

MODELO DE OTIMIZAÇÃO GA-FUZZY PARA MALHAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

Leandro Machado (Universidade Cândido Mendes) E-mail: l.s.machado@hotmail.com
Prof. Ítalo Oliveira Matias (Universidade Cândido Mendes) E-mail: italo@ucam-campos.com

Resumo: Este artigo utilizou a inteligência computacional com uso do software Matlab para o desenvolvimento de um modelo de otimização de malhas de aterramento. O modelo foi desenvolvido com utilização da lógica Fuzzy com utilização de parâmetros otimizados por meio de algoritmos genéticos. O modelo otimizado busca encontrar a menor área e quantitativo de cabos para o desenvolvimento do projeto da malha. Este modelo foi aplicado a uma subestação elevadora de uma USF (Usina de Solar Fotovoltaica) 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 encontrado uma área de 1640 m² 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 onde foi possível correlacionar os parâmetros de entrada com os resultados encontrados pelo AG com divergências inferiores a 3%.

Palavras-chave: Aterramento, Fuzzy, Algoritmo Genético, Subestação.

GA-FUZZY OPTIMIZATION MODEL FOR SUBSTATIONS GROUNDING MESH

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, Substation.

1. Introdução

O aterramento elétrico é um assunto de bastante relevância e complexidade que têm 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, segurança para seres vivos e proteção dos equipamentos, o aterramento elétrico tem despertado o interesse de diversos pesquisadores (VISACRO FILHO, 2002) (ALÍPIO et al., 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 Ω .m, este 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; TAHAN; JARDINI, 2007). Dentre as principais razões da elevação destes custos estão à necessidade de uma maior área de projeto, aumento do quantitativo e das bitolas dos cabos, aumento do custo com obras civis, etc.

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 toque da malha estão associados à profundidade, área da adotada e espaçamento entre condutores.

Para uma determinada profundidade e área, podem ser adotados diferentes espaçamentos entre os condutores. Estes 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 seja desenvolvido o projeto normatizado da malha.

Nos últimos anos a aplicação da inteligência computacional tem sido um caminho eficaz para análise do comportamento, melhoria do desempenho e redução dos custos de malhas de aterramento.

2. Revisão de literatura

2.1 Aterramento de subestações

Segundo Modena e Sueta (2011), o sistema de aterramento de uma subestação é composto por eletrodos de aterramento, pelos cabos e por todos os elementos metálicos interconectados.

As Malhas de aterramento, conforme a NBR 15749 (ABNT, 2009) são formadas por um conjunto de condutores nus, interligados e enterrados no solo.

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

A IEEE Std 80 (IEEE, 2015) fornece orientações e informações pertinentes a práticas seguras de aterramento no projeto de subestação em CA.

Em subestações de energia a resistência de aterramento é um dos principais fatores para a análise da segurança elétrica. Ela 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).

2.2 Algoritmos genéticos

Os Algoritmos Genéticos tiveram seus princípios desenvolvidos por John Holland, em 1975, e trata-se de uma heurística de otimização inspirada na evolução biológica. Neste algoritmo, indivíduos competem entre si pela sobrevivência, evoluindo através de 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). Este processo é análogo ao processo de seleção natural da biologia, baseando-se também no processo de reprodução sexuada. Desta forma, o AG executa uma estratégia de busca múltipla, permitindo a emergência de soluções ótimas dentro do espaço de variáveis de um problema específico.

Os mecanismos naturais de preservação e evolução de uma população sua reprodução e mutação. A reprodução tem por base o cruzamento (“crossover”) genético. Através de mutação dos indivíduos é possível incluir diversidade numa espécie. Na Figura 1 encontra-se o ciclo básico de um algoritmo genético.

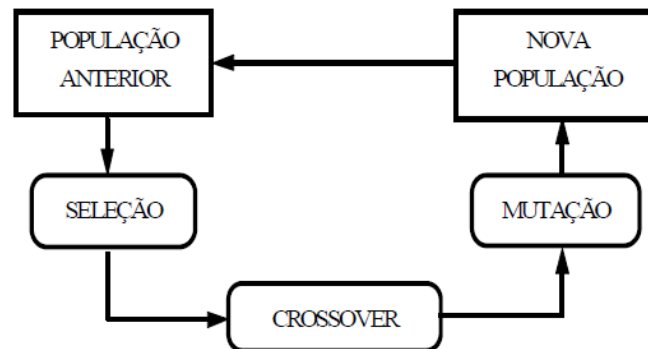


Figura 1 – Ciclo básico de um algoritmo genético
Fonte: GOMIDE; GUDWIN (1994)

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 que possui mais de dois 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).

Segundo Mendel (1995), 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. Na Figura 2 está representado o sistema Fuzzy.

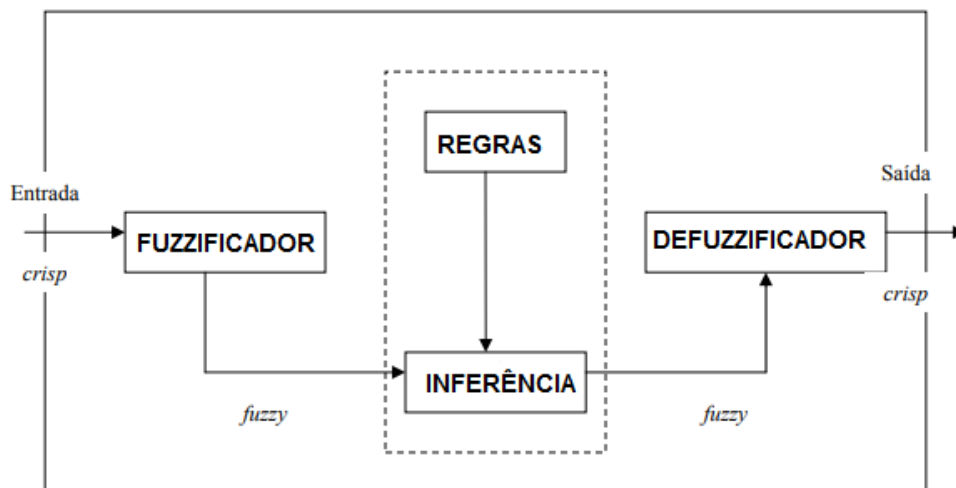


Figura 2 – Sistema FUZZY
Fonte: COELHO et al. (2018)

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. Isto 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, 2007).

3 Materiais e métodos

O problema do desenvolvimento de malhas de aterramento consiste em encontrar a menor área e 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, que foi estruturado de forma que fosse otimizado pelo algoritmo genético (AG) com utilização do software Matlab. De posse dos parâmetros encontrados através do Algoritmo genético foram criadas as entradas, saídas e regras do sistema Fuzzy, desenvolvido com o Matlab.

O AG foi implementado em Matlab devido a ser uma linguagem de alto nível e dedicada à 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 segundo normativas IEEE Std 80 (IEEE, 2015) e NBR 15751 (ABNT, 2013). Este modelo é aplicável a solos com faixa de resistividade de 300 a 500 Ω .m, com máxima corrente de curto circuito de 1,6 KA.

3.1 Parâmetros e quesitos para modelagem da malha

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 1.

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R \quad (1)$$

Onde:

ρ - É a resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

a - Distância entre os eletrodos (m);

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

3.1.2 Cálculo da resistência da malha

A resistência da malha de aterramento correspondente aos condutores horizontais pode ser determinada conforme a equação 2, proposta por Laurent e Nieman IEEE Std 80 (IEEE, 2015).

$$R = \frac{\rho a}{r} + \frac{\rho a}{Lt} \quad (2)$$

Onde:

R - Resistência da malha em Ohms (Ω);

ρa - Resistividade aparente do solo, expressa em ($\Omega \cdot m$);

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 3, desenvolvida por Sverak possibilita o cálculo de resistência da malha onde se leva em consideração a profundidade da malha (IEEE Std 80, 2015).

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{Lt} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (3)$$

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 através do conjunto de equações que considera as resistências combinadas entre hastes e condutores. A resistência total da malha é calculada conforme equação (4), desenvolvida por Schwarz.

$$R_m = \frac{R_1 \times R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \times R_m} \quad (4)$$

Onde:

R_1 - Resistência da malha para os condutores horizontais (Ω);

R_2 - Resistência resultante de todas as hastes verticais (Ω);

R_m - Resistência mútua dos cabos e eletrodos verticais (Ω).

3.1.3 Máxima tensão de passo tolerável

A tensão de passo máxima permitida para uma pessoa de 70 Kg, segundo a IEEE Std 80 (IEEE, 2015) e dado segundo a equação 5.

$$(E \text{ step } 70) = (1000+6 \times CS \times \rho_s) \times 0.157 / \sqrt{Tf} \quad (5)$$

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 6.

$$CS = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2hs + 0.09} \quad (6)$$

Onde:

hs - Espessura da cama de brita (m);

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

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

A tensão de passo existente na periferia da malha segundo a IEEE Std 80 (IEEE, 2015) é calculada de acordo com a equação 7.

$$E_m = \frac{\rho \times I_{cft} \times K_s \times K_i}{L_{cm}} \quad (7)$$

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 8.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (8)$$

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 através da equação 5.

3.1.4 Máxima tensão de toque tolerável

A tensão de toque máxima permitida para uma pessoa de 70 Kg, segundo a IEEE Std 80 (IEEE, 2015) e dado segundo a equação 9.

$$(E \text{ touch } 70) = (1000 + 1,5 \times CS \times \rho_s) \times 0,157 / \sqrt{T_f} \quad (9)$$

Onde:

(E touch 70) - Máxima tensão de passo admissível para pessoa de 70 kg (V);

T_f - 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 (Ω.m).

4 Formulação do problema por algoritmo genético

4.1 Dados de entrada e delimitações do estudo

A motivação para este estudo surgiu devido a 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 Ω.m. De forma a contribuir para otimização de outros projetos e estudos foi desenvolvido um modelo otimizado para projetos de malhas para solos com resistividades entre 200 a 500 Ω.m.

Os dados utilizados para o desenvolvimento do algoritmo genético foram:

Resistividade do solo - 200 a 500 Ω.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.

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: 5 MW.

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 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 área mínima fosse suficiente para se alcançar a resistência desejada e que o comprimento total de cabos fosse suficiente 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:

f(x) - Função a ser minimizada;

x1 - 4 vezes o raio da malha (m);

x2 - Comprimento total de cabos (m);

x3 - Comprimento total de hastes (m).

Principias Restrições utilizadas

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).

4.3 Resultados do algoritmo proposto

Após elaboração da função objetivo e definição das restrições as equações e inequações foram remodeladas padrão de linguagem do AG. Matlab. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros utilizados no AG.

Tabela 1 – 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 por último 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. Na Figura 3 encontra-se o algoritmo desenvolvido e os resultados alcançados após execução.


```
FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS RUN
1 - ObjectiveFunction = @simple_fitness;
2 - nvars = 3; % Number of variables
3 - LB = []; % Lower bound
4 - UB = [81 570 15]; % Upper bound
5 - ConstraintFunction = @simple_constraint;
6 - rng(1,'twister') % for reproducibility
7 - opts.MaxGenerations=100;
8 - opts.PopulationSize=50;
9 - [x,fval,exitFlag,Output]=ga(ObjectiveFunction,nvars,[],[],[],[],LB,UB,ConstraintFunction,opts);
10 - fprintf('The number of generations was : %d\n', Output.generations);
11 - fprintf('The best function value found was : %g\n', fval);
12 - fprintf('The best function value found x was : %g\n', x);
13 - fprintf('The number of function evaluations was : %d\n', Output.funccount);
14 - r=(x(1)/4);
15 - fprintf('O raio da malha é : %g\n', r);
16 - fprintf('O comprimento de mínimo de cabos deverá ser de é : %g\n', x(2));
17 - fprintf('O número de avaliações: %g\n', (Output.funccount));
18

The number of generations was : 2
The best function value found was : 4.2337
The best function value found x was : 80.9999
The best function value found x was : 570
The best function value found x was : 14.9974
The number of function evaluations was : 5280
O raio da malha é : 20.25
O comprimento de mínimo de cabos deverá ser de é : 570
O número de avaliações: 5280
```

Figura 3 – Arquivo com função de otimização (Fitness)

Fonte: Adaptado do Matlab (2020)

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 e com utilização 570 m de cabo. Na Figura 4 pode ser observado a distribuição dos cabos na malha.

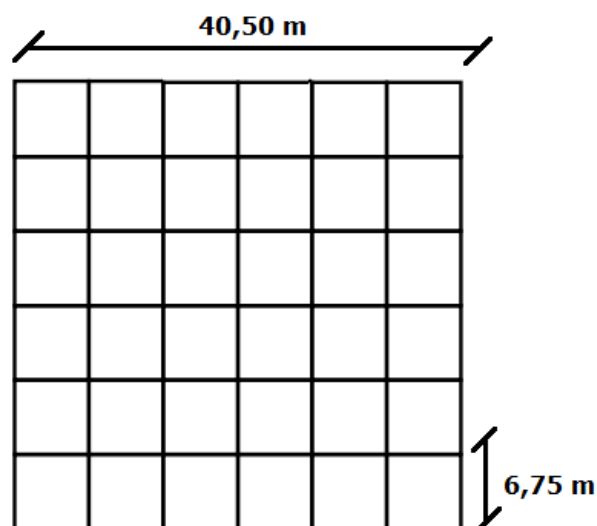


Figura 4 – Distribuição de cabos na malha

Fonte: Própria (2020)

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

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.

5.1 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 do tipo trapezoidal.

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 5.

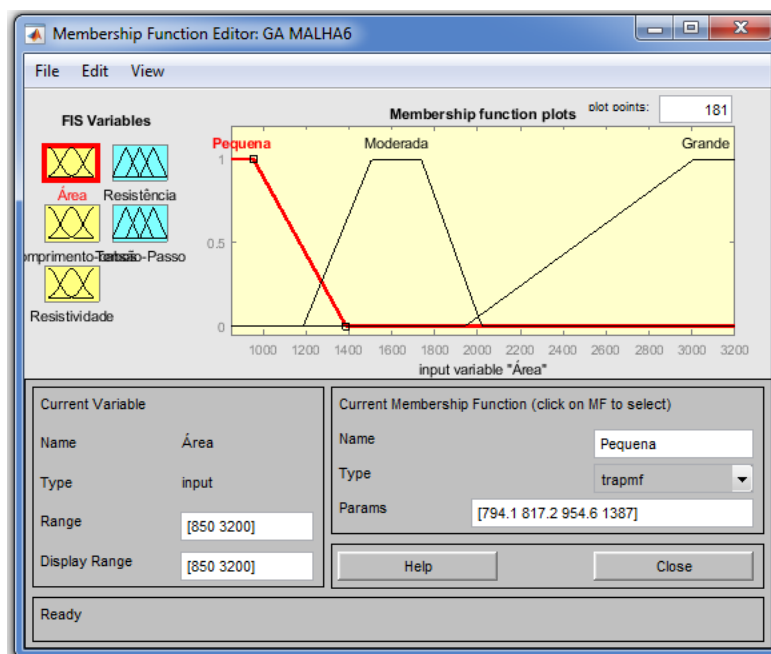


Figura 5 – Funções de pertinências para a entrada (Área)
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

5.1.2 Comprimento de cabos

A faixa de comprimentos de cabos utilizados nesta variável foi de 280 a 1100 m, como pode ser visto na Figura 6.

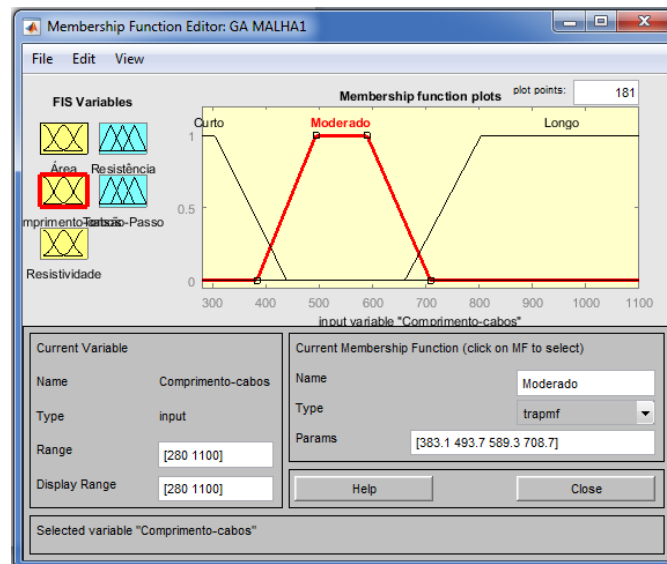


Figura 6 – Funções de pertinências para a entrada (Espaçamento)
 Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

5.1.3 Resistividade

Na Figura 7 encontra-se a terceira variável de entrada, que a resistividade aparente do solo, onde faixa adotada foi de 200 a 500 $\Omega.m$ conforme proposta inicial deste estudo.

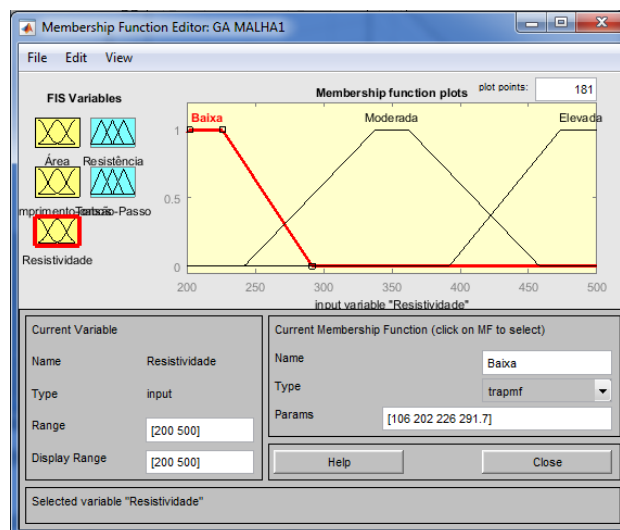


Figura 7 – Funções de pertinência para entrada (Comprimento de cabos)
 Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

5.2 regras criadas

A base de regras é um dos principais componentes dos sistemas Fuzzy. É constituída por sentenças SE-ENTÃO (IF-THEN rules), 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. Estas regras são elaboradas no editor de regras (Rule Editor), que está representado na Figura 8.

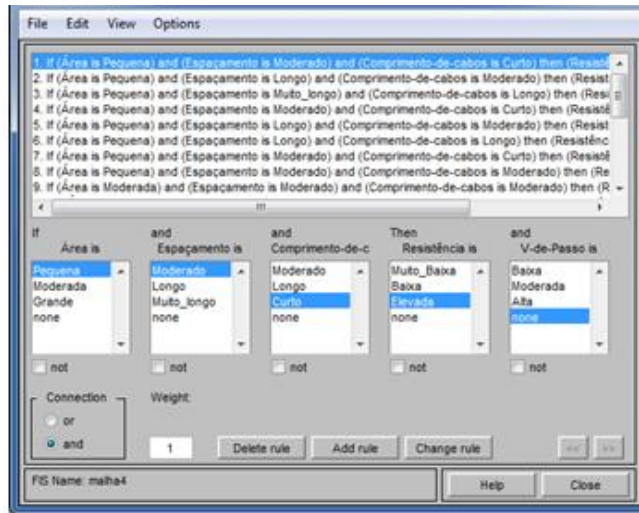


Figura 8 – Elaboração de regras do modelo Fuzzy no Toolbox Matlab
 Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

5.3 Saídas do sistema Fuzzy

Este sistema foi elaborado para duas saídas, a primeira é a resistência da malha e a segunda corresponde 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 através de simulação computacional através de equacionamentos da normativa IEEE Std 80 (IEEE, 2015).

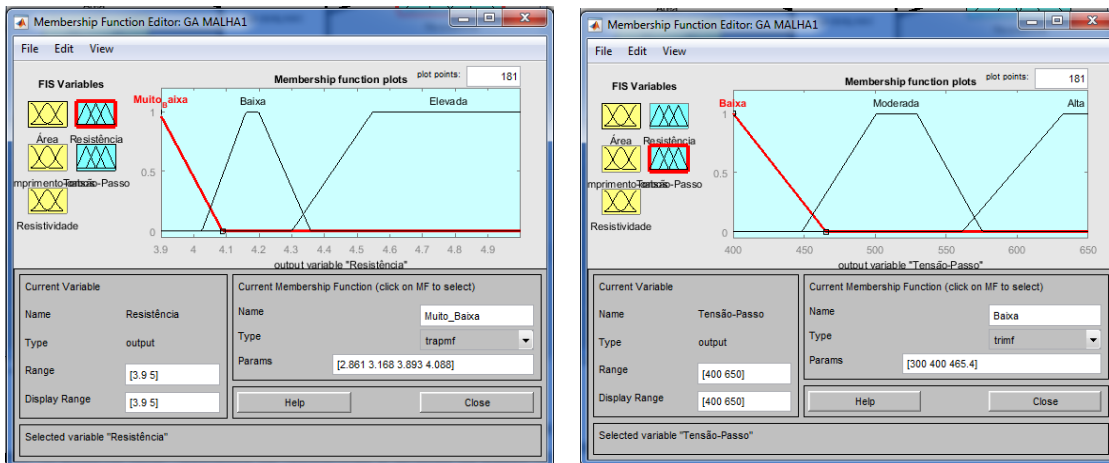


Figura 9 – Variáveis de saída (Resistência e Tensão de passo)
 Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

5.4 Resultados das simulações

Após terem sido criadas as funções de pertinências das entradas e a base de regras, foi possível obter resultados de resistências e tensões de passo no sistema Fuzzy. Na Figura 10 encontra-se um dos resultados de resistência para as funções de pertinências e regras estabelecidas.

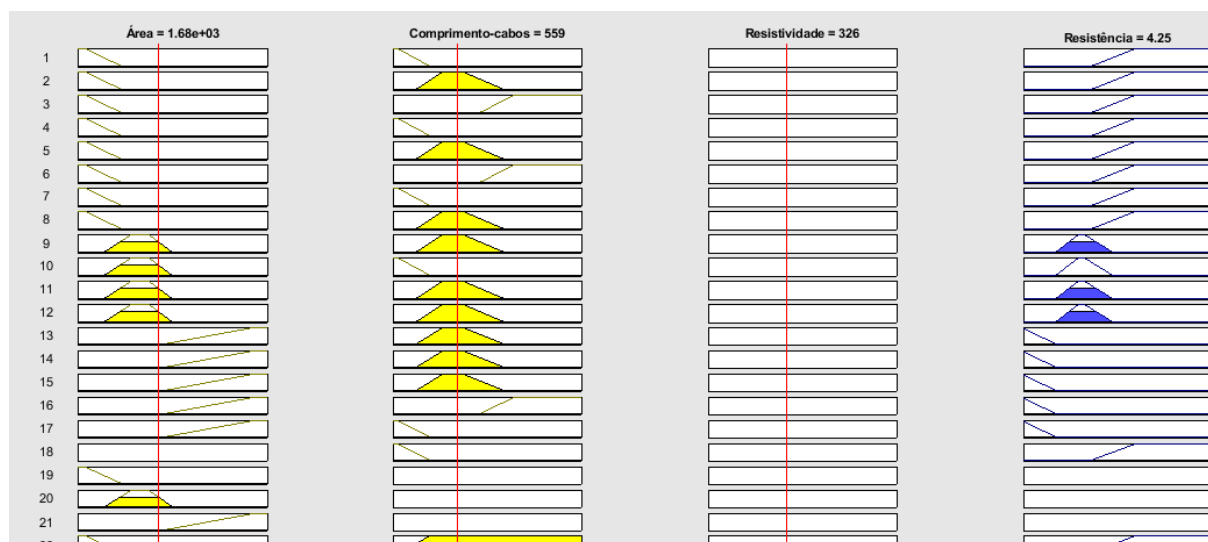


Figura 10 – Visualização gráfica das regras de associação do modelo proposto
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

5.5 Superfície da resistência gerada pelas regras estabelecidas

Após criação do conjunto de regras aplicado às funções de pertinências, foi possível através do menu View do Toolbox Matlab, a criação de uma superfície para a saída resistência total da malha. Na Figura 11 é possível visualizar a relação entre resistividade, comprimento total de cabos e resistência encontrada.

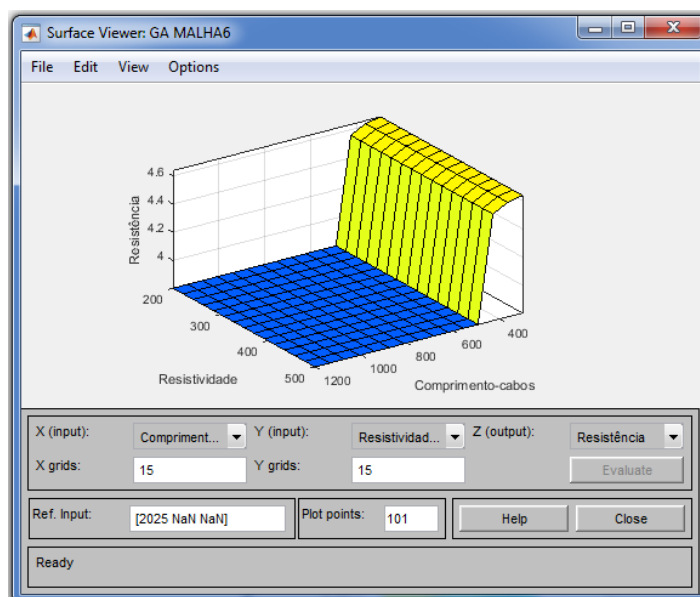


Figura 11 – Superfície gerada através dos resultados das regras do sistema Fuzzy para saída Resistência.
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

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 a saída tensão de passo. Na Figura 12 pode ser visualizada a superfície gerada.

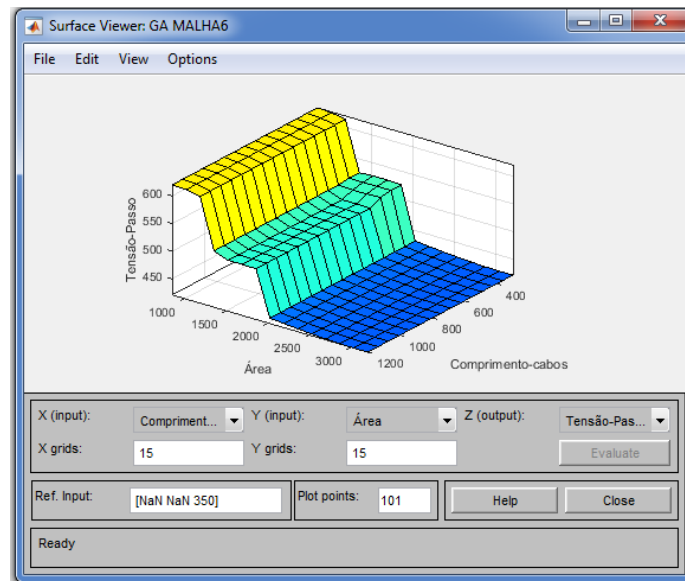


Figura 12 – Superfície gerada através dos resultados das regras do sistema Fuzzy para saída Tensão de passo.
Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

5.7 Resultados e discussão

Este tópico tem como objetivo demonstrar os resultados das operações analíticas obtidas a partir dos parâmetros encontrados com a otimização através do algoritmo genético. Na Tabela 2 encontram-se os resultados dos parâmetros encontrados através do algoritmo genético e as divergências para com os resultados do modelo Fuzzy desenvolvido.

Espera-se que os dados apresentados contribuam para a descoberta de novos conhecimentos, auxilie no projeto otimizado de malhas de aterramento.

Tabela 2 – Resultados da otimização através do AG e divergências para o 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	1.640,25	570	4,23	1,10
400	2.025	720	4,86	1,45
500	3.136	1.120	4,80	1,65

Fonte: Fonte: Adaptado do Fuzzy Toolbox Matlab (2020)

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

6 Conclusão

Os resultados encontrados através do algoritmo genético possibilitaram encontrar parâmetros que permitiram projetar uma malha de aterramento com custo reduzido. Vale a pena ressaltar que este estudo teve como objetivo principal a 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 Algoritmo Genético encontrou o melhor resultado para área de 1640,25 m^2 ,

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.

Os parâmetros otimizados através do algoritmo genético puderam ser simulados no modelo de otimização Fuzzy, com divergência máxima de 3% em relação aos encontrados no AG.

Este estudo pode comprovar a eficiência e importância da inteligência computacional na tomada de decisões em projetos de engenharia. É importante ressaltar que embora este estudo tenha sido aplicado 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.

Referências

ALÍPIO, RAFAEL SILVA ET AL. *Modelagem de aterramentos elétricos para fenômenos de alta frequência e comparação com resultados experimentais*. Revista Controle & Automação, São João Del Rei, Mg, Brasil, v. 22, n. 1, p.89-102, jan. 2011.

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

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

COELHO, M. H. ET AL. *Application of Fuzzy Control in Embedded Sensing Systems for Beekeeping Monitoring*. XLIV Latin American Computer Conference (CLEI), São Paulo, p.207-214, 2018.

COURA, A. P. R., TAHAN, C. M.V., JARDINI, J. A. Otimização de sistemas de aterramento em subestações 34,5/13,8 kV. 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.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. 80 - STD - 2013: *Guide for safety in ac substation grounding*. New York, 2015.

JAMIL, M. & YANG, XIN-SHE. *A literature survey of benchmark functions for global optimisation problems*. International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, v. 4, n. 2, p. 150-194. ISSN 2040-3607, 2013.

LIMA, A.B. *Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão*. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação 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. 476 p.

MENDEL, J.M. *Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial*. Proceedings of The IEEE, v.83, n.3, p.345-377, 1995.

MODENA, J. & SUETA, H. *Projeto de aterramento de malhas de subestações elétricas: Cálculo da corrente da malha*. O Setor Elétrico, São Paulo, p.46-51, abr. 2011. Mensal.

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

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

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