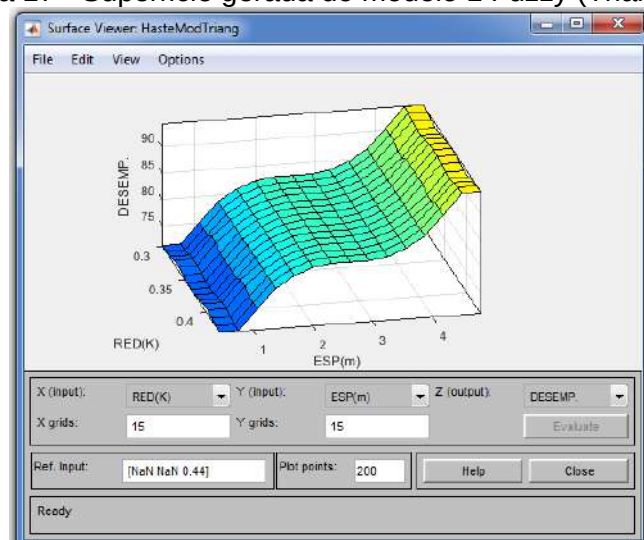
Tabela 5 - Regras de associação do modelo triangular

Espaço	Redução	Corrente	Desempenho
CURTO	BAIXO	BAIXA	BAIXO
CURTO	BAIXO	MÉDIA	BAIXO
CURTO	BAIXO	ELEVADA	BAIXO
CURTO	MÉDIO	BAIXA	BAIXO
CURTO	MÉDIO	MÉDIA	BAIXO
CURTO	MÉDIO	ELEVADA	BAIXO
CURTO	ALTO	BAIXA	BAIXO
CURTO	ALTO	MÉDIA	BAIXO
CURTO	ALTO	ELEVADA	BAIXO
MÉDIO	BAIXO	BAIXA	MÉDIO
MÉDIO	BAIXO	MÉDIA	MÉDIO
MÉDIO	BAIXO	ELEVADA	MÉDIO
MÉDIO	MÉDIO	BAIXA	MÉDIO
MÉDIO	MÉDIO	MÉDIA	MÉDIO
MÉDIO	MÉDIO	ELEVADA	MÉDIO
MÉDIO	ALTO	BAIXA	MÉDIO
MÉDIO	ALTO	MÉDIA	MÉDIO
MÉDIO	ALTO	ELEVADA	MÉDIO
LONGO	BAIXO	BAIXA	ALTO
LONGO	BAIXO	MÉDIA	ALTO
LONGO	BAIXO	ELEVADA	ALTO
LONGO	MÉDIO	BAIXA	ALTO
LONGO	MÉDIO	MÉDIA	ALTO
LONGO	MÉDIO	ELEVADA	ALTO
LONGO	ALTO	BAIXA	ALTO
LONGO	ALTO	MÉDIA	ALTO
LONGO	ALTO	ELEVADA	ALTO

Fonte: Própria (2020).

A Figura 17 representa a superfície dos resultados dos desempenhos para os fatores de redução e espaçamentos entre as hastes.

Figura 17 - Superfície gerada do modelo 1 Fuzzy (Triangular).



Fonte: Toolbox Matlab, 2020.

Na Tabela 6 encontram-se os resultados dos desempenhos analisados e encontrados por meio de simulações do modelo Fuzzy triangular. A máxima divergência desse modelo para as dos desempenhos determinado foi de 11,1 % para o desempenho de 96%, conforme penúltima linha da tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do desempenho do modelo 1

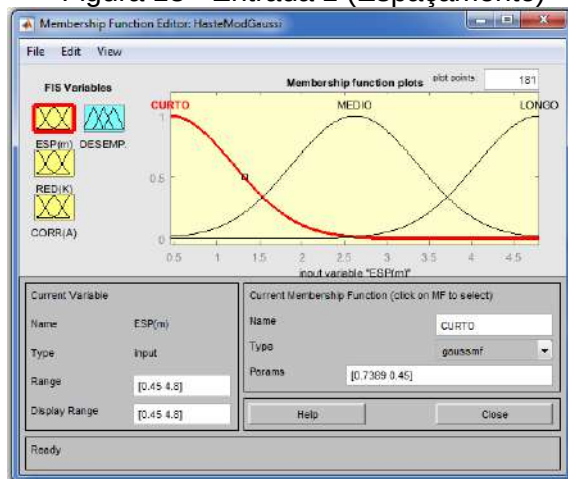
Desempenho (%) a 60 Hz	Desempenho encontrado no Fuzzy Triangular
67,0	71,1
68,8	71,2
76,1	71,9
83,3	77,3
88,7	81,9
90,6	83,5
92,4	83,2
96,0	84,9
97,8	94,4

Fonte: Própria (2020).

4.4.2 Modelagem com Função do Tipo Gaussiana

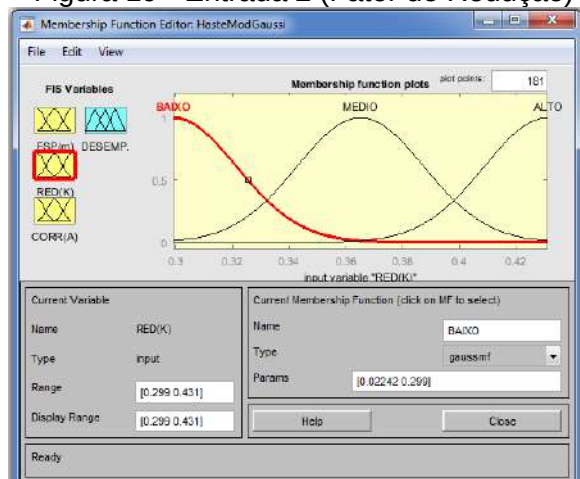
Nesse segundo modelo foram mantidas as variáveis de entrada, a variável de saída e as mesmas regras do modelo triangular. As funções de pertinências das entradas e saídas foram modificadas do tipo triangular para a Gaussiana. Foram feitas simulações e ajustes de forma a encontrar os melhores desempenhos possíveis. Nas Figuras 18, 19 e 20 encontram-se as variáveis de entrada do modelo e na Figura 21 pode ser observada a saída com as funções do tipo Gaussiana.

Figura 18 - Entrada 1 (Espaçamento)



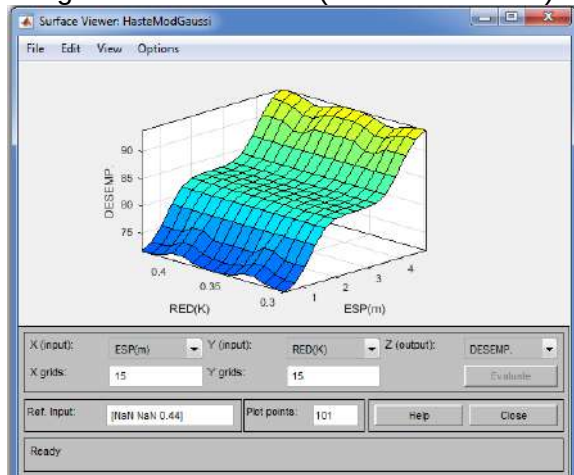
Fonte: Toolbox Matlab (2020).

Figura 19 - Entrada 2 (Fator de Redução)



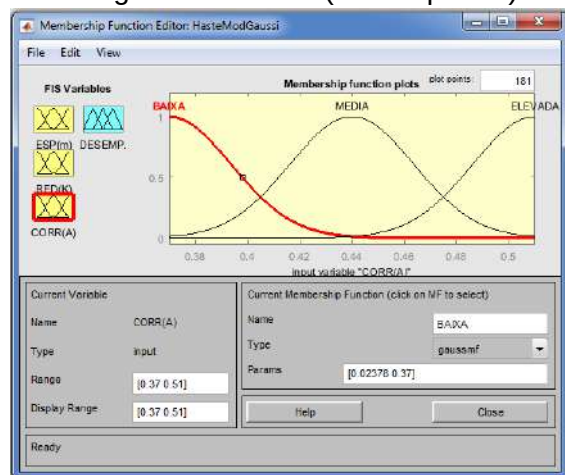
Fonte: Toolbox Matlab (2020).

Figura 20 - Entrada 3 (Corrente elétrica).



Fonte: Toolbox Matlab (2020).

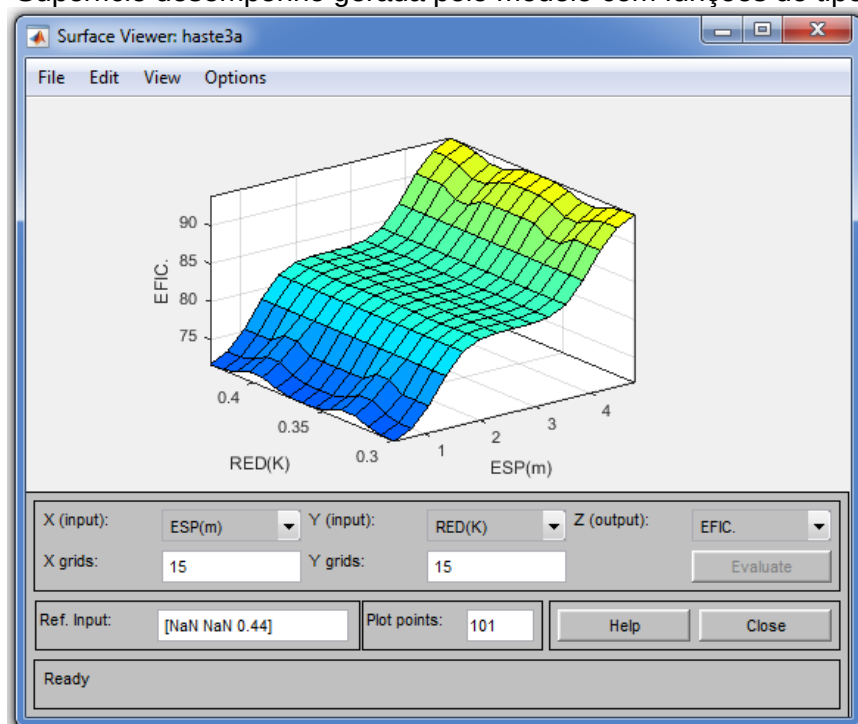
Figura 21 - Saída (Desempenho).



Fonte: Toolbox Matlab (2020).

A Figura 22 representa a superfície dos resultados do desempenho do modelo com uso de funções do tipo Gaussiana.

Figura 22 - Superfície desempenho gerada pelo modelo com funções do tipo Gaussiana



Fonte: Toolbox Matlab (2020).

Os valores dos desempenhos a 60Hz são resultantes da análise das resistências e impedâncias em função do espaçamento. Na Tabela 7 encontram os resultados das simulações para a função do tipo Gaussiana.

Tabela 7 - Resultados do desempenho do modelo Gaussiano

Desempenho (%) a 60 Hz	Desempenho encontrado no modelo Gaussiano
67,0	70,2
68,8	70,6
76,1	73,5
83,3	73,6
88,7	83,1
90,6	84,9
92,4	86,0
96,0	89,6
97,8	95,8

Fonte: Própria (2020).

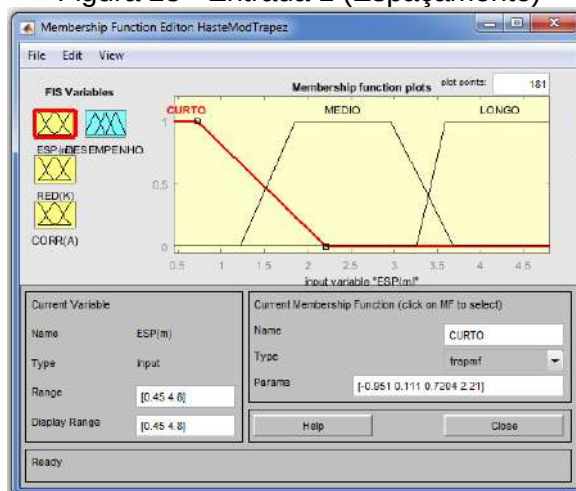
A máxima divergência desse modelo para o desempenho determinado foi de 9,7 % para o desempenho de 83,3%, da linha 4 da tabela 7.

4.4.3 Modelagem com Função do Tipo Trapezoidal

Com proposta de desenvolver um modelo que melhor determinasse o desempenho do sistema de aterramento nesse modelo foram utilizadas funções de pertinência do tipo Trapezoidal. Conforme aconteceu no modelo com funções do tipo Gaussiana, neste modelo foram mantidos os mesmos quesitos do modelo inicial. As mudanças foram a alteração do tipo de função para Trapezoidal e os ajustes das delimitações das funções.

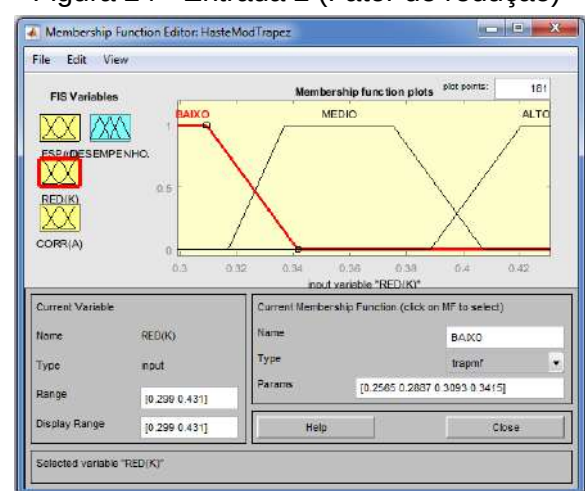
Nas Figuras 23, 24 e 25 encontram-se as variáveis de entrada com funções de pertinência do tipo Trapezoidal. A saída do modelo, conforme realizado nas entradas, foi alterada para o tipo Trapezoidal (Figura 26).

Figura 23 - Entrada 1 (Espaçamento)



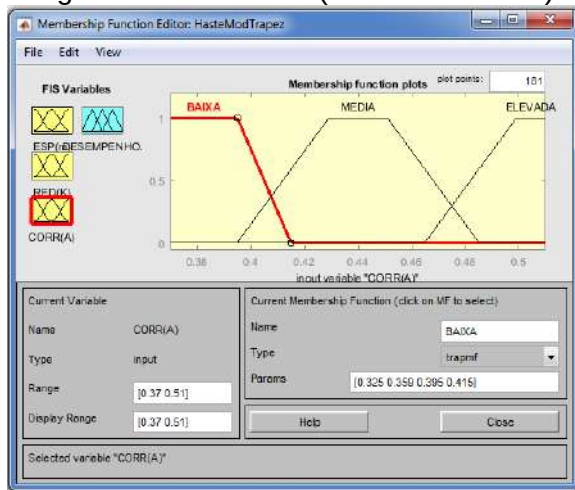
Fonte: Toolbox Matlab (2020).

Figura 24 - Entrada 2 (Fator de redução)



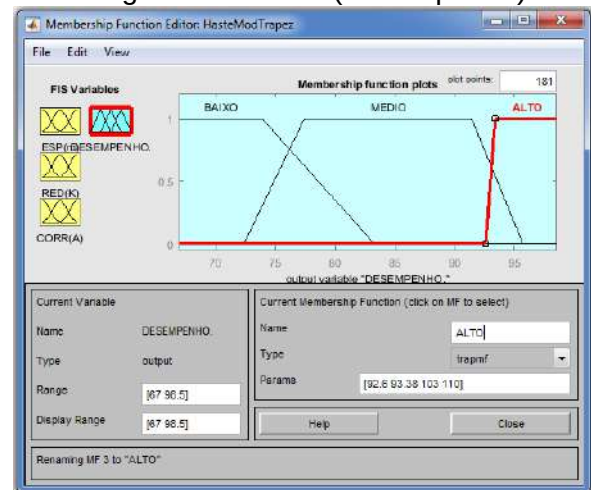
Fonte: Toolbox Matlab (2020).

Figura 25 - Entrada 3 (Corrente elétrica)



Fonte: Toolbox Matlab (2020).

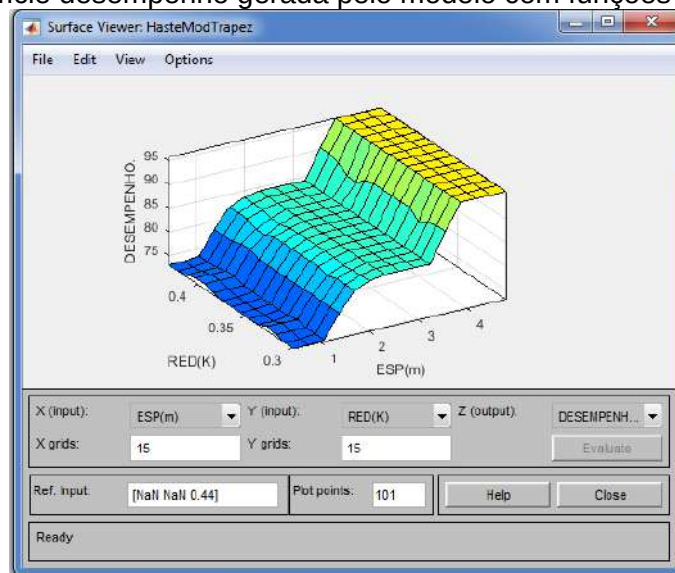
Figura 26 - Saída (Desempenho)



Fonte: Toolbox Matlab (2020).

Por meio do menu “View Surface”, do Toolbox Matlab, a partir das entradas e regras criadas, foi criado possível a geração de um mapa tridimensional. Na Figura 27 encontra-se a superfície gerada pelo Matlab, que, de forma rápida e eficaz, determinou as eficiências do sistema de aterramento em função dos fatores de redução e das correntes elétricas.

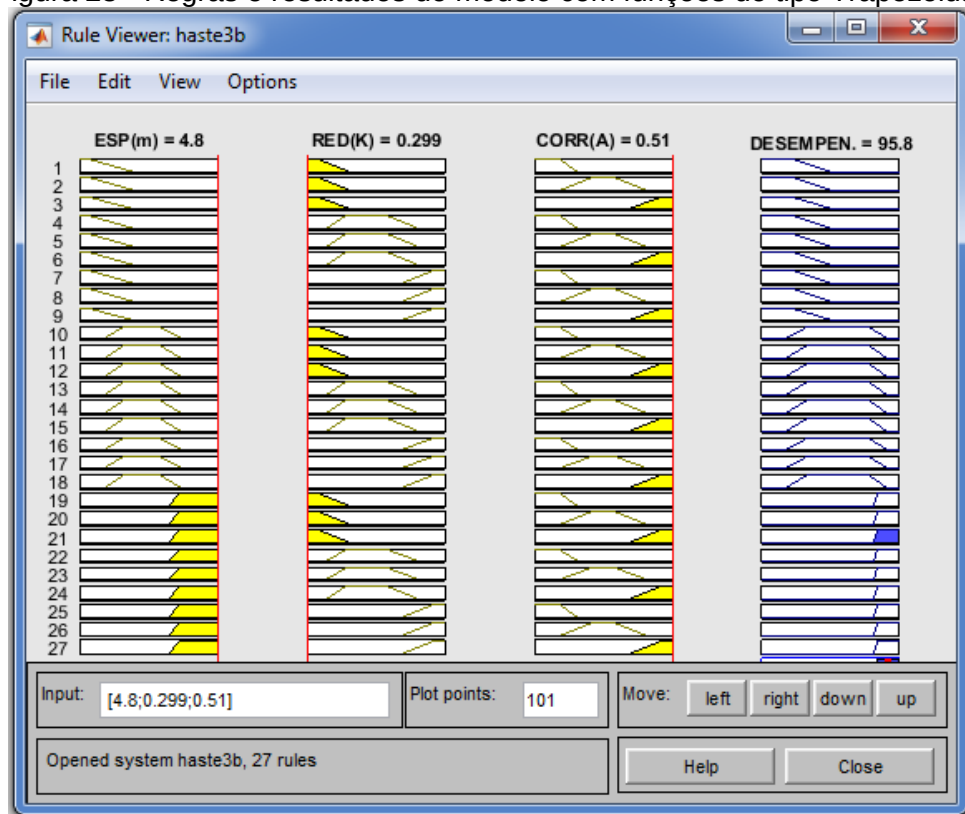
Figura 27 - Superfície desempenho gerada pelo modelo com funções do tipo Trapezoidal



Fonte: Toolbox Matlab (2020).

Por meio do menu “View Rules”, do Toolbox Matlab, foi possível realizar diversas simulações e avaliar o desempenho do modelo desenvolvido para as combinações das variáveis de entrada. Como resultado de uma das simulações, a Figura 28 comprova que para espaçamento de 4,80 metros, fator de redução (K) 0,299 e corrente elétrica de 0,51 A foi encontrado o desempenho de 96.7%.

Figura 28 - Regras e resultados do modelo com funções do tipo Trapezoidal.



Fonte: Toolbox Matlab (2020).

Nesse modelo, desenvolvido com funções de pertinência tipo Trapezoidal, foi possível encontrar os valores que melhor representam o comportamento do desempenho do aterramento em baixa frequência.

Na Tabela 8 encontram-se os resultados das simulações do modelo trapezoidal.

Tabela 8 - Desempenho do modelo Fuzzy Trapezoidal

Eficiência (%) a 60 Hz	Desempenho encontrado no Fuzzy C
67,0	71,0
68,8	71,5
76,1	72,6
83,3	77,0
88,7	87,9
90,6	90,9
92,4	91,1
96,0	96,3
97,8	96,7

Fonte: Própria (2020).

A máxima divergência do desempenho modelado pela função trapezoidal para o desempenho do sistema de aterramento a baixa frequência foi de 6,3 %, ocorrência para o desempenho de 83,3 %, na quarta linha da tabela 8.

4.5 CONCLUSÕES

Por meio da análise dos resultados das medições descritos na Tabela 4 foi constatado que, para pequenos espaçamentos, se comparados ao comprimento da haste, o valor da resistência do conjunto de aterramento é elevado.

A partir dos métodos experimentais e analíticos aplicados neste estudo foi possível detectar que, para pequenos espaçamentos – aproximadamente um terço do comprimento da haste – o desempenho do sistema de aterramento é de aproximadamente 67%. Para espaçamentos iguais ao comprimento da haste o desempenho foi de aproximadamente 83%.

Apesar de economicamente inviável, o melhor desempenho do sistema com hastes alinhadas é alcançado para distâncias superiores a três vezes o comprimento da haste.

Este estudo mostra que os espaçamentos entre as hastes devem ser maiores que o comprimento da haste e que o melhor desempenho encontrado para o sistema de aterramento foi de 4 vezes o comprimento da haste.

Neste estudo foram desenvolvidos três modelos diferenciados pelo tipo de função de pertinência. Após ajustes e simulações, o modelo com funções de pertinências do tipo Triangular apresentou valores de desempenhos próximos aos valores analisados, com divergência máxima de 11,1%.

Com a utilização da mesma estruturação, porém com mudança do tipo das funções de pertinências para Gaussiana, o modelo alcançou melhores resultados. No modelo com funções do tipo Gaussiana a máxima divergência dos desempenhos reduziu para 9,7%.

O modelo com funções do tipo Trapezoidal apresentou melhores resultados de compatibilidade com o modelo analisado, com divergência máxima de 6,3%. Este estudo demonstrou que a utilização da modelagem por meio da lógica Fuzzy pode contribuir para o aumento do conhecimento sobre desempenho do sistema de aterramento a partir de correlações entre entradas e saídas. Os recursos gráficos disponíveis no software Matlab contribuem de forma significativa para melhor entendimento da modelagem do sistema.

Sugere-se um aprofundamento do uso da lógica Fuzzy nos estudos de aterramento para que sejam efetuados projetos mais eficazes e com menor custo.

4.6 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749**: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 49 p.

BARRACHINA, J. M. B.; CATALAN-IZQUIERDO, S.; CAÑAS-PEÑUELAS, C. S. Grounding system impedance characterization using FEM. **Renewable Energy And Power Quality Journal**, Gran Canaria, p.430-435, maio 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.24084/repqj09.353>.

BRÉDER, M. V. D. V.; SILVA, R. S. da. Resposta de um aterramento a corrente elétrica impulsiva: impedância ou resistência? **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, p. 1-21, abr. 2016.

CAPELLI, A. Aterramento elétrico. **Saber Eletrônica**, São Paulo, n. 329, p.56-59, jun. 2000.

FURTADO, A. J. L. M. Sistema de classificação da gestão ambiental pública municipal baseado em lógica nebulosa. In: **Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 4., 2012, Recife. **Anais [...]** Recife, p. 1- 9, 06 maio 2012.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica Fuzzy. **SBA: Controle e Automação**, Campinas, SP, v. 4, n. 3, p.97-115, out. 1994.

HAYT JR., W. H.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. **Análise de Circuitos em Engenharia**. 8. ed. Porto Alegre - RS: AMGH, 2014. 843p.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sacra - D.C. Luzzatto, 1995. 214p.

MAMED FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017. 1290 p.

MATTOS, M. A. **Técnicas de Aterramento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Okime Eletromagnetismo, 2014. 243p.

RAIZER, A.; DIAS, G. A. D.; ALMAGUER, H. D.; SILVEIRA, J. L.; LIMA, M. R. de; GUIMARÃES, P. C. B.; MUSTAFÁ, T. I. A. H.; STEINBCH, V.; COELHO, V. L.; VALENTE JUNIOR, W. Avaliação da Influência da Resistência de Aterramento e Impedância de Surto na Operação do Sistema de Distribuição da Concessionária. **Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação**, Campinas - SP, p. 1-8, abr. 2016.

SAMPAIO, C. P. A. **Caracterização dos sistemas térmicos e acústicos em sistemas de produção de suínos nas fases de creche e terminação**. 2004. 121f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Unicamp, Campinas, SP, 2004.

TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H. D.; MUSTAFA, T. I.; COELHO, V. L. **Aterramento Elétrico Impulsivo Em Baixa e Alta Frequências**. Porto Alegre - RS: Edipucrs, 2007. 328 p.

WUERGES, A. F. E.; BORBA, J. A. Redes neurais, lógica nebulosa e algoritmos genéticos: aplicações e possibilidades em finanças e contabilidade. **Journal of Information Systems and Technology Management**, Florianópolis - SC, v. 7, n. 1, p.163-182, 30 abr. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.4301/s1807-17752010000100007>.

5 ARTIGO C – MODELO DE OTIMIZAÇÃO GA-FUZZY PARA MALHAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

Resumo

Este artigo utilizou a inteligência computacional, por meio do software Matlab, para o desenvolvimento de um modelo de otimização de malhas de aterramento com utilização da lógica Fuzzy. Os parâmetros foram otimizados por meio de algoritmos genéticos. Esse modelo busca encontrar a menor área e o quantitativo de cabos para o desenvolvimento do projeto da malha. Sua aplicação foi feita a uma subestação elevadora de uma Usina de Solar Fotovoltaica (USF) e com inclusão de mais quatro valores de resistividades de solo. A otimização foi obtida por meio da elaboração de uma função objetivo e restrições não lineares, com resolução através da aplicação de algoritmos genéticos. Para o projeto da malha da subestação da USF, com resistividade de 325 Ohms, foi encontrada uma área de 1640m² e comprimento total de cabos igual a 570 metros. Após análise e certificação dos resultados foi adotado o mesmo procedimento para as demais resistividades. O modelo Fuzzy contemplou cinco faixas de resistividade em que foi possível correlacionar os parâmetros de entrada com os resultados encontrados pelo AG com divergências inferiores a 3%.

Palavras-chave: Aterramento. Fuzzy. Algoritmo Genético. Matlab. Otimização. Subestação.

Abstract

This article used computational intelligence with the use of Matlab software to develop a ground loop optimization model. The model was developed using Fuzzy logic using parameters optimized by means of genetic algorithms. The optimized model seeks to find the smallest area and number of cables for the development of the mesh project. This model was applied to an elevating substation of a USF (Solar Photovoltaic Plant) and with the inclusion of four more values of soil resistivities. The optimization was obtained through the elaboration of an objective function and non-linear restrictions, with resolution through the application of genetic algorithms. For the USF substation grid design, with resistivity of 325 Ohms, an area of 1640 m² was found and the total cable length was 570 meters. After analyzing and certifying the results, the same procedure was adopted for the other resistivities. The Fuzzy model included five resistivity ranges where it was possible to correlate the input parameters with the results found by the AG with divergences below 3%.

Keywords: Grounding. Fuzzy. Genetic Algorithm. Matlab. Optimization. Substation.

5.1 INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico é um assunto de bastante relevância e complexidade. Tem despertado o interesse de pesquisadores na busca de novos conhecimentos e melhoria de resultados devido a sua importância no desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado, à segurança para seres vivos e proteção dos equipamentos (VISACRO FILHO, 2002; ALÍPIO, 2011).

A modelagem de um sistema de aterramento encerra considerável complexidade em razão da diversidade de fatores que necessitam ser considerados para a sua realização (LIMA, 2010). Na maior parte do território do Brasil o solo possui alta resistividade, superior a $1000 \Omega.m$. Esse fator contribui para maior complexidade na elaboração de projetos de aterramento (VISACRO FILHO, 2002).

O aumento das potências do curto-circuito em sistemas elétricos, associados às altas resistividades do solo, resulta na elevação de custos do projeto da malha de aterramento (COURA, 2007). Dentre as principais razões da elevação desses custos estão a necessidade de uma maior área de projeto, o aumento do quantitativo e das bitolas dos cabos e o aumento do custo com obras civis.

Os projetos de malhas de aterramento de subestações são regulamentados pelas normativas NBR 15751 (ABNT, 2013) e a IEEE Std 80 (IEEE, 2015). A resistência de aterramento, os potenciais de passo e o toque da malha estão associados à profundidade, à área da adotada e ao espaçamento entre condutores.

Para uma determinada profundidade e área, podem ser adotados diferentes espaçamentos entre os condutores. Eles, por sua vez, influenciam no quantitativo a ser utilizado e, por conseguinte, na resistência e nos potenciais da malha. Apesar da considerável complexidade, é possível encontrar uma área mínima, que possa resultar em um comprimento suficiente de cabos para que seja desenvolvido o projeto normatizado da malha.

Nos últimos anos a aplicação da inteligência computacional tem sido um caminho eficaz para análise do comportamento e aumento de desempenho de sistemas de aterramento.

Este estudo tem como objetivo a aplicação da inteligência computacional, por meio de Algoritmos Genéticos, para determinar os parâmetros otimizados para

construção de um modelo de otimização Fuzzy para projeto de malhas de aterramento de subestações.

5.2 REVISÃO DE LITERATURA

5.2.1 Aterramento de Subestações

O sistema de aterramento de uma subestação é composto por eletrodos de aterramento, pelos cabos e por todos os elementos metálicos interconectados (MODENA; SUETA, 2011). Já as malhas de aterramento são formadas por um conjunto de condutores nus, interligados e enterrados no solo (ABNT, 2009).

A resistência total da malha de aterramento é composta basicamente pelas resistências dos eletrodos e conexões, resistência de interface de contato entre eletrodo e o solo, além da resistência do eletrodo da terra circunvizinha (VISACRO, 2002).

A NBR 15751 (ABNT, 2013) especifica os requisitos para dimensionamento do sistema de aterramento de subestações de energia elétrica, acima de 1 kV, quando sujeitos a solicitações em frequência industrial. Já a IEEE Std 80 (IEEE, 2015) fornece orientações e informações pertinentes a práticas seguras de aterramento no projeto de subestação em Corrente Alternada (CA).

Em subestações de energia a resistência de aterramento é um dos principais fatores para a análise da segurança elétrica. Ela é responsável para estabelecer um caminho com baixa impedância para a proteção do sistema elétrico em casos de surto, além de ser necessária para garantir que as tensões de toque e de passo estejam dentro de limites estabelecidos. Portanto, faz-se necessário que um bom sistema de aterramento possua um baixo valor de resistência (PIRES, 2016).

5.2.2 Algoritmos Genéticos

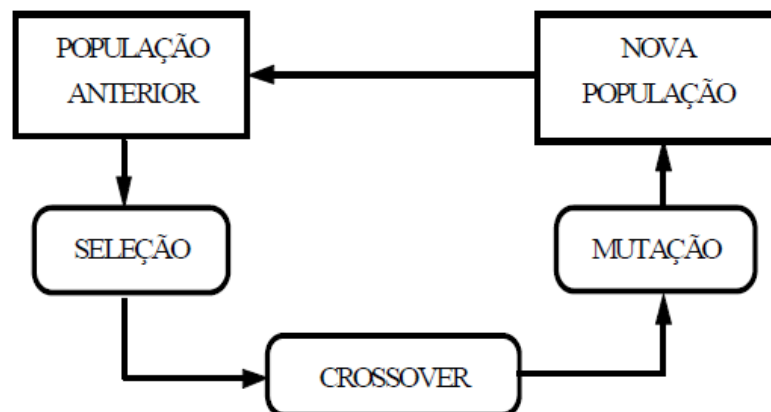
Os Algoritmos Genéticos (AG) tiveram seus princípios desenvolvidos por John Holland, em 1975. Trata-se de uma heurística de otimização inspirada na evolução biológica. Nesse algoritmo, indivíduos competem entre si pela sobrevivência, evoluindo por gerações. Cada indivíduo tem um grau de aptidão e espera-se que os

mais aptos sobrevivam, propagando seu código genético (MOORI; KIMURA; ASAKURA, 2010).

São denominados também de técnicas de busca heurísticas de otimização global (LINDEN, 2012). Esse processo é análogo ao de seleção natural da biologia, baseando-se também no processo de reprodução sexuada. Dessa forma, o AG executa uma estratégia de busca múltipla, permitindo a emergência de soluções dentro do espaço de variáveis de um problema específico.

A reprodução tem por base o cruzamento (*crossover*) genético. Por meio de mutação dos indivíduos é possível incluir diversidade numa espécie. Na Figura 29 encontra-se o ciclo básico de um algoritmo genético.

Figura 29 - Ciclo básico de um algoritmo genético.



Fonte: GOMIDE; GUDWIN (1994).

O próximo tópico trata da revisão de literatura sobre Lógica Fuzzy.

5.2.3 Lógica Fuzzy

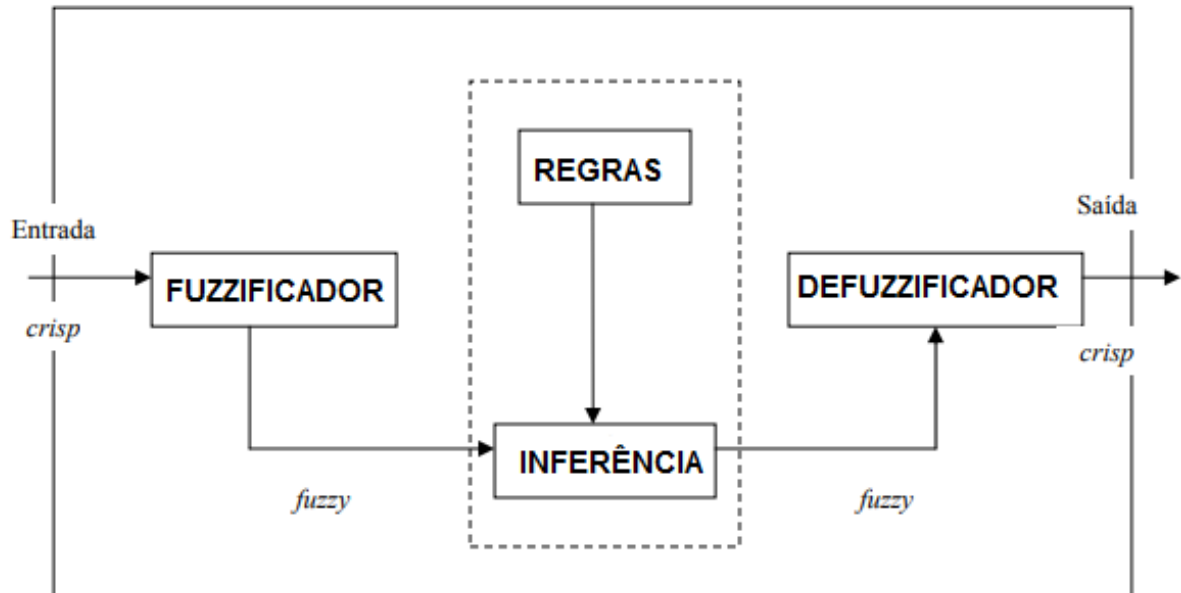
A teoria dos conjuntos nebulosos foi desenvolvida a partir de 1965, por Lotfi Zadeh, para tratar do aspecto vago da informação.

É uma forma de lógica de múltiplos valores de verdade. É utilizado o conceito de grau de adesão. Na lógica booleana, os valores de verdade podem ser apenas 0 ou 1, mas na lógica difusa, ele será qualquer número real entre 0 e 1, ou seja, os valores verdadeiros vão variar entre verdadeiro e falso (MATHWORKS, 2013).

O sistema Fuzzy é composto por quatro elementos fundamentais: um conjunto de regras, um fuzzificador, um processador de inferência e um defuzzificador. O módulo inferência combina e articula o conjunto de regras estabelecida. O

defuzzificador, por sua vez, transforma e mapeia conjuntos Fuzzy em conjuntos crisp, resultando na ação efetiva de controle (MENDEL, 2005). Na Figura 30 está representado o sistema Fuzzy.

Figura 30 - Sistema FUZZY.



Fonte: COELHO *et al.* (2018)

Em problemas que envolvem classificação de padrões é possível, em vez de tentar associar cada padrão a uma única classe, calcular o grau de pertinência associado a cada classe do problema. Isso permite tratar problemas com fronteiras de decisão complexas, onde a classificação pode ser obtida a partir da análise dos graus de pertinência calculados (SIMÕES; SHAWN, 2009).

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

O problema do desenvolvimento de malhas de aterramento consiste em encontrar a menor área e o menor quantitativo de materiais para que se alcance uma baixa resistência sem que os potenciais de toque e passo sejam superiores aos limites toleráveis ao ser humano. Para a otimização do custo da malha foi elaborado um modelo de programação linear, por meio de uma função objetivo e restrições não lineares, estruturado de forma que fosse otimizado pelo algoritmo genético (AG) com utilização do software Matlab. De posse dos parâmetros encontrados por meio do AG foram criadas as entradas, saídas e regras do sistema Fuzzy.

O AG foi implementado em Matlab pelo fato de ser uma linguagem de alto nível e dedicada a cálculos matemáticos, com simplicidade de programação devido à utilização de matrizes (JAMIL; YANG, 2013).

Este estudo inicia com uma abordagem analítica dos parâmetros e quesitos do projeto de malhas de aterramento segundo normativas do IEEE Std 80 (IEEE, 2015) e da NBR 15751 (ABNT, 2013). Esse modelo é aplicável a solos com faixa de resistividade de 300 a 500 $\Omega.m$, com máxima corrente de curto-circuito de 1,6 KA.

5.3.1 Parâmetros e Quesitos para Modelagem da Malha

5.3.1.1 Estratificação do Solo

Os modelos usuais consistem em dividir o solo em camadas, com resistividades e profundidades distintas, para a obtenção de uma resistividade aparente que caracterize o solo como homogêneo. Na norma NBR 7117 (ABNT, 2012) encontram-se todos os métodos e procedimentos para medição da resistividade e da estratificação do solo. Neste estudo foi utilizado o método de Wenner.

As resistividades das camadas são obtidas mediante ao espaçamento dos eletrodos e do valor de resistência medido com a aplicação da equação 8.

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R \quad (8)$$

Onde:

ρ - é a resistividade do solo ($\Omega.m$);

a - distância entre os eletrodos (m);

R - valor da resistência encontrado na medição para a distância (a) em Ohms (Ω).

5.3.1.2 Cálculo da Resistência da Malha

Laurent e Nieman, segundo a norma IEEE Std 80 (2015), propuseram um método para cálculo da resistência da malha de aterramento correspondente aos condutores horizontais. Este método é obtido através da aplicação da equação 9.

$$R = \frac{\rho a}{r} + \frac{\rho a}{Lt} \quad (9)$$

Onde:

R - resistência da malha em Ohms (Ω);

ρa - resistividade aparente do solo, expressa em ($\Omega.m$);

R - resistência preliminar da malha em Ohms (Ω);

r - raio equivalente da área da construção da malha (m);

Lt - comprimento total de condutores enterrados (m).

Para solo homogêneo, com variação de resistividade até 30%, a equação 10, desenvolvida por Sverak possibilita o cálculo de resistência da malha onde se leva em consideração a profundidade da malha (IEEE, 2015).

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{Lt} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (10)$$

Onde:

A - é a área ocupada pela malha (m^2);

h - é a profundidade da malha (m).

Para um solo considerado homogêneo, a resistência da malha de aterramento pode ser calculada por meio do conjunto de equações que considera as resistências combinadas entre hastes e condutores. A resistência total da malha é calculada conforme equação 11, desenvolvida por Schwarz.

$$R_m = \frac{R1 \times R2 - Rm^2}{R1 + R2 - 2 \times Rm} \quad (11)$$

Onde:

R1 - resistência da malha para os condutores horizontais (Ω);

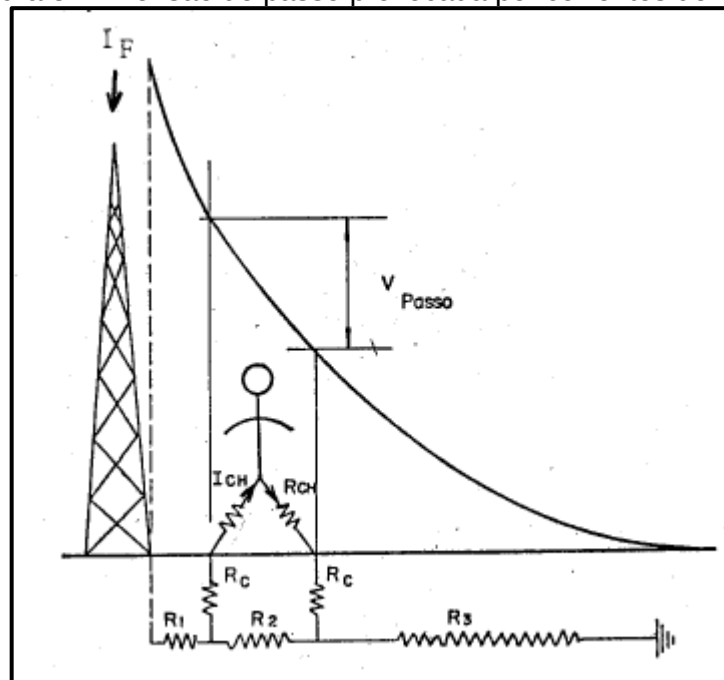
R2 - resistência resultante de todas as hastes verticais (Ω);

Rm - resistência mútua dos cabos e eletrodos verticais (Ω).

5.3.1.3 Máxima Tensão de Passo Tolerável

Segundo Kindermann e Campagnolo (1995), a tensão de passo é a diferença de potencial elétrico entre os dois pés. Esta é causada elevação de potencial da malha ocorre durante a circulação de correntes elétricas de faltas à terra. A Figura 31 representa a tensão de passo próximo a uma torre de linha de transmissão.

Figura 31 – Tensão de passo provocada por correntes de falha.



Fonte: Kindermann e Campagnolo (1995).

A tensão de passo máxima permitida para uma pessoa de 70 Kg, segundo a IEEE Std 80 (IEEE, 2015), é dada segundo a equação 12. Através desta equação é possível determinar qual a tensão de passo máxima suportável por uma pessoa de 70 Kg, para a espessura padronizada de 15 cm, conforme normativa IEEE Std 80.

$$(E \text{ step } 70) = (1000 + 6 \times CS \times \rho_s) \times 0.157 / \sqrt{Tf} \quad (12)$$

Onde:

(E step 70) - máxima tensão de passo admissível para pessoa de 70 kg (V);

Tf - tempo de duração da corrente de curto-circuito fase-terra (s);

CS - fator de efetividade da camada de brita;

ρ_s - resistividade da cama de brita ($\Omega.m$).

O cálculo do fator de efetividade da camada de brita é feito conforme equação 13 e tem influência direta no resultado do cálculo da tensão de passo suportável pela pessoa.

$$CS = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s} \right)}{2hs + 0.09} \quad (13)$$

Onde:

hs - espessura da cama de brita (m);

ρ_s - resistividade da cama de brita ($\Omega \cdot m$);

ρ_1 - resistividade da primeira camada ($\Omega \cdot m$).

A tensão de passo existente na periferia da malha segundo a IEEE Std 80 (IEEE, 2015) é calculada de acordo com a equação 14. Esta equação permite avaliar se o comprimento de cabos, distância entre cabos e profundidade adotados no projeto da malha são suficientes para evitar que a corrente de curto-circuito (I_{cft}) presumida resulte em potenciais de passo superiores aos toleráveis pela pessoa de 70 Kg.

$$E_m = \frac{\rho \times I_{cft} \times K_s \times K_i}{L_{cm}} \quad (14)$$

Onde:

E_m - tensão de passo existente (V);

I_{cft} - corrente máxima de curto-circuito fase-terra (A);

K_s - coeficiente de superfície;

K_i - coeficiente de irregularidade;

L_{cm} - comprimento total de condutores enterrados (m).

O coeficiente de superfície (K_s) pode ser calculado pela equação 15.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (15)$$

Onde:

D - distância entre os cabos (m);

n - fator geométrico;

h – profundidade da malha (m).

A tensão de passo existente da malha deverá ser inferior à tensão máxima de passo permissível pela pessoa, obtida por meio da equação 12.

5.3.1.4 Máxima Tensão de Toque Tolerável

Segundo Kindermann e Campagnolo (1995), a máxima tensão de toque é o máximo potencial entre o pé e a mão que uma pessoa pode suportar para não causar fibrilação ventricular. A tensão de toque máxima permitida para uma pessoa de 70 Kg, segundo a IEEE Std 80 (IEEE, 2015), é dada segundo a equação 16.

$$(E \text{ touch}70) = (1000 + 1,5 \times CS \times \rho_s) \times 0.157 / \sqrt{Tf} \quad (16)$$

Onde:

(E touch70) - máxima tensão de passo admissível para pessoa de 70 kg (V);

Tf - tempo de duração da corrente de curto-circuito fase-terra (s);

CS - fator de efetividade da camada de brita;

ps - resistividade da cama de brita ($\Omega.m$).

5.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA POR ALGORITMO GENÉTICO

5.4.1 Dados de Entrada e Delimitações do Estudo

A motivação para este estudo surgiu devido à necessidade do desenvolvimento de uma malha de aterramento para a subestação de uma usina solar fotovoltaica. A potência da subestação é de 5 MVA, na tensão de 13,8 KV, cuja corrente de curto-circuito fase-terra presumida igual a 1,6 KA, em solo com resistividade aparente de 325 $\Omega.m$. De forma a contribuir para otimização de outros projetos e estudos foi desenvolvido um modelo para projetos de malhas para solos com resistividades entre 200 a 500 $\Omega.m$.

Os dados utilizados para o desenvolvimento do algoritmo genético foram:

- Resistividade do solo – 200 a 500 $\Omega.m$;
- Tensão – 13,8 KV;
- Corrente de curto-circuito fase terra – 1,6 kA;
- Tensão de passo tolerável (calculada) – 2570 V;
- Tensão de toque tolerável (calculada) – 739 V.

Abaixo seguem os dados da Usina Solar Fotovoltaica.

Potência: 5 MVA;

Tensão: 0,38/13,8 KV;

Número de módulos: 19488;

Número de Strings em paralelo: 928;

Potência gerada: 5000 KW.

A partir dos dados do projeto da usina e dos parâmetros necessários para o projeto da malha de aterramento a próxima etapa foi a modelagem do problema.

5.4.2 Modelagem do Problema

A modelagem deste problema possui uma função objetivo e restrições não lineares. A função objetivo definida foi a resistência da malha para profundidade de até 25 cm, proposta por Laurent e Nieman. Os objetivos são encontrar a menor área e o menor quantitativo de cabos para a resistência máxima de 5 Ohms sem que sejam violados os parâmetros de segurança da norma IEEE Std 80 (IEEE, 2015).

As restrições foram definidas para que a área mínima fosse suficiente para se alcançar a resistência desejada e que o comprimento total de cabos fosse suficiente para limitar os potenciais de toque de passo.

Função objetivo

$$\text{Min } f(x_1, x_2, x_3) = \frac{\rho a}{(x_1)} + \frac{\rho a}{(x_2) + (x_3)}$$

Onde:

ρa - resistividade do solo (Ohm.m);

- (x) - função a ser minimizada;
 x_1 - 4 vezes o raio da malha (m);
 x_2 - comprimento total de cabos (m);
 x_3 - comprimento total de hastes (m).

Principais Restrições utilizadas

As restrições utilizadas na modelagem foram baseadas nos quesitos da normativa IEEE Std 80 (2015). A próxima etapa do estudo foi a criação dos arquivos necessários para o funcionamento do algoritmo, simulação e análise dos resultados.

S.a.

1. $f(x) < 5 \text{ Ohm}$;
2. $V_{\text{passo}} < 2570 \text{ V}$; (Tensão de passo existente deverá ser menor que a suportável);
3. $V_{\text{toque}} < 739 \text{ V}$; (Tensão de toque existente deverá ser menor que o suportável);
4. $(x_1 / 2) / K \leq 7 \text{ m}$; (Espaçamento máximo adotado entre cabos);
5. $K = 3:10$. (Variável para delimitar espaçamento entre cabos).

5.4.3 Resultados

Após elaboração da função objetivo e definição das restrições as equações e inequações foram remodeladas no padrão de linguagem do AG. Matlab. A Tabela 9 apresenta os principais parâmetros utilizados no AG.

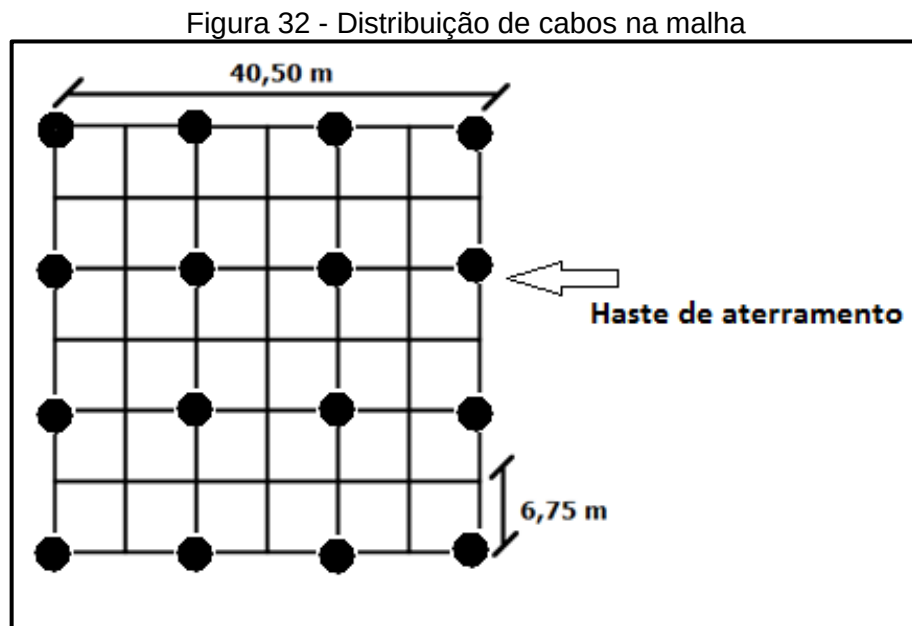
Tabela 9 - Parâmetros do Algoritmo Genético Proposto

Parâmetro do AG	Valor
Nº de variáveis	3
Resistividade após estratificação	325
Tamanho da população	50
Número de gerações	100
Número máximo de iterações	10.000

Fonte: Própria (2020).

Foram criados três arquivos: o das restrições, o da função objetivo e o da otimização. O algoritmo proposto possui três variáveis, com limites inferiores e superiores (LB e UP), com população de 100 indivíduos, para no máximo 10.000 iterações. No Apêndice A encontra-se o algoritmo desenvolvido e com um dos resultados alcançados após execução.

O tempo de processamento foi considerado satisfatório para um cálculo com 10.000 iterações, com tempo de processamento em torno de 80s. Como resultados da simulação foram encontrados o raio da malha de 20,25 m, com área quadrangular equivalente a 1640,25 m², com utilização 570 m de cabo e uso de 16 hastes de aterramento. Na Figura 32 pode ser observada a distribuição dos cabos na malha.



Fonte: Própria (2020).

A próxima etapa foi o desenvolvimento do modelo de otimização Fuzzy.

5.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO FUZZY

Após serem encontrados os melhores valores dos parâmetros para a resistividade de 325 Ohm, o AG foi ajustado para as demais resistividades propostas neste estudo.

De posse dos resultados otimizados dos parâmetros necessários para o projeto da malha foram definidas as entradas e saídas do sistema Fuzzy. As etapas seguintes foram os ajustes, escolha dos tipos de funções de pertinências e criação das regras de associação.

5.5.1 Entradas do Sistema Fuzzy

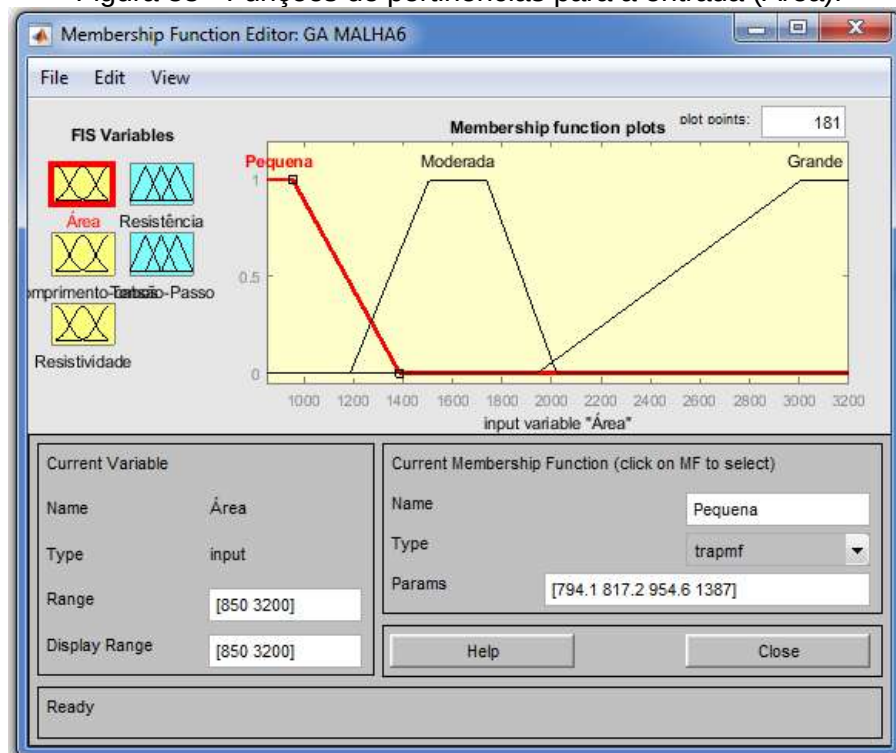
Este modelo foi criado a partir dos três principais parâmetros de otimização da

malha: resistividade do solo, quantidade de cabos e área retangular necessária. A função de pertinência adotada é do tipo trapezoidal.

5.5.1.1 Área a ser utilizada

A faixa de área utilizada foi decorrente dos resultados do AG, de 850 a 3200 m², conforme pode ser observado na Figura 33.

Figura 33 - Funções de pertinências para a entrada (Área).



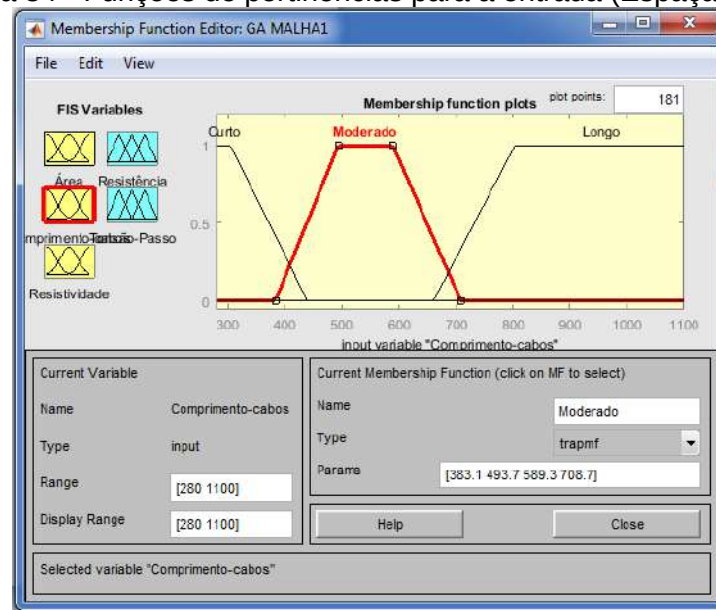
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

Na etapa seguinte foi modelada a função de entrada comprimento de cabos. A faixa foi delimitada conforme resultados encontrados no algoritmo genético.

5.5.1.2 Comprimento de Cabos

A faixa de comprimentos de cabos utilizados nessa variável foi de 280 a 1100 metros, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 - Funções de pertinências para a entrada (Espaçamento)



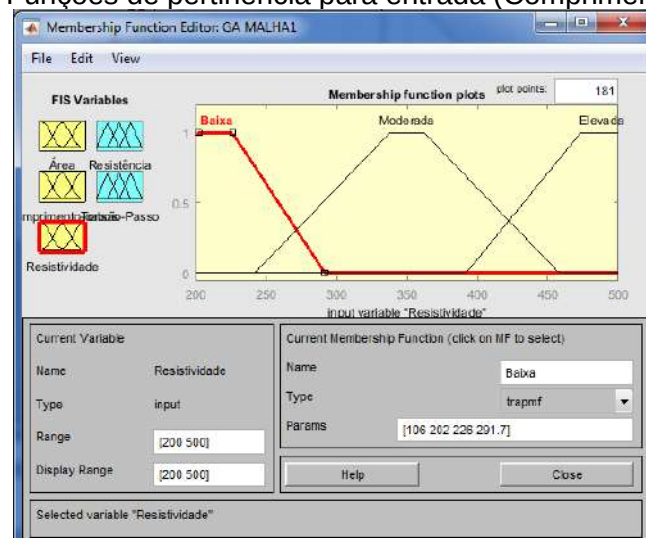
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

A próxima etapa foi a criação da terceira e última variável de entrada, a resistividade.

5.5.1.3 Resistividade

Na Figura 35 encontra-se a terceira variável de entrada, a resistividade aparente do solo, em que a faixa adotada foi de 200 a 500 $\Omega.m$, conforme proposta inicial deste estudo.

Figura 35 - Funções de pertinência para entrada (Comprimento de cabos)



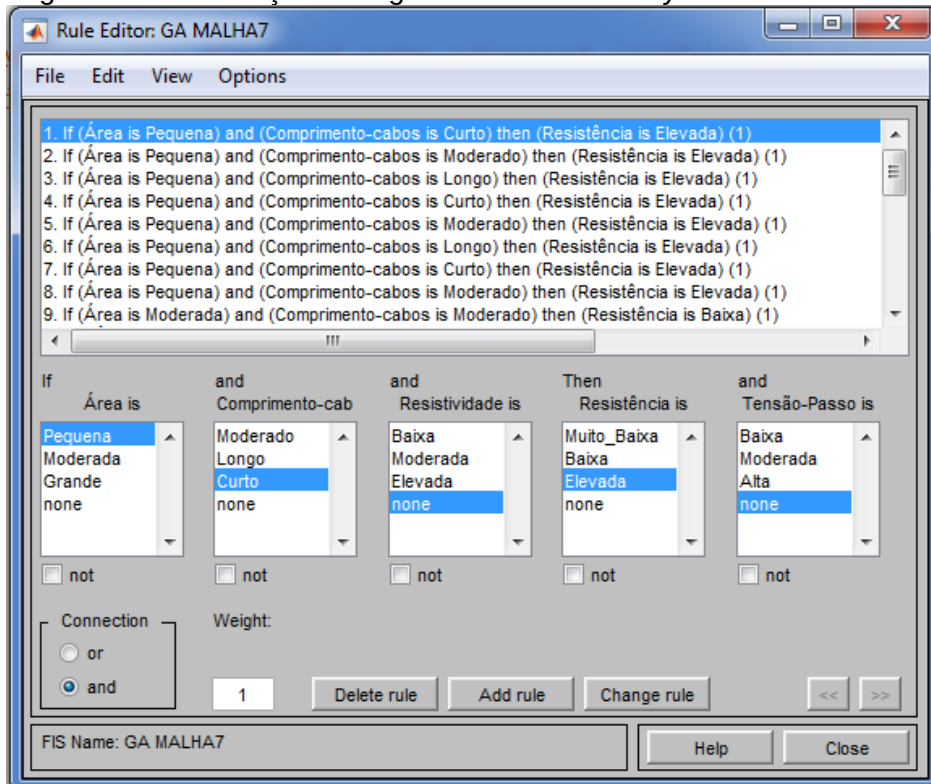
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

O próximo tópico reporta a base de regras criadas para o modelo Fuzzy proposto.

5.5.2 Regras Criadas

A base de regras é um dos principais componentes dos sistemas Fuzzy. É constituída por sentenças SE-ENTÃO (IF-THEN), que, de uma condição e uma ação, definidas como sendo uma função da entrada e uma função da saída dos conjuntos fuzzy (CHEN; PHAM, 2006). O sistema Fuzzy Toolbox do Matlab disponibiliza várias operações entre as funções de pertinências. Essas regras são elaboradas no editor de regras (Rule Editor), conforme Figura 36.

Figura 36 - Elaboração de regras do modelo Fuzzy no Toolbox Matlab.



Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

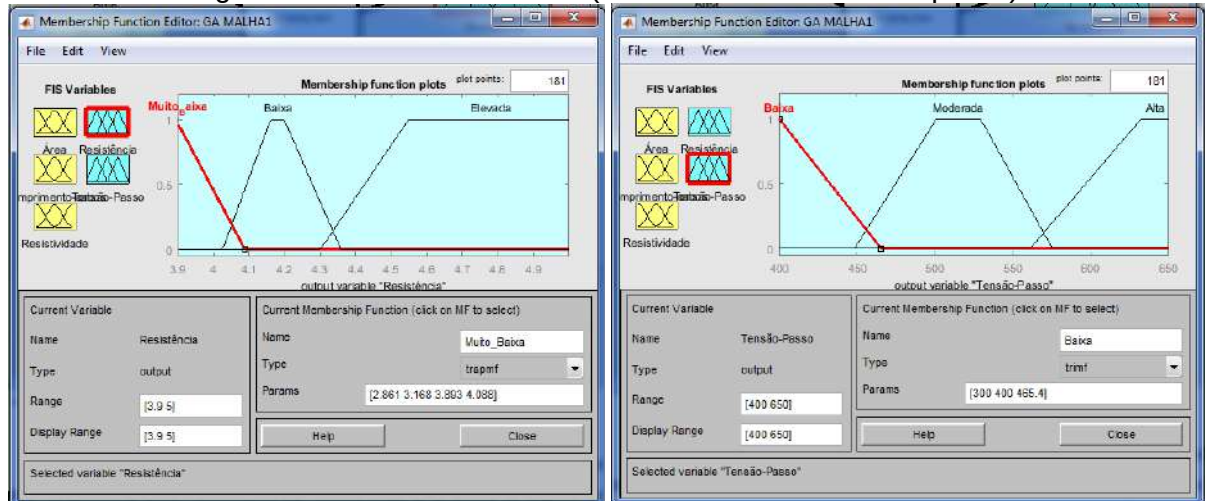
A próxima etapa foi a criação das saídas do modelo de otimização.

5.5.3 Saídas do Sistema Fuzzy

Este sistema foi elaborado para duas saídas. A primeira é a resistência da

malha e a segunda corresponde ao máximo potencial de passo existente em função da corrente de curto-circuito, camada de recobrimento de brita e espaçamento entre cabos. As amplitudes foram obtidas por meio de simulação computacional através de equacionamentos da normativa IEEE Std 80 (IEEE, 2015).

Figura 37 - Variáveis de saída (Resistência e Tensão de passo)



Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

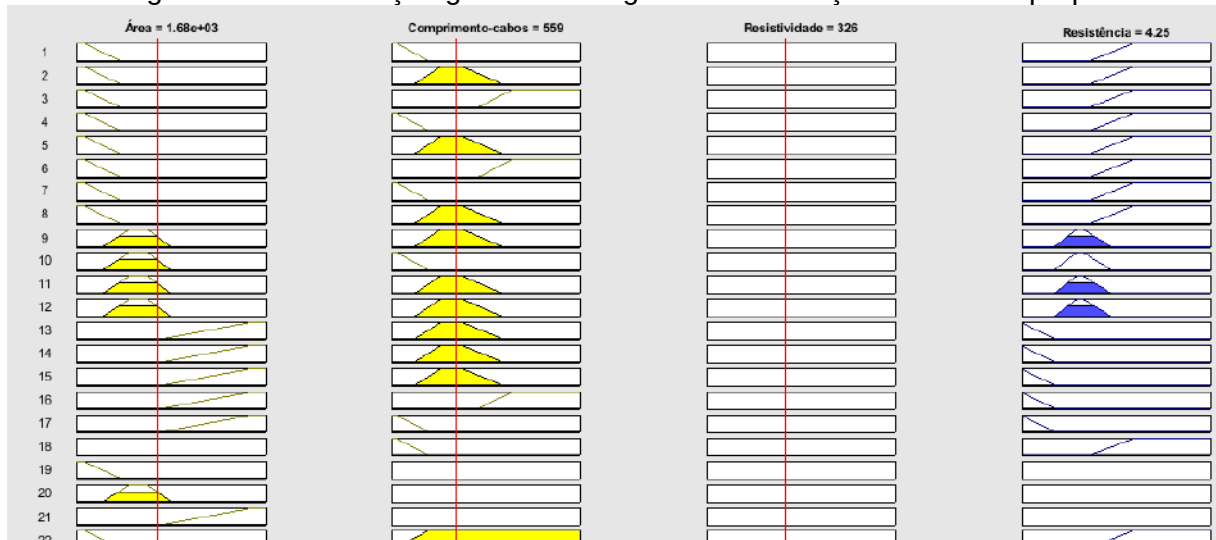
Após terem sido criadas as variáveis de entrada, variáveis de saída e base de regras foram realizadas as simulações.

5.5.4 Resultados das simulações

Os parâmetros de otimização da malha (área, comprimento de cabos e número de hastes) foram obtidos com uso do algoritmo genético. Estes parâmetros foram utilizados no desenvolvimento do modelo Fuzzy, onde a partir das funções de pertinências das entradas e a base de regras, foi possível obter os resultados de resistências e das tensões de passo no modelo Fuzzy.

Na Figura 38 encontra-se um dos resultados de resistência para as funções de pertinências e regras estabelecidas.

Figura 38 - Visualização gráfica das regras de associação do modelo proposto



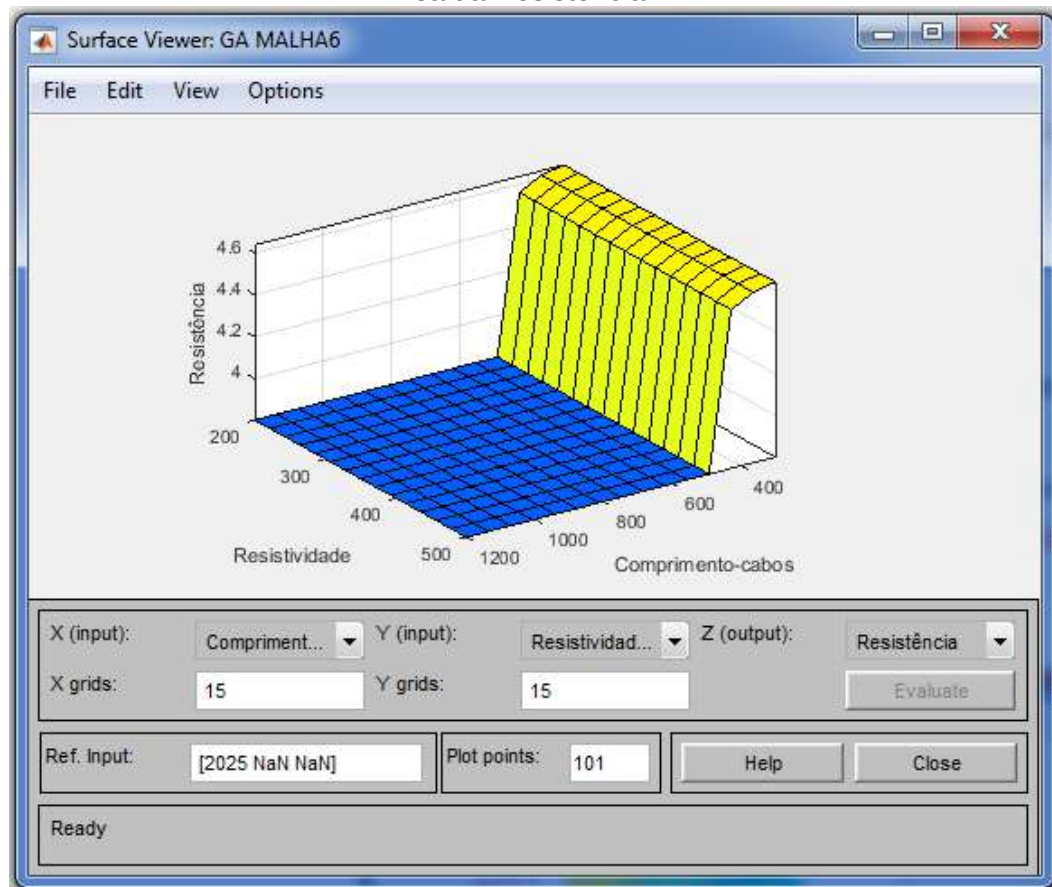
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

Os parâmetros foram simulados para todas as resistividades propostas e logo após foram feitos ajustes para que houvesse a menor divergência dos resultados para os encontrados no AG.

5.5.5 Superfície da resistência gerada pelas regras estabelecidas

Após criação do conjunto de regras aplicado às funções de pertinências, foi possível, por meio do menu *View do Toolbox Matlab*, gerar uma superfície para a saída resistência total da malha. Na Figura 39 é possível visualizar a relação entre resistividade, comprimento total de cabos e resistência encontrada.

Figura 39 - Superfície gerada através dos resultados das regras do sistema Fuzzy para saída Resistência.



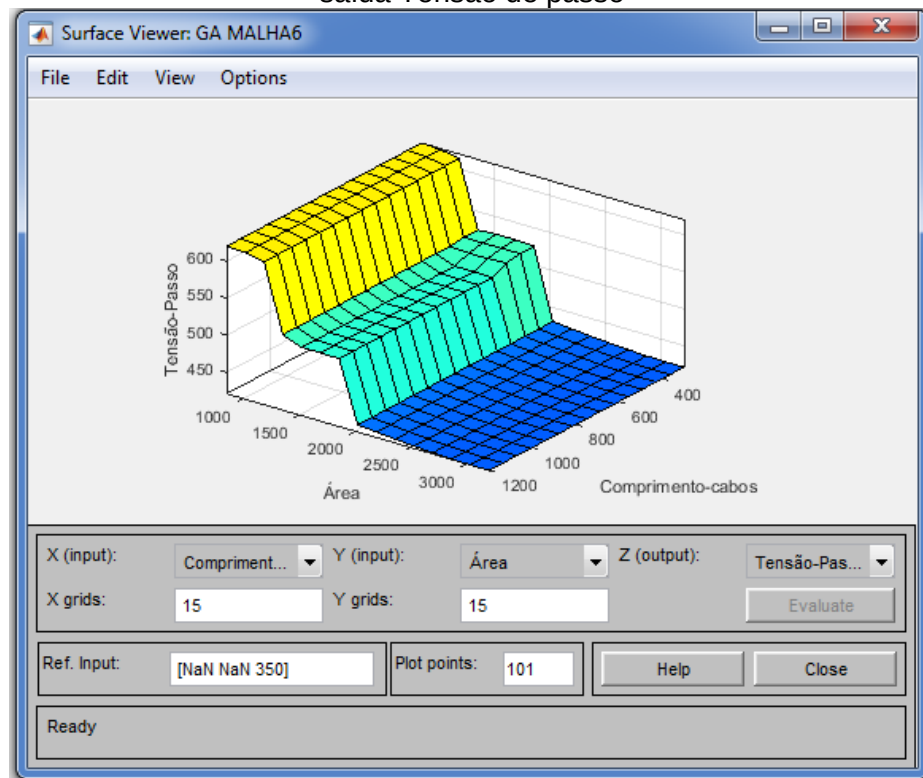
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

Na etapa seguinte foi realizada a geração da superfície da tensão de passo.

5.5.6 Superfície da Tensão de Passo em Função das Regras Estabelecidas

O mesmo procedimento aplicado à saída resistência foi aplicado às funções de pertinências nas entradas para à saída tensão de passo. Na Figura 40 pode ser visualizada a superfície gerada.

Figura 40 - Superfície gerada através dos resultados das regras do sistema Fuzzy para saída Tensão de passo



Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

Nesta superfície é possível identificar a relação entre área, comprimento de cabos a serem utilizados e tensão de passo resultante.

5.5.7 Resultados e Discussão

Este subtópico tem como objetivo demonstrar os resultados das operações analíticas obtidas a partir dos parâmetros encontrados com a otimização por meio do algoritmo genético e das divergências com os resultados do modelo Fuzzy (Tabela 10). Espera-se que os dados apresentados contribuam para a descoberta de novos conhecimentos, auxilie no projeto otimizado de malhas de aterramento.

Tabela 10 - Resultados da otimização com AG e divergências do modelo Fuzzy

Resistividade ($\Omega.m$)	Área (m^2)	Comprimento cabos (m)	Resistência (Ω)	Divergência (%) da modelagem Fuzzy para os resultados do AG.
200	900	360	3,75	2,30
300	1.444	532	4,37	2,00
325	1.681	560	4,23	1,10
400	2.025	720	4,86	1,45
500	3.136	1.120	4,80	1,65

Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020).

Os resultados do modelo de otimização Fuzzy tiveram divergências inferiores a 3% em relação aos parâmetros encontrados por meio do Algoritmo Genético.

5.6 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados por meio do algoritmo genético (AG) possibilitaram encontrar parâmetros que permitiram projetar uma malha de aterramento com custo reduzido. Vale a pena ressaltar que este estudo teve como objetivo geral busca pelo menor quantitativo de cabos e menor área para uma profundidade de 25 cm para malhas retangulares. Para a resistividade de 325 Ohms, o AG encontrou o melhor resultado para área de 1640,25 m², com raio de 20,25 m, com utilização de 570 m de cabos, resultando numa resistência de 4,23 Ohm.

O AG foi ajustado para as demais resistividades propostas neste estudo e seus resultados foram utilizados para o desenvolvimento do modelo de otimização Fuzzy. Já os parâmetros otimizados por meio do AG puderam ser simulados no modelo de otimização Fuzzy, com divergência máxima de 3% em relação aos encontrados no AG.

Este estudo busca mostrar a eficiência e importância da inteligência computacional na tomada de decisões em projetos de engenharia. É importante ressaltar que embora esta pesquisa tenha sido aplicada a uma subestação de uma Usina Solar Fotovoltaica (USF), o modelo de otimização pode ser aplicado a qualquer outro projeto de malha de aterramento de subestações.

5.7 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751**: Sistemas de aterramento de subestações — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ALÍPIO, R. S.; SCHROEDER, M. A. de O.; AFONSO, M. M.; OLIVEIRA, T. A. S. de. Modelagem de aterramentos elétricos para fenômenos de alta frequência e comparação com resultados experimentais. **Revista Controle & Automação**, São João del-Rei, MG, v. 22, n. 1, p. 89-102, 2011.

COELHO, M. H.; FERRI, V. P.; VALERIANO, E.; FRIGO, L. B.; POZZEBON, E. Application of Fuzzy Control in Embedded Sensing Systems for Beekeeping Monitoring. *In: LATIN AMERICAN COMPUTER CONFERENCE (CLEI)*, 44., 2018, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, p. 207-214, 2018.

COURA, A. P. R.; TAHAN, C. M. V.; JARDINI, J. A.; CASOLARI, R. P.; ANDRADE, J. G. M.; LOPES, M. Otimização de sistemas de aterramento em subestações 34,5/13,8 kV. *In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA*, 1., 2007, Campinas. **Anais [...]** Campinas: CPQD, 2007.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica Fuzzy. **Sba Controle & Automação**, Campinas - SP, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994.

IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE - STD 80**: IEEE guide for safety in AC substation grounding. New York: IEEE, 2015. 208p.

JAMIL, M.; YANG, X. A literature survey of benchmark functions for global optimisation problems. **International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation**, [s./l.], v. 4, n. 2, p. 150-194, 2013.

LIMA, A. B. **Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão**. 2010. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica, Engenharia de Potência) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012. 476p.

MATHWORKS. **Fuzzy Toolbox User's Guide**: for use with MATLAB. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2013.

MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. **Proceedings of the IEEE**, [s./l.], v. 83, n. 3, p. 345-377, 1995.

MODENA, J.; SUETA, H. Projeto de aterramento de malhas de subestações elétricas. **O Setor Elétrico**, São Paulo - Sp, v. 63, n. 6, p. 46-51, abr. 2011.

JÁCOME, B. P.; BATISTA, L. S.C.; SCHROEDE, M. A. O.; BACCARINI, L. M. R.; AMARAL, G. F. V. Avaliação Experimental da Variação Sazonal da Resistividade do Solo. **LAIPE**, São João Del-Rei, p. 1-5, 2015.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Blucher Ltda, 2007. 200p.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos**. São Paulo: Artliber, 2002. 155p.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Artigo A deste estudo, a partir do mapeamento da produção de artigos científicos, foi possível evidenciar que o tema possui boa relevância por parte dos pesquisadores.

Por meio de resultados experimentais e de análises foi possível determinar o comportamento do sistema de aterramento formado por hastes alinhadas. Através da utilização da inteligência computacional, utilizando a lógica Fuzzy, foi construído um modelo para correlacionar as influências eletromagnéticas em função dos espaçamentos entre as hastes.

Os algoritmos genéticos possibilitaram encontrar parâmetros que permitiu a elaboração do projeto da malha com baixo custo e com respeito aos quesitos e limites normativos estabelecidos. De forma eficiente, com a utilização da lógica Fuzzy, foi possível desenvolver um modelo de otimização que correlacionasse as variáveis de entrada com as saídas para a faixa de resistividade proposta neste estudo.

As técnicas utilizadas neste estudo apresentaram desempenho satisfatório na otimização de projetos de aterramento. Além disso, o modelo de solução proposto neste pode ser aplicado a qualquer outro projeto de malha de aterramento, desde que sejam efetuados ajustes.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através da simulação computacional é possível que estudantes e profissionais da engenharia elétrica obtenham resultados otimizados para projetos e comportamento do sistema de aterramento.

Para trabalhos futuros a primeira proposta é a aplicação de algoritmos genéticos para etapa de estratificação de solos com multicamadas.

A segunda proposta desenvolver um sistema inteligente, com utilização o algoritmo genético, para determinação da resistência de aterramento em geometrias não regulares.

E por último desenvolver um aplicativo para estudantes com finalidade de dimensionar sistemas de aterramento.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749:** Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 49 p.
- BARRACHINA, J. M. B.; CATALAN-IZQUIERDO, S.; CAÑAS-PEÑUELAS, C. S. Grounding system impedance characterization using FEM. **Renewable Energy And Power Quality Journal**, Gran Canaria, Spain, p. 430-435, maio 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.24084/repqj09.353>.
- BARUA, A.; KHORASANI, K. Hierarchical Fault Diagnosis and Fuzzy Rule-Based Reasoning for Satellites Formation Flight. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, Montreal, Canada, v. 47, n. 4, p. 2435-2456, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/taes.2011.6034643>.
- BRÉDER, M. V. D. V.; SILVA, R. S. da. Resposta de um aterramento a corrente elétrica impulsiva: impedância ou resistência? **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, p. 1-21, abr. 2016.
- CALDEIRA, A. M.; MACHADO, M. A. S.; SOUZA, R. C.; TANSCHKEIT, R. **Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab®**. São Paulo: Cengage, 2007. 370 p.
- CANNABRAVA, A. C. de A.; FERREIRA, B. E. M; PASQUA, L. P. Aterramento de redes de distribuição com a utilização de postes autoaterrados: Desenvolvimento e implantação. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 12., 2016. **Anais [...]** Curitiba-PR. p.1-12, 2016.
- CAPELLI, A. Aterramento elétrico. **Saber Eletrônica**, São Paulo, n. 329, p. 56-59, jun. 2000.
- CHEN, Cheng-Liang; KUO, Fong-Chih. Design and analysis of a fuzzy logic controller. **International Journal of Systems Science**. Hong Kong, China, v. 26, n. 5, p. 1223-1248, maio 1995. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207729508929095>.
- COELHO, R.; PONTES, R. S. T.; PONTES, M. das G. S. R. Projeto de Malhas de Aterramento Através do Método dos Elementos Finitos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 5., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2014.
- CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 420 p.
- DADIOS, E. P. **Fuzzy logic – controls, concepts, theories and applications**. Rijeka, Croatia. Intech, 2012. 428 p.

DAMOUSIS, I. G.; SATSIOS, K. J.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. Combined fuzzy logic and genetic algorithm techniques: application to an electromagnetic field problem: application to an electromagnetic) eld problem. **Elsevier**, Thessaloniki, Greece, p. 371-386, maio 2001.

DIMAYUGA, B. M.; JARON, K. M. E.; MONTERO, A. T.; PEROS, M. K. Z.; CALDO, R. B. Ground Grid Integrity Testing Using Matlab Fuzzy Logic Toolbox. **Lecture Notes In Electrical Engineering**, Berlin, p. 759-766, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47200-2_80.

ERDINC, O.; VURAL, B.; UZUNOGLU, M. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system. **Journal of Power Sources**, Oxford, v. 194, n. 1, p. 69-380, out. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.04.072>.

FACHIN, G. R. B.; HILLESHEIM, A. I. A. **Periódico Científico: Padronização e Organização**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006.

FURTADO, A. J. L. M. Sistema de classificação da gestão ambiental pública municipal baseado em lógica nebulosa. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 4., 2012, Recife. **Anais [...]** Recife, p. 1-9, 06 maio 2012.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica Fuzzy. **SBA: Controle e Automação**, Campinas - SP, v. 4, n. 3, p.97-115, out. 1994.

GUO, MOU-FA; QIU, WEI-QIANG; YANG, GENG-JIE. Model-Predictive-Control-Based Flexible Arc-Suppression Method for Earth Fault in Distribution Networks. **IN IEEE ACCESS**, Australia, v. 7, p. 16051-16065, 18 jan. 2019.

GUO, MOU-FA. Features-clustering-based earth fault detection using singular-value decomposition and fuzzy c-means in resonant grounding distribution systems. **Journal Of Electrical Power & Energy Systems**. Fuzhou, China, p. 97-108. dez. 2017.

HAYT JR., W. H.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. **Análise de Circuitos em Engenharia**. 8. ed. Porto Alegre - RS: AMGH, 2014. 843 p

HOCELLA JR., M. F. There's plenty of room at the bottom: nanoscience in geochemistry. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 66, n. 5, p.735-743, mar. 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7037\(01\)00868-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7037(01)00868-7).

KACPRZYK, J. **Multistage fuzzy control**. Chichester, UK: John Wiley Sons, 1997, 327p.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sacra - D.c. Luzzatto, 1995. 214p.

LEE, C. C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. II. **IEEE Transactions on Systems**, California. Man, and Cybernetics, v. 20, n. 2, p. 419-435, 1990. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/21.52552>.

LIU, J.; SOUTHEY, R. D.; DAWALIBI, F. P. Application of advanced grounding design techniques to plant grounding systems. In: **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific**, DALIAN, 2005, p.1-6.

MAMED FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017. 71291 p.

MATTOS, M. A. **Técnicas de Aterramento**. Okime, Campinas. Okime, 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.

OCHOA, J. P.; OLIVEIRA, R. V. de; MOURA, R. A. R. de. Aplicação de Algoritmo Genético Aperfeiçoado por um Algoritmo Elipsoidal no Cálculo da Resistividade Considerando Solo Estratificado em Duas Camadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 6., 2015. São João del Rei, MG. **Anais [...]**. p.1-6, 2015. Grupo de Pesquisa Otimização e Supervisão de Sistemas Elétricos Industriais – OSSEI. <http://dx.doi.org/10.20906/cps/sbse2016-0109>.

PIMENTA, A. A.; PORTELA, A. R. M. R.; OLIVEIRA, C. B. de; RIBEIRO, R. M. A bibliometria nas pesquisas acadêmicas. **Scientia**, Sobral - CE, v. 4, n. 7, p. 1-13, 2017.

RAIZER, A.; DIAS, G. A. D.; ALMAGUER, H. D.; SILVEIRA, J. L.; LIMA, M. R. de; GUIMARÃES, P. C. B.; MUSTAFÁ, T. I. A. H.; STEINBCH, V.; COELHO, V. L.; VALENTE JUNIOR, W. Avaliação da Influência da Resistência de Aterramento e Impedância de Surto na Operação do Sistema de Distribuição da Concessionária. **Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação**, Campinas - SP, p. 1-8, abr. 2016.

SAMPAIO, C. P. A. **Caracterização dos sistemas térmicos e acústicos em sistemas de produção de suínos nas fases de creche e terminação**. 2004. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Unicamp, Campinas, RJ, 2004.

SANTOS, R. N. M. Produção Científica: Por que medir? O que medir? **Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, Campinas - SP, v. 1, n. 1, p. 22-38, jul./dez. 2003

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia**: fundamentos e prática. Fundamentos e Prática. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 472p.

SILVA, F. M. e; SOBRAL, N. V.; SANTANA, G. A.; CRUZ, T. L. Mapeamento da produção científica brasileira sobre acesso aberto: 2001 a 2011. **Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, Florianópolis - SC, v. 17, n. 2, p. 19-35, 2012.

Souza, M. de. “Produção científica Brasileira: Caminhos Norteadores Para instituições De Fomento a Pesquisa”. **Brazilian Journal of Information Science: Research Trends**, Belo Horizonte – MG, v. 12, n. 1, maio de 2018. DOI:10.36311/1981-1640.2018.v.12, n.1.05.p46-60.

SUGENO, M; KANG, G.T. Structure identification of fuzzy model. **Fuzzy Sets And Systems**, Tóquio, Japan, v. 28, n. 1, p. 15-33, out. 1988. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90113-3](http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114(88)90113-3).

TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H. D.; MUSTAFA, T. I.; COELHO, V. L. **Aterramento Elétrico Impulsivo Em Baixa e Alta Frequências**. Porto Alegre - RS: Edipucrs, 2007. 328 p.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer Manual**. Leiden. 2017. Disponível em: https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.6.pdf. Acesso em: 12 jul. 2019.

WANG, L. X. **Adaptive Fuzzy Systems and Control**. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 232p.

WANG, Guangyuan; ZHANG, Yue. The theory of fuzzy stochastic processes. **Fuzzy Sets And Systems**, Xian, v. 51, n. 2, p. 161-178, out. 1992. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114\(92\)90189-b](http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114(92)90189-b).

WANG, L.X.; MENDEL, J. M. Generating fuzzy rules from examples. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, Xian, v. 22, n. 6, p. 1414-1427, 1992.

WAZEN, R. N. Análise do Sistema de Aterramento de Estruturas Metálicas com aplicação de Algoritmos Genéticos. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 19., 2010, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo - SP: Sendi - 2010, 2010. p. 1-9.

WONG, F. S; WANG, P. Z. A. stock selection strategy using Fuzzy neural networks. **Neurocomputing**, Singapore, v. 2, n. 5, p. 233-242, 1991.

WUERGES, A. F. E.; BORBA, J. A. Redes neurais, lógica nebulosa e algoritmos genéticos: aplicações e possibilidades em finanças e contabilidade. **Journal of Information Systems and Technology Management**. Florianópolis – SC, v. 7, n. 1, p.163-182, 30 abr. 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4301/s1807-17752010000100007>.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, Oxford, v. 8, n. 3, p.338-353, jun. 1965. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x).

APÊNDICE A – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO ALGORÍTIMO DE OTIMIZAÇÃO DESENVOLVIDO UTILIZADO NA SEÇÃO 5.4.3

```

ObjectiveFunction = @simple_fitness;
nvars = 3; % Number of variables
LB = []; % Lower bound
UB = [81 560 18]; % Upper bound
ConstraintFunction = @simple_constraint;
rng(1,'twister') % for reproducibility
opts.MaxGenerations=100;
opts.PopulationSize=50;
[x,fval,exitFlag,Output]=ga(ObjectiveFunction,nvars,[],[],[],[],LB,UB,ConstraintFunction,opts);
fprintf('The number of generations was : %d\n', Output.generations);
fprintf('The best function value found was : %g\n', fval);
fprintf('The best function value found x was : %g\n', x);
fprintf('The number of function evaluations was : %d\n', Output.funccount);
r=(x(1)/4);
fprintf('O raio da malha é : %g\n', r);
fprintf('O comprimento de mínimo de cabos deverá ser de é : %g\n', x(2));
fprintf('O número de avaliações: %g\n', (Output.funccount));

The number of generations was : 2
The best function value found was : 4.02174
The best function value found x was : 80.9999
The best function value found x was : 560
The best function value found x was : 17.916
The number of function evaluations was : 5295
O raio da malha é : 20.25
O comprimento de mínimo de cabos deverá ser de é : 560
O número de avaliações: 5295

```

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)