



Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Campus João Monlevade



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

Trabalho de Conclusão de Curso

Localização de Faltas no Sistema de Distribuição

Utilizando o Algoritmo de Seleção Clonal

Laura Freitas Souza

João Monlevade, MG

2022

Laura Freitas Souza

**Localização de Faltas no Sistema de Distribuição
Utilizando o Algoritmo de Seleção Clonal**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich

João Monlevade, MG

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729l Souza, Laura Freitas.
Localização de faltas no sistema de distribuição utilizando o algoritmo de seleção clonal. [manuscrito] / Laura Freitas Souza. - 2022.
53 f.

Orientador: Prof. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Redes elétricas - Localização de falhas (Engenharia). 3. Sistemas de energia elétrica. I. Zvietcovich, Wilingthon Guerra. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Laura Freitas Souza

Localização de Faltas no Sistema de Distribuição Utilizando o Algoritmo de Seleção Clonal

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Elétrico

Aprovada em 09 de Maio de 2022

Conforme previsto no § 3º do artigo 5º da Resolução Coee nº11/2018, a defesa da monografia foi substituída por publicação de artigo em evento científico.

De acordo

Wilingthon Guerra Zvietcovich, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/05/2022



Documento assinado eletronicamente por **Wilingthon Guerra Zvietcovich, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/05/2022, às 15:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0321657** e o código CRC **8E30917F**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.005789/2022-04

SEI nº 0321657

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3808-0818 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado força e confiança no meu caminho.

Agradeço aos meus pais, Francisco de Assis de Souza e Nivalda de Araújo Freitas, por todo apoio e suporte, para construção da minha vida acadêmica. À minha irmã Larissa Freitas Souza pelo apoio incondicional.

Ao meu orientador Wilingthon Guerra Zvietcovich, por me apresentar ao mundo da pesquisa científica. Agradeço por todas oportunidades a mim concedidas e por compartilhar seu conhecimento.

Aos professores do DEELT por contribuírem com minha formação de engenheira eletricista.

Ao Grupo Neoenergia, pela oportunidade de estágio e de desenvolvimento profissional.

Agradeço ao meu amigo Luís Henrique dos Santos, por ter lutado lado a lado durante os 5 anos da graduação.

Agradeço a todos que passaram por minha vida em João Monlevade e apoiaram meus sonhos.

A persistência é o caminho do êxito.

(Charles Chaplin)

RESUMO

Este trabalho, apresenta a formulação matemática e a implementação computacional de uma aplicação da técnica de otimização Algoritmo de Seleção Clonal para resolver o problema de localização de faltas na Redes de Distribuição de Energia Elétrica, com a finalidade de evitar prejuízos na deterioração de indicadores de Qualidade de Energia Elétrica auxiliando ao Centro de Operação de Distribuição de uma empresa de distribuição a direcionar as equipes de manutenção diante de ocorrências de faltas elétricas. O Algoritmo de Seleção Clonal é inspirado no comportamento do sistema imunológico dos mamíferos frente aos agentes infecciosos. Na aplicação desta técnica, são utilizadas estratégias adequadas ao problema de localização de faltas com o objetivo de aumentar sua eficiência e evitar possíveis casos de simetria de soluções. Somada à alocação de um número reduzidos de medidores na rede, torna-se um método viável para as concessionárias de energia. Os testes foram realizados nos sistemas de distribuição radial IEEE-33 e IEEE-69 barras e, através dos resultados, foi possível verificar a convergência do algoritmo para soluções precisas em relação aos locais reais de falta.

Palavras chave: Redes Radiais, Falta Elétrica, Localização de Falta, Seleção Clonal, Otimização.

ABSTRACT

This research project is focused on introducing the Clonal Selection Algorithm formulation and its respective implementation as an optimization technique, used to solve fault localization problems at the distribution grid. In this project this algorithm is applied in order to avoid Energy Quality Indicators to decrease as well as to assist Distribution Operation Center on heading the maintenance teams at ground whenever an electric fault occurs. The Clonal Selection Algorithm is inspired by the mammals' immunological system when standing up to infections. On its application, proper fault location techniques are used aiming at increasing its efficiency and avoiding cases with symmetrical solutions while using a reduced number of electric meters, providing a cost-feasible method for distribution companies. The tests were realized using the IEEE-33 and IEEE-69 bus radial distribution system and its results have shown the algorithm convergence towards precise solutions in terms of real fault location.

Keywords: Radial Electrical Networks, Electrical Fault, Fault Location, Clonal Selection, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas para Localização de Falhas.	2
Figura 2: Ranking de continuidade das concessionárias de 2020.	3
Figura 3: Diagrama unifilar de rede primária radial.	9
Figura 4: Exemplo de elo fusível e chave fusível.	10
Figura 5: Exemplo de religador automático.	11
Figura 6: Exemplo de seccionador automático.	11
Figura 7: Exemplo de relé de sobrecorrente.	12
Figura 8: Exemplo de relé digital.	12
Figura 9: Fluxograma do Método BFS para Fluxo de Potência.	17
Figura 10: Cálculo da corrente de carga	18
Figura 11: Curto circuito trifásico.	20
Figura 12: Circuito equivalente do curto circuito trifásico.	20
Figura 13: Circuito equivalente do curto circuito fase terra.	21
Figura 14: Circuito equivalente de curto circuito dupla fase.	22
Figura 15: Circuito equivalente de curto circuito dupla fase terra.	23
Figura 16: Algoritmo de cálculo de curto circuito.	25
Figura 17: Ramo da Inteligência Computacional com foco no SIA.	26
Figura 18: Seleção Clonal.	27
Figura 19: Funcionamento da ferramenta proposta.	29
Figura 20: Rede elétrica radial.	29
Figura 21: Representação de uma solução.	30
Figura 22: Matriz de simetria para o sistema da Figura 20.	31
Figura 23: Vetor de distância simetria para o trecho 9 do sistema da Figura 20.	31
Figura 24: Distância de trecho 9 para os demais trechos da Figura 20.	32
Figura 25: Produção dos anticorpos.	33
Figura 26: Método de localização de faltas com a aplicação do CLONALG.	36
Figura 27: Representação dos casos para avaliação do método.	38
Figura 28: Convergência do CLONALG para o Caso 3.	42

Figura 29: Representação dos casos para avaliação do método para 69 barras.....	43
Figura 30: Convergência do CLONALG para o Caso 3.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Frequências típicas de ocorrências de curtos circuitos.	16
Tabela 2: Tipos de curtos circuitos considerados no método.	37
Tabela 3: Parâmetros da metodologia.	37
Tabela 4: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 1.	38
Tabela 5: Resultados da Localização de Faltas para o Caso 1.	39
Tabela 6: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 2.	39
Tabela 7: Resultados da Localização de Faltas para o Caso 2.	40
Tabela 8: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 3.	40
Tabela 9: Resultados da Localização de Faltas para o Caso 3.	41
Tabela 10: Taxa de sucesso da metodologia – Rede de 33 barras.	41
Tabela 11: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 1.	43
Tabela 12: Resultados da Localização de Faltas para o Caso 1.	44
Tabela 13: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 2.	44
Tabela 14: Resultados da Localização de Faltas para o Caso 2.	45
Tabela 15: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 3.	45
Tabela 16: Resultados da Localização de Faltas para o Caso 3.	46
Tabela 17: Taxa de sucesso da metodologia – Rede de 69 barras.	46
Tabela 18: Rede de 33 barras.	53
Tabela 19: Rede de 69 barras.	54

LISTA DE ABREVIATURAS

QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RDEE	Redes de Distribuição de Energia Elétrica
COD	Centro de Operação de Distribuição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DGC	Desempenho Global de Continuidade
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
PSO	Otimização do Enxame de Partículas
GD	Geração Distribuída
PMUs	Unidade de Medição Fasoriais
SAE	Strack Auto-Encoder
MAS	Sistema Multiagente
BFS	Backward Forward Sweep
NA	Normalmente Aberta
NF	Normalmente Fechada
SE	Subestação
SAI	Sistema Imunológico Artificial
IC	Inteligência Computacional
CLONALG	Algoritmo de Seleção Clonal
FO	Função Objetivo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação do problema	1
1.2. Motivação e Justificativa	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Estado da Arte	4
1.5. Estrutura do Trabalho	7
2. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	9
2.1. Dispositivos de Proteção	10
2.2. Modelagem da Carga	13
3. ANÁLISE DE CURTO CIRCUITO.....	16
3.1. Fluxo de Potência	16
3.2. Modelagem do Curto Circuito.....	18
3.2.1. Componente Simétrica	18
3.3. Algoritmo para Cálculo de Curto Circuito	24
4. METODOLOGIA	26
4.1. Algoritmo de Seleção Clonal	27
4.2. Aplicação do Algoritmo de Seleção Clonal ao Problema de Localização de Faltas	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. Testes utilizando a rede de 33 barras.....	38
5.2. Testes utilizando a rede de 69 barras.....	42
6. CONCLUSÕES	48
6.1. Sugestões de Trabalhos Futuros	48
6.2. Publicações	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do problema

Nos últimos anos, surgiram novas filosofias de operação e planejamento nos Sistemas Elétricos de Potência, onde ascendeu a competitividade entre as concessionárias na busca por eficiência econômica e na necessidade de atender à qualidade de fornecimento de energia elétrica (PEREIRA, 2007). Esse contexto, incentivou avanços e o uso de dispositivos eletrônicos inteligentes, como relés, medidores e instrumentos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) que promoveram o progresso na medição, monitoramento, proteção e técnicas de controle (SENGER et al., 2005).

No entanto, mesmo com melhorias, as linhas de transmissão e de distribuição estão sujeitas a situações de curto circuitos como descargas atmosféricas, queda de árvores, envelhecimento de materiais, manobras incorretas e acidentes que podem ser suficientes para interromper o fornecimento de blocos de cargas (grupo de consumidores) (FILHO, 2013). Com isso, o conceito de QEE na Rede de Distribuição de Energia (RDEE) é atribuído à qualidade do produto, às variações de tensão, aos harmônicos e aos níveis de tensão, atribuído a qualidade do serviço, pela atribuição de registro de interrupções do fornecimento, dentre essas situações, nas quais o consumidor é mais afetado pela falta de energia elétrica (PEREIRA, 2019).

A filosofia de *Smart Grids* tem um papel fundamental para melhora da QEE, por exemplo, frente a ocorrência de uma falta elétrica (corte de fornecimento de energia elétrica a um grupo de consumidores) auxiliar na rápida identificação do local da falta geográfica do (PEREIRA, 2019), sendo este o foco deste trabalho. No geral, são várias tecnologias diferentes que contribuem com as *Smart Grids*, como sistemas de armazenamento utilizados como buffer de energia, telecomunicações que podem trocar dados com sensores e atuadores e controle que monitoram a rede elétrica (FALVO et al., 2013).

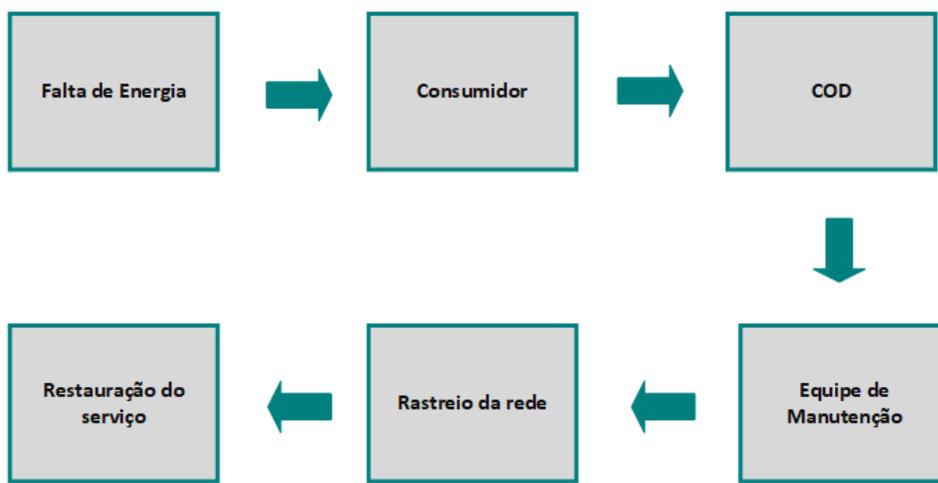
No geral, o problema de localização de faltas em RDEE contempla vários subproblemas, como o hardware relacionado à especificação de dispositivos controle e medição para a aquisição de sinais elétricos; o desenvolvimento de software com capacidade de receber os sinais elétricos e tratá-los com algoritmos de inteligência computacional para encontrar o local do defeito (PEREIRA, 2007).

1.2. Motivação e Justificativa

Apesar de todo o progresso tecnológico, o processo de localização de faltas ainda se baseia majoritariamente em sistemas que herdaram dependências do sistema telefônico, ou no contato com a atendente virtual de cada concessionária dos clientes afetados (SENGER et al., 2005). Nesse contexto, a localização de uma falta elétrica no sistema de distribuição não é um trabalho fácil devido a sua alta complexidade e dificuldade causada pela não homogeneidade de linha, resistência de falha, incerteza de carga e desequilíbrio de fase (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009).

Quando ocorre uma falta elétrica em algum ponto da rede, o sistema de proteção atua para isolar o defeito e, muitas vezes, deixa sem energia um determinado bloco de carga. A Figura 1 apresenta as etapas do problema de localização de falta. Primeiramente, algum cliente comunica à concessionária sobre a interrupção do fornecimento de energia elétrica, posteriormente o Centro de Operação de Distribuição (COD) irá registrar tal ocorrência e monitorar novos atendimentos. Em seguida, após obter informações suficientes daquele trecho, é acionada uma equipe de manutenção que se desloca até a região onde está o consumidor. Com isso, é feito um rastreamento da rede em busca do equipamento de proteção que atuou e, assim, rastrear na linha até encontrar o ponto de falta. Este processo pode demandar tempo elevado (até algumas horas) para a restauração completa do serviço.

Figura 1: Etapas para Localização de Faltas.

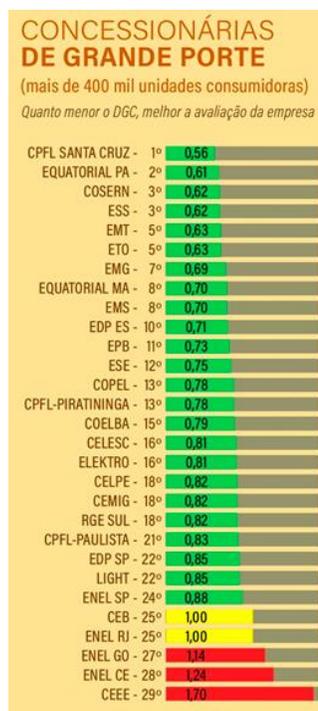


Fonte: Do autor.

Um instrumento de incentivo, disponibilizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) avalia todas as concessionárias de grande porte do país. A classificação é desenvolvida com base no Desempenho Global de Continuidade (DGC), constituído dos valores dos indicadores de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). No ranking da continuidade do serviço apresentado na Figura 2, são apresentados dados referentes a algumas das empresas de distribuição de energia no Brasil, sendo a CPFL SANTA CRUZ, EQUATORIAL PA e COSERN com as melhores colocações no ranking. Já a ENEL GO, ENEL CE e CEEE-D foram as últimas colocadas. Dessa forma, a ANEEL e o próprio consumidor conseguem monitorar a qualidade de serviço prestado pelas empresas distribuidoras.

Neste cenário, uma preocupação e desafio recorrente das concessionárias é reduzir o tempo de busca para identificar a falta, visando atender às normas de (QEE). Assim, dispor de uma ferramenta que auxilie na identificação rápida do local de falta é de grande importância para restaurar de forma rápida o fornecimento do serviço e, além disso, evitar os prejuízos relacionados à deterioração de indicadores de QEE como DEC e o FEC (ANEEL, 2018).

Figura 2: Ranking de continuidade das concessionárias de 2020.



Fonte: (ANEEL, 2021).

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a aplicação de uma técnica de otimização, o Algoritmo de Seleção Clonal, para localização de falta na RDEE visando reduzir o tempo de busca das equipes de manutenção pelo local de falta. Para isso é necessário a instalação de alguns poucos medidores de tensão viabilizando este trabalho e podendo ser utilizado por alguma concessionária de energia elétrica, refletindo-se na utilização de mais softwares e menos hardware.

Adicionalmente, tem-se como objetivos específicos de aprofundar os conhecimentos sobre a localização de faltas com base no estado da arte, pesquisar e conhecer equipamentos de proteção presentes na rede de distribuição de energia. Além disso, estudar e compreender o uso da meta heurística para resolução do problema de Localização de Faltas. Por fim, este trabalho analisa a eficiência do localizador nas redes de 33 e 69 barras do IEEE.

1.4. Estado da Arte

No livro de Saha, Izykowski e Rosolowski (2009) é apresentado um resumo da literatura sobre técnicas de localização de faltas de forma simplificada e de métodos de inteligência computacional para detecção de faltas. Dessa forma, são apresentados a seguir trabalhos recentes, com uso de métodos computacionais combinadas que empregam técnicas de detecção de faltas.

Em Dzafic, Mohapatra e Neisius (2010), os autores apresentam um método de localização de falta assimétricas, incluindo redes radiais e com malha. O algoritmo proposto, tem como entrada, informações em tempo real sobre a condição topológica da rede e as atualizações dos indicadores de falha. No trabalho, o algoritmo de localização de faltas é baseado na teoria dos grafos usando principalmente pesquisa de profundidade para dividir a parte afetada da rede em possíveis áreas defeituosas onde os indicadores servem como um guia para conectar as áreas.

Em Jamil, Singh e Sharma (2015) os autores trabalharam com um algoritmo baseado em Lógica Fuzzy usando a Transformada Wavelet discreta para identificar as várias falhas na RDEE. A técnica foi testada no sistema teste IEEE 13 barras e em um cenário do RDEE da Índia.

Nesse trabalho, a corrente das três fases é utilizada como sinal de entrada para identificação da falha, com o ângulo de início da falta foi de 0,90 e o valor da resistência da falta foi nulo.

Em Naidu, Gore e Ashok (2016) é proposta uma técnica de localização de faltas com a presença de recursos integrados de energia distribuída. O algoritmo desenvolvido pelos autores precisa de informações do fasor de tensão e corrente do final do sistema em caso de um evento de falha. Sendo testado com várias condições, como tipo de falha, resistência de defeito, ângulo inicial, ângulo de carga e nível de penetração da geração distribuída usando para simulação PSCAD/EMTP.

Em Tao et al. (2016) os autores propuseram um método de estimativa de localização de falta com base nos registros de queda de tensão. Desse modo, conseguiram determinar a posição da falha e a resistência de defeito pelo algoritmo de Otimização do Enxame de Partículas (PSO). Com o resultado da localização do defeito, os autores identificaram que o domínio de influência de queda de tensão reflete na área de consumidores e podem fornecer dados base para manter a operação de segurança e estabilidade da rede elétrica. No trabalho de Hui et al. (2019) os autores também utilizaram a técnica PSO para solucionar o problema de localização de falta para detecção de curto circuitos, polo-polo e polo-terra em sistemas de distribuição CC.

Em Trindade e Freitas (2016) os autores combinaram o monitoramento de capacidade de tensão dos medidores inteligentes com a impedância para solução da localização das faltas. Dessa forma, primeiramente aplicam um método baseado em impedância para obter a localização aproximada da falha. Posteriormente, usam as medições de tensão de medidores inteligentes para construir zonas de baixa tensão e com isso diminuir as múltiplas estimativas associadas ao método de impedância.

Em Pessoa (2017) são utilizadas redes neurais artificiais, sendo esta, uma técnica de aprendizado de máquina, onde estima-se a distância da falta em relação à subestação. Os testes foram realizados no sistema do IEEE 34 barras considerando variações no tipo, na impedância e no ângulo. O autor utiliza os dados dos medidores de QEE alocados de forma não otimizada e aplica o algoritmo de localização de faltas.

Em Souza, Ferreira e Campos (2017) os autores se baseiam no nível de curto-circuito nas barras. O cálculo de curto-circuito é feito com o objeto *fault* no OpenDSS em todas as barras da rede com possibilidade de serem o local da falta. As entradas consideradas para o localizador foram: *lockout* e alarmes de sobrecorrente provenientes do SCADA e de sensores, medição da

corrente de falta de forma analógica e o equipamento de origem da medição. Desse modo, os autores simularam uma falha na rede e fizeram a medição da origem e, com isso, comparam a corrente de falta simulada com a corrente de falta medida. Nesse caso, as menores diferenças indicam o local da falta.

Em Manassero, Di Santo e Souto (2017), os autores desenvolveram um método de localização de faltas em redes de distribuição com a presença de Geração Distribuída (GD) baseado em quantidades fasoriais de tensão e corrente. A obtenção das informações é feita através do cálculo de medições fornecidas por dispositivos inteligentes instalados no barramento da subestação, e nas informações sobre os parâmetros dos alimentadores. O método proposto pelos autores depende de um processo de otimização, pesquisa padrão, que estima o ponto de falta. Os testes realizados consideraram variações do tipo de falta e fases envolvidas, variações da resistência de falta, mostrando que a metodologia tem um alto nível de precisão.

Em Sonada, Souza e Márcio (2018), os autores buscaram uma ferramenta aplicável tanto em sistema convencional quanto em sistema com GD. Para a realização do trabalho, usaram o conceito computacional de Sistema Imunológico Artificial, para a localização de faltas, além de obter informações sobre o tipo de falta e resistência de defeito. Os autores fizeram o teste para um sistema IEEE 34 barras, onde é aplicada uma falha arbitrária para obter as variáveis de entrada e assim iniciar o método para identificar o local da falha.

Em Pereira (2019) o autor propõe uma ferramenta que deve estar integrada aos demais sistemas corporativos, para obter dados de medição, alarmes de atuação e indicação de eventos na rede em tempo real, restringindo assim a área de busca do defeito. No trabalho, o autor utiliza o Algoritmo Evolutivo para estimar o local e a resistência de falta, através de teste de defeitos na rede. O autor, considera algumas condições de monitoramento, com cenário de menor monitoramento à um cenário com maior monitoramento, verificando que o aumento da quantidade de informações do sistema contribui para resultados satisfatórios ao uso da metodologia.

Em Li, Chen e Jiang (2020), os autores propõem um método de localização de faltas baseado nas informações do estado da chave, com um modo de controle local. O método consiste primeiramente em uma lista de comutação de linha que é estabelecida de acordo com a posição e as informações de estado das chaves, sendo usada para representar a estrutura da topologia e informações do estado de mudança da linha. Posteriormente, aplicam um método de processamento de informações de comutação e um algoritmo de busca para descobrir o defeito.

No trabalho, o método é testado em falhas simples e falha dupla, obtendo resultados de forma rápida para diversas condições de operação da rede de distribuição.

Em Luo et al. (2020), os autores apresentam um método de localização de faltas para localizar defeitos na rede com base nas informações das Unidades de Medição Fasoriais (PMUs) alocadas. Nesse trabalho, a falha é determinada primeiro pela comparação das formas de onda da corrente de sequência zero em ambos os lados da seção de falha. Em seguida, os autores aplicam o Stack Auto-Encoder (SAE), tipo de estrutura de aprendizagem não supervisionada, que foi modelado para fornecer uma solução para identificar o local do defeito com os fasores de tensão e corrente. A metodologia foi testada por meio do simulador de rede de distribuição na plataforma PSCAD, obtendo resultados mais precisos que os tradicionais.

Por fim, em Mohamed et al. (2020), os autores apresentam um novo algoritmo de Sistema Multiagente (MAS) para aumentar a segurança e proteção de sistemas de potência. O MAS proposto para localização de falta, estimativa de distância e restauração automática de energia em uma rede com presença de GD. Os agentes inteligentes propostos consistem em vários nós, agentes, para coletar os dados em tempo real e o fluxo de energia entre diferentes processos das redes de energia. A metodologia foi testada com parte do sistema de distribuição da cidade de Kenitra no Marrocos, onde apresenta uma melhora na confiabilidade do sistema.

1.5. Estrutura do Trabalho

O trabalho será apresentado em 6 seções. Na seção 1 – “*Introdução*”, descreve a motivação e justificativa do problema, destacando os objetivos, os trabalhos recentes de outros autores que empregaram o mesmo tema do qual este trabalho foi desenvolvido.

A seção 2 – “*Sistema de Distribuição*”, aborda as características do sistema, os equipamentos de proteção na rede de distribuição e os modelos de carga.

A seção 3 – “*Análise de Curto Circuito*”, estuda do fluxo de potência e apresenta a modelagem dos tipos curto circuito na rede.

A seção 4 – “*Metodologia*”, detalha a metodologia Algoritmo de Seleção Clonal adaptada para resolução do problema, descrevendo o passo a passo do algoritmo.

Na seção 5 – “*Resultados e Discussões*”, são apresentados os resultados obtidos após as execuções do localizador de faltas nas redes de 33 e 69 barras do IEEE, através de tabelas e gráficos.

Finalmente, na seção 6 – “*Conclusão*”, apresenta a conclusão evidenciando a relevância do estudo para o meio acadêmico e para o setor de engenharia elétrica em geral.

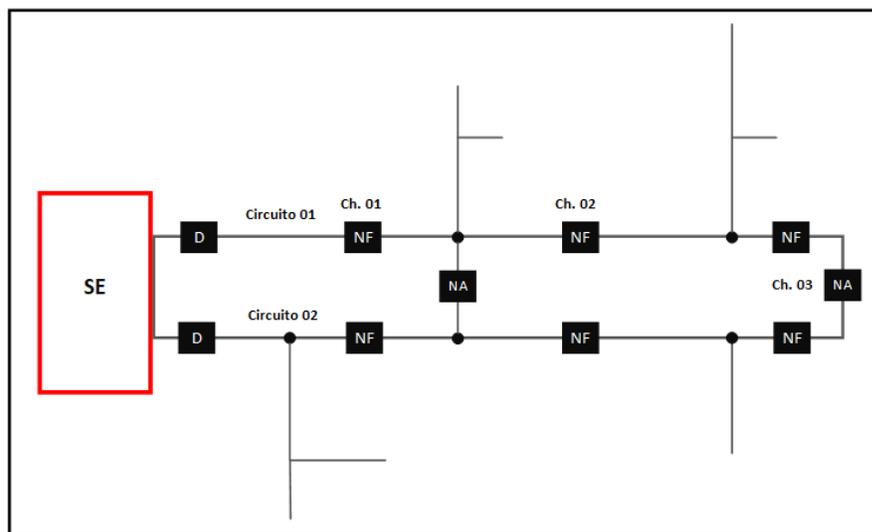
2. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

O trajeto da energia até o consumidor é um caminho longo, há uma vasta extensão geográfica entre usinas geradoras e centro consumidores ligado por linhas de transmissão. Nesse processo, a energia elétrica chega às subestações, local onde rebaixam os níveis de tensão, dando início a distribuição de energia (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

A forma mais comum nas RDEEs é a utilização de um alimentador primário com operação radial, que se ramifica pelas laterais e separam nas sub laterais para atender os transformadores (KAGAN, 2010). Com essa característica, a corrente é maior nos condutores do circuito que saem da subestação e diminui continuamente em direção à medida que laterais e sub laterais são retiradas do alimentador (GÖNEN, 2014). Quanto à confiabilidade da continuidade do serviço das redes radiais primárias é baixa por apresentar diversas ocorrências que deixam sem energia elétrica uma parte dos consumidores (GÖNEN, 2014).

Com a finalidade de reduzir esta falta de energia e proteger pessoas e equipamentos, o sistema de proteção pode isolar o defeito por meio de dispositivos de desconexão.

Figura 3: Diagrama unifilar de rede primária radial.



Fonte: Adaptado de (KAGAN, 2010).

Na Figura 3 estão representadas as chaves de seccionamento nas condições normalmente fechadas (NF) e normalmente abertas (NA) em dois circuitos que saem de uma mesma subestação (SE). Nas diferentes condições de configuração das chaves há possibilidade de socorro externo ou de isolamento de blocos de carga.

2.1. Dispositivos de Proteção

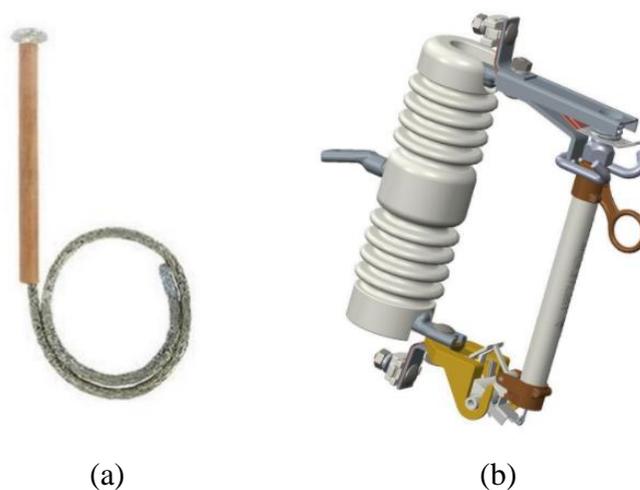
Os sistemas de proteção são essenciais para o fornecimento de energia elétrica ao consumidor. A qualidade do sistema de proteção da rede de distribuição depende de alguns requisitos como a seletividade, rapidez, sensibilidade, segurança e economia (FILHO; MAMEDE, 2011).

A seguir serão descritos os dispositivos mais utilizados na proteção da rede de distribuição de energia.

- **Elos Fusíveis**

Os elos fusíveis são utilizados juntamente com as chaves fusíveis que abrem os contatos em casos de seus rompimentos. Esses dispositivos atuam quando uma corrente de valor elevado, acima da capacidade de condução circular do elemento fusível, causando seu rompimento, e com isso, interrompendo o circuito (FILHO, 2013).

Figura 4: Exemplo de elo fusível e chave fusível.



Fonte: (MAURIZIO, 2021).

- **Religadores Automáticos**

Os religadores tem uma ampla aplicação nas redes aéreas por permitirem que os defeitos transitórios sejam eliminados, reduzindo o tempo de deslocamento da equipe de manutenção pelo alimentador em falta. São equipamentos que atuam interrompendo a corrente elétrica em momentos de curto circuito, onde há um processo de abertura e fechamento de um circuito de forma repetitiva (FILHO, 2013).

Figura 5: Exemplo de religador automático.



Fonte: (ABB, 2021).

- **Seccionadores Automáticos**

Os seccionadores automáticos são utilizados juntamente com os religadores. É um equipamento que proporciona a interrupção automática de circuitos, ou seja, quando o circuito é desenergizado por um religador, ocorrerá a contagem da interrupção (FILHO, 2013).

Figura 6: Exemplo de seccionador automático.



Fonte: (SHINSUNG, 2021).

Com isso, após um determinado número de interrupções o contato abre antes do retorno do religador. Além disso, podem interromper de forma manual a corrente nominal da carga.

- **Relés de Sobrecorrente**

Os relés de sobrecorrente são equipamentos que respondem à corrente que flui em algum elemento do sistema a qual está destinado a proteger, quando a corrente alternada supera o valor previsto (CHRISTOPOULOS; WRIGHT, 1993).

Figura 7: Exemplo de relé de sobrecorrente.



Fonte: (SCHNEIDER, 2021).

- **Relés Digitais**

Os relés digitais empregam microprocessadores que executam continuamente um programa que verifica os sinais de entrada do relé verificando uma ou mais funções de proteção.

Figura 8: Exemplo de relé digital.



Fonte: (SIEMENS, 2021).

A vantagem desses dispositivos é que possibilitam o acesso a informações e ajustes sejam feitos de forma remota, através de canais de comunicação (DAS, 2018).

2.2. Modelagem da Carga

Entender o comportamento das cargas são essenciais para planejar a operação e a expansão da rede elétrica e com isso é possível a estimar as tensões, as correntes, as potências e o fator de potência sob condições diversas (JR; GRAINGER, 1994). As cargas podem ser susceptíveis aos fenômenos permanentes ou transitórios da tensão. De acordo com Kagan (2010) a potência absorvida por uma carga depende de suas características e pode alterar em função da tensão a ela submetida, sendo descrita por:

$$P = f_1(V) \quad \text{e} \quad Q = f_2(V) \quad (2.1)$$

Onde:

P: potência ativa;

Q: potência reativa;

V: módulo da tensão;

$f_1(V)$: função que relaciona a potência ativa ao módulo da tensão;

$f_2(V)$: função que relaciona a potência reativa ao módulo da tensão;

Para modelagem da carga há duas equações básicas, a que representa a potência em função dos fasores de tensão e de corrente, definida na equação 2.2 e na equação 2.3, onde a tensão é dada em função dos fasores da impedância e da corrente da carga.

$$S_{esp} = V_{esp} \cdot I_{esp}^* \quad (2.2)$$

$$V_{esp} = Z_{esp} \cdot I_{esp} \quad (2.3)$$

A seguir serão apresentados os modelos de carga em função da tensão aplicada definidos por (KAGAN, 2010; PEREIRA, 2007).

- **Cargas de Potência Constante**

Para estas cargas as potências ativas e reativas são iguais aos seus valores nominais, invariantes com o valor da tensão de fornecimento, ou seja, mesmo com variação de tensão a potência é constante. Na equação 2.4, define-se a potência de uma carga com tensão diferente da nominal.

$$S = V \cdot I^* \quad (2.4)$$

Nesse caso, a corrente de uma carga de potência constante é inversamente proporcional a tensão especificada, como mostra a equação 2.5.

$$I = \left(\frac{S_{esp}}{V} \right)^* \quad (2.5)$$

- **Cargas de Corrente Constante**

Neste modelo, a corrente absorvida e o ângulo entre a tensão e corrente não variam, ou seja, são sempre constantes.

$$I = \frac{S_{esp}^*}{|V_{esp}|} \cdot \frac{V}{|V|} \quad (2.6)$$

Na equação 2.6 apresenta que para uma corrente de uma carga de corrente constante quando a tensão é diferente da especificada.

- **Cargas de Impedância Constante**

Neste tipo de carga, a impedância mantém-se constante, mesmo com variação da tensão aplicada nos terminais.

$$I = \frac{V \cdot S_{esp}^*}{|V_{esp}|^2} \quad (2.7)$$

A equação 2.7 mostra a representação matemática da corrente de uma carga com impedância constante quando é aplicada uma tensão diferente do terminal.

- **Modelo Combinado de Carga**

Neste cenário há a combinação dos modelos anteriores de carga de potência constantes, corrente constante e impedância constante. A carga pode ser representada por três modelos:

K_p : porcentagem de carga de potência constante;

K_i : porcentagem de carga de corrente constante;

K_z : porcentagem de carga de impedância constante.

com $K_p + K_i + K_z = 100\%$, o modelo ZIP pode ser definido pela equação 2.8 a seguir:

$$I = \frac{K_p}{100} \cdot \left(\frac{S_{esp}}{V} \right)^* + \frac{K_z}{100} \cdot \left(\frac{V \cdot S_{esp}^*}{|V_{esp}|^2} \right) + \frac{K_i}{100} \cdot \left(\frac{S_{esp}^*}{|V_{esp}|} \cdot \frac{V}{|V|} \right) \quad (2.8)$$

3. ANÁLISE DE CURTO CIRCUITO

Os sistemas de potência estão constantemente sujeitos à ocorrências sendo que as perturbações mais comuns e severas são os curtos circuitos, que ocorrem com a ruptura entre as fases ou contato entre fase e terra (KAGAN, 2010). Os curtos circuitos desequilibrados acontecem com maior frequência, sendo o curto circuito fase-terra o mais predominante e sendo o trifásico o que possui menor ocorrência e maior severidade (SATO; FREITAS, 2015). A Tabela 1 mostra a frequência da ocorrência de cada tipo de curto circuito.

Tabela 1: Frequências típicas de ocorrências de curtos circuitos.

Curto circuito	Frequência (%)
Trifásico	5,0
Bifásico	15,0
Bifásico-terra	10,0
Fase-terra	70,0

Fonte: (SATO; FREITAS, 2015).

Na sequência, é evidenciado o método para resolução do fluxo de potência utilizado neste trabalho e a modelagem de curto circuito.

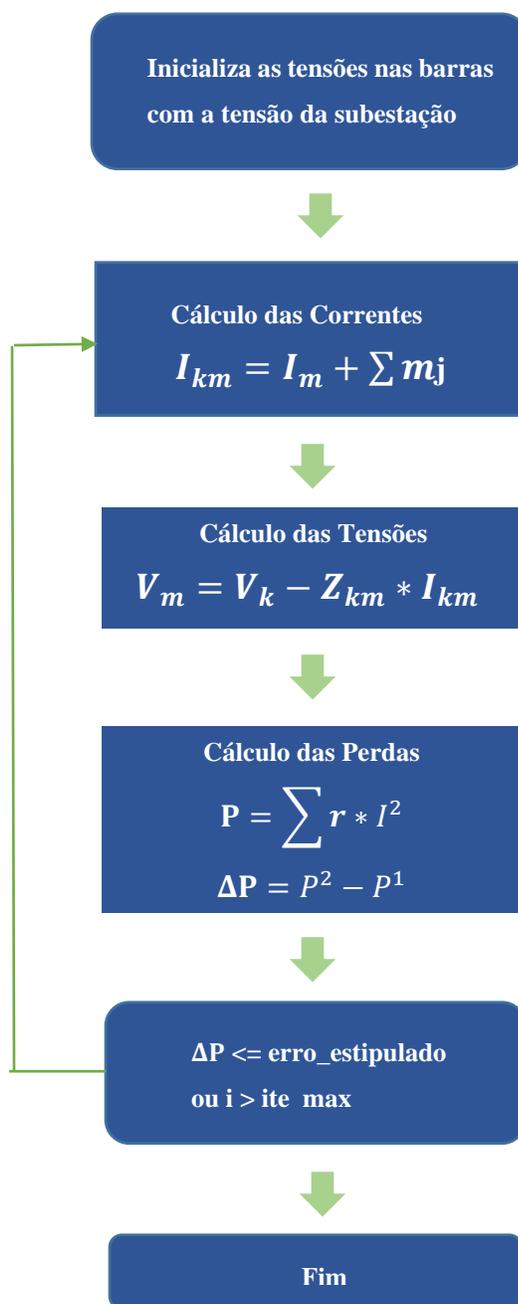
3.1. Fluxo de Potência

O estudo do fluxo de potência na rede disponibiliza a resolução do circuito que representa a rede, para qual dispõe da topologia, das tensões dos geradores, das constantes elétricas de seus elementos e das demandas das cargas (KAGAN, 2010). Assim, sua solução permite a simulação da operação da rede tendo por finalidade o cálculo da corrente e da potência nos trechos da rede e das tensões nas barras. Para este trabalho o método Backward-Forward Sweep (BFS) conhecido como varredura foi implementado.

O algoritmo do método BFS é implementado em duas etapas. Na primeira etapa (varredura – backward) onde são calculadas as correntes nos trechos com atualizações das tensões

e a segunda etapa (varredura – forward) é calculada as quedas de tensão nos trechos para em seguida calcular as novas tensões nas barras (MARCUS, 2006). A Figura 9 ilustra o passo a passo para implementação do algoritmo.

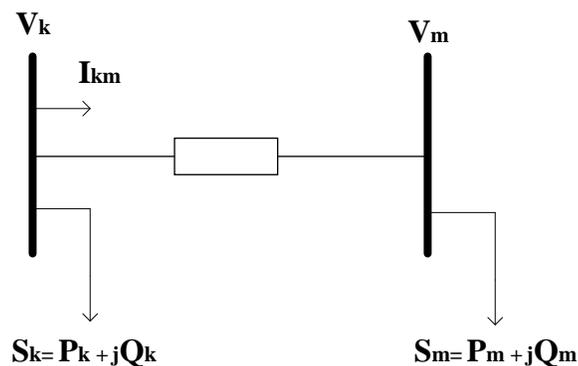
Figura 9: Fluxograma do Método BFS para Fluxo de Potência.



Fonte: Adaptado de (MARCUS, 2006).

A Figura 10 apresenta duas barras, onde estão representadas as cargas, tensões e a corrente.

Figura 10: Cálculo da corrente de carga



Fonte: Adaptado de (KAGAN, 2010).

3.2. Modelagem do Curto Circuito

A corrente de curto circuito em regime permanente é determinada como sendo a soma das correntes no alimentador de pré-falta, antes de ocorrer o defeito, com a corrente originada da falta (KAGAN, 2010). A equação 3.1 apresenta a corrente de curto circuito em regime permanente.

$$I_{k-j} = I'_{k-j} + I''_{k-j} \quad (3.1)$$

Onde:

I_{k-j} : é a corrente no trecho durante o curto circuito;

I'_{k-j} : é a corrente no trecho antes do curto circuito (pré-falta);

I''_{k-j} : é a corrente no trecho somente devido a corrente de defeito.

3.2.1. Componente Simétrica

As componentes simétricas definidas pelo trabalho de Fortescue mostram que um sistema desequilibrado de n fatores pode ser descomposto em n sistemas de fasores equilibrados,

sendo iguais os ângulos entre os fasores adjacentes do conjunto e os n fasores de cada componente iguais em comprimento (JR; GRAINGER, 1994).

Para sistemas trifásicos, os três fasores desequilibrados podem ser decompostos em três sistemas equilibrados de fasores (SATO; FREITAS, 2015). Em sistemas decompostos são denominadas sequências positiva, negativa e zero:

- **Componente de sequência positiva:** os três fasores de módulos iguais são defasados entre si 120° , mantendo a mesma sequência da original;
- **Componente de sequência negativa:** os três fasores de módulos iguais são defasados entre si 120° , porém com sequência de fases inversas do sistema;
- **Componente de sequência zero:** os três fasores são iguais em módulos e em fase.

As equações 3.2 e 3.3 mostram o resultado dos fasores de tensão e corrente da transformação de um sistema desequilibrado em equilibrado.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Onde:

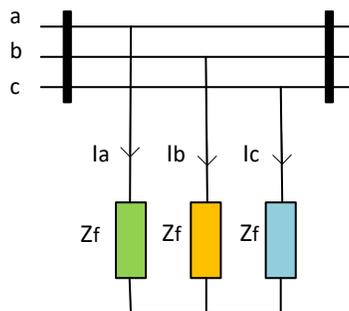
$\alpha: 1 \angle 120^\circ$

De acordo com o livro de Oliveira et al. (2000) é apresentada a modelagem dos tipos de curto circuito a seguir.

A. Modelagem de um Curto Circuito Trifásico

O curto circuito trifásico ou simétrico possuem menor frequência, com fases igualmente solicitadas. Assim o cálculo por fase, é feito considerando apenas o circuito equivalente de sequência positiva. Na Figura 11 ilustra a impedância de falta (Z_f) na falta trifásica.

Figura 11: Curto circuito trifásico.

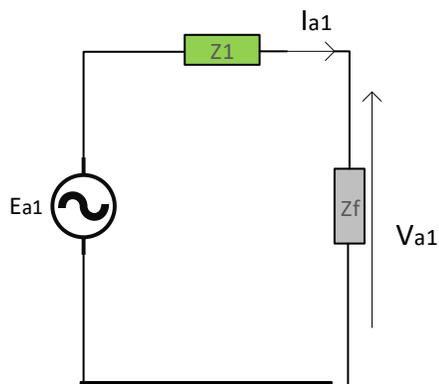


Fonte: Adaptado de (JR; GRAINGER, 1994).

Em componentes simétricas, não há corrente de sequência zero ou negativa, ou seja, os circuitos de sequência zero e negativo não contribuem para o curto trifásico. Com isso, a Figura 12, que representa o modelo equivalente de sequência positiva é adequada para a determinação das correntes da falta. Sendo assim, a corrente de defeito pode ser expressada por:

$$I_{def} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_f} = I_{a1} = I_a \quad (3.4)$$

Figura 12: Circuito equivalente do curto circuito trifásico.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2000).

B. Modelagem de um Curto Circuito Fase Terra

O curto circuito fase terra é assimétrico, isto é, desequilibrado sendo calculado com componentes simétricas. Para exemplo de modelagem, será analisada a fase *a* para a terra, sendo as fases *b* e *c* nulas.

A Figura 13 exibe o circuito equivalente, o que permite determinar as equações de curto circuito.

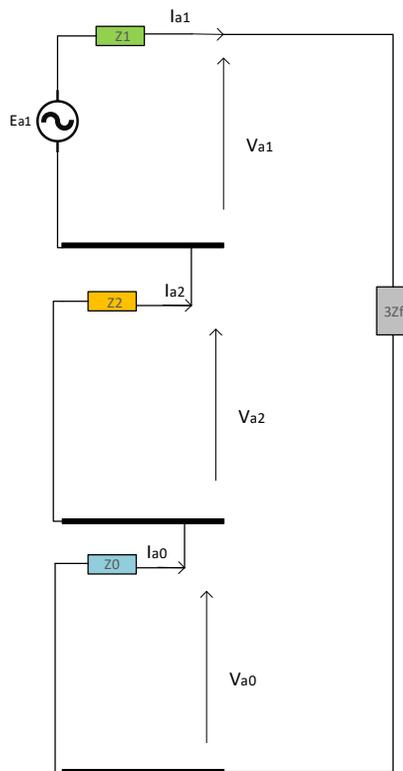
Sendo, as tensões descritas a seguir:

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} \quad (3.5)$$

$$V_{a2} = - Z_2 I_{a2} \quad (3.6)$$

$$V_{a0} = - Z_0 I_{a0} \quad (3.7)$$

Figura 13: Circuito equivalente do curto circuito fase terra.



Fonte: Adaptado de (JR; GRAINGER, 1994).

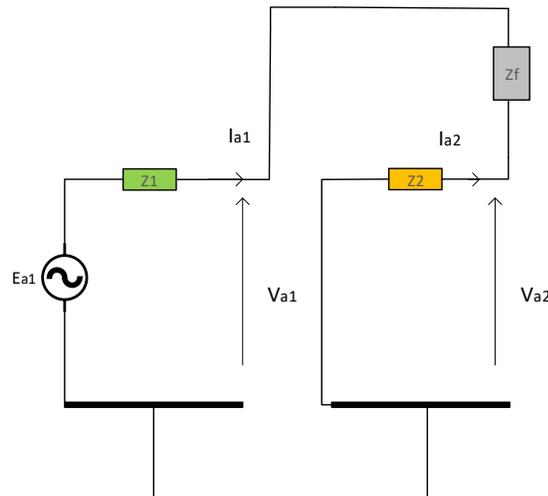
Já a corrente é definida da seguinte forma:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (3.8)$$

C. Modelagem de um Curto Circuito Dupla Fase

O curto circuito dupla fase é assimétrico, isto é desequilibrado, sendo calculado com componentes simétricas. Como representado na Figura 14, para este caso considerou-se para a modelagem as fases *b* e *c*, sem interferência com a terra.

Figura 14: Circuito equivalente de curto circuito dupla fase.



Fonte: Adaptado de (JR; GRAINGER, 1994).

Nesse caso as tensões podem ser descritas:

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} \quad (3.9)$$

$$V_{a2} = - Z_2 I_{a2} \quad (3.10)$$

$$V_{a0} = 0$$

(3.11)

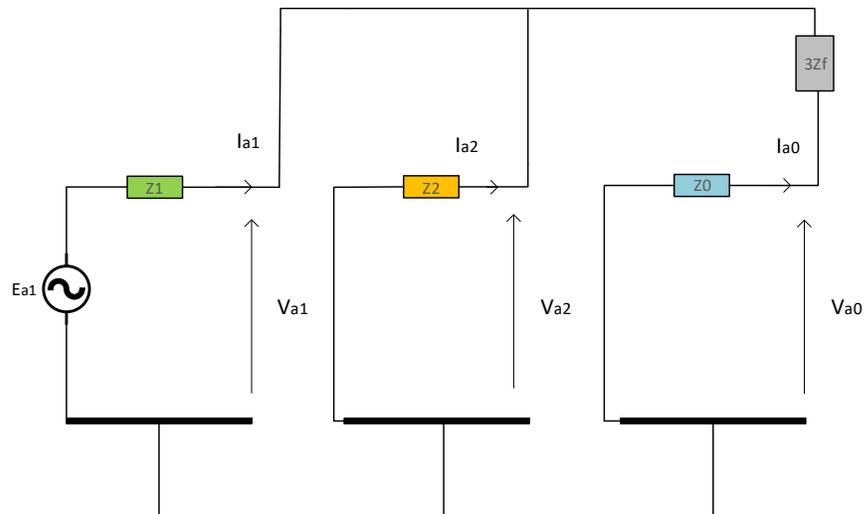
Sendo a corrente é definida:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.12)$$

D. Modelagem de um Curto Circuito Dupla Fase Terra

Neste caso, a modelagem é feita para uma falta entre duas fases e a terra, sendo as fases em falta b e c. A Figura 15 mostra o circuito esquemático do curto circuito dupla fase terra.

Figura 15: Circuito equivalente de curto circuito dupla fase terra.



Fonte: Adaptado de (JR; GRAINGER, 1994).

Através do circuito equivalente têm-se:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + (Z_2)/(Z_0 + 3Z_f)} \quad (3.13)$$

$$I_{a2} = \frac{(Z_0 + 3Z_f)}{(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} I_{a1} \quad (3.14)$$

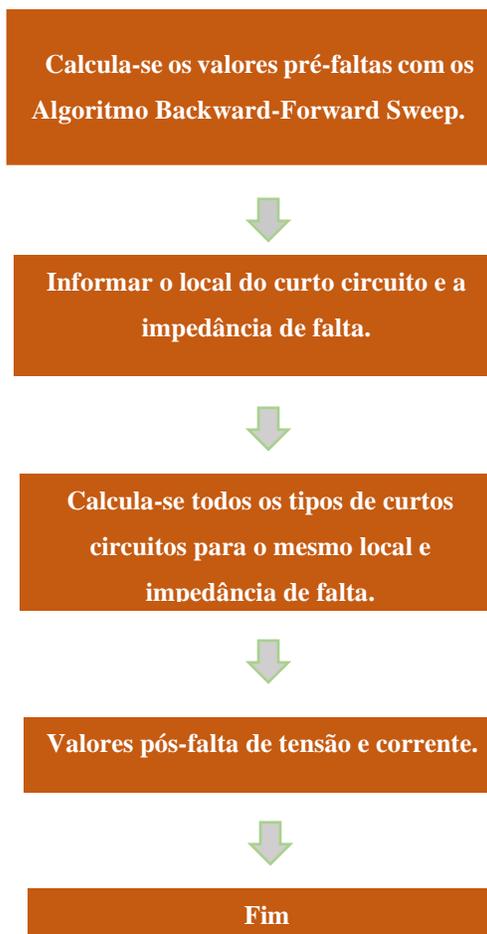
$$I_{a0} = \frac{Z_2}{(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} I_{a1} \quad (3.15)$$

3.3. Algoritmo para Cálculo de Curto Circuito

O desenvolvimento do algoritmo de análise de curto circuito permite estimar o estado da RDEE no instante de ocorrência de uma falta elétrica. Permitindo simular uma quantidade elevada de condições de curto circuito e comparar os resultados nos pontos onde se tem medidores alocados, tais valores são os estimados e registrados pelos medidores. O estudo entre o local simulado e a medição do medidor pode indicar que a proximidade com o local da falta. Esta aplicação requer inúmeros testes computacionais que comparem as variáveis envolvidas. Nesse caso, o uso da meta heurística apresentada no próximo capítulo tem o papel fundamental de reduzir o espaço de busca.

O algoritmo de cálculo de curto circuito está representado na Figura 16, tendo como finalidade de fornecer no instante de falta (pós-falta) os valores de tensão em todas as barras e corrente em todos os trechos da RDEE. O resultado pré-falta do estado da RDEE pode ser obtido via o Algoritmo Backward-Forward Sweep e para realização da simulação são informados o local e a impedância de falta. Com isso, calcula-se todos os tipos de curtos circuitos com as equações descritas anteriormente com os mesmos dados obtendo assim o cenário pós-falta.

Figura 16: Algoritmo de cálculo de curto circuito.



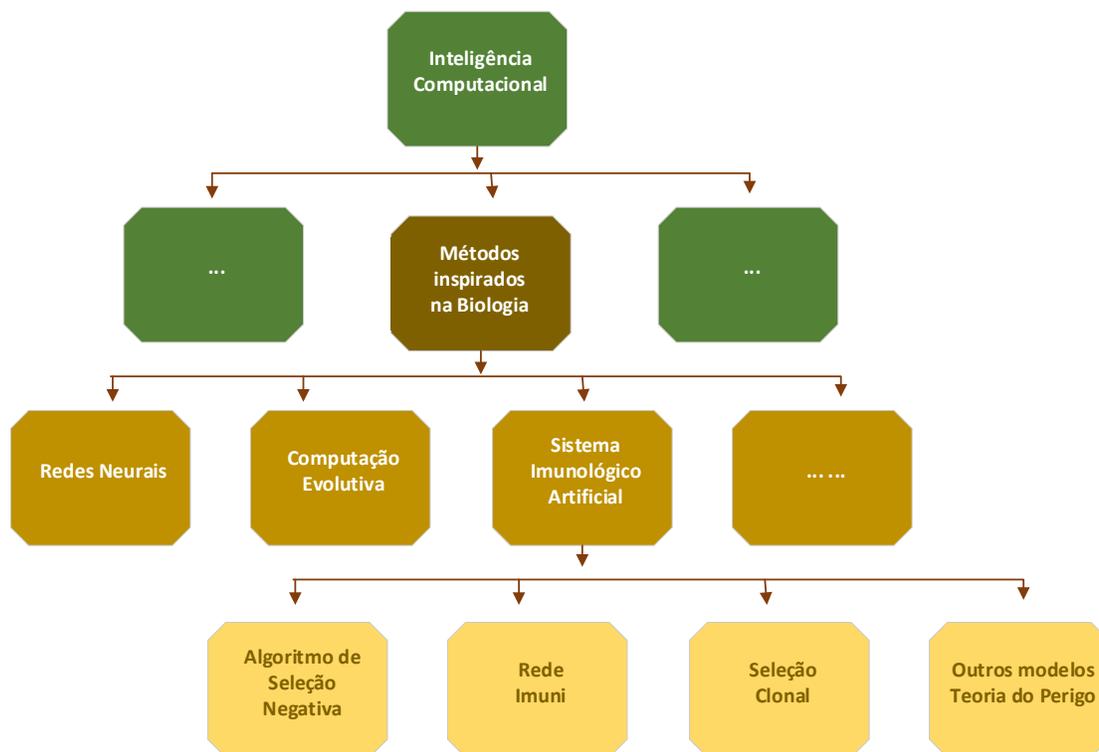
Fonte: Do autor.

4. METODOLOGIA

O termo meta heurística descreve heurísticas de nível superior que são propostas para solução de amplos problemas de otimização afim de obter melhores soluções (DILEEP, 2020). Essas estruturas de otimização representam várias vantagens, incluindo a interação entre os indivíduos, o que promove a troca de conhecimento entre diferentes soluções, e a diversificação da população, importante para garantir a exploração eficiente do espaço de busca e a capacidade de superar ótimos locais (ZALDÍVAR et al., 2020).

Neste contexto, o campo do Sistema Imunológico Artificial (SIA) está progredindo no ramo da Inteligência Computacional (IC), Figura 17. A maioria dos modelos de SIA enfatizam técnicas que usam modelos simplificados de vários processos imunológicos e funcionalidades, tais como, técnicas inspiradas na biologia (HART et al., 2011).

Figura 17: Ramo da Inteligência Computacional com foco no SIA.



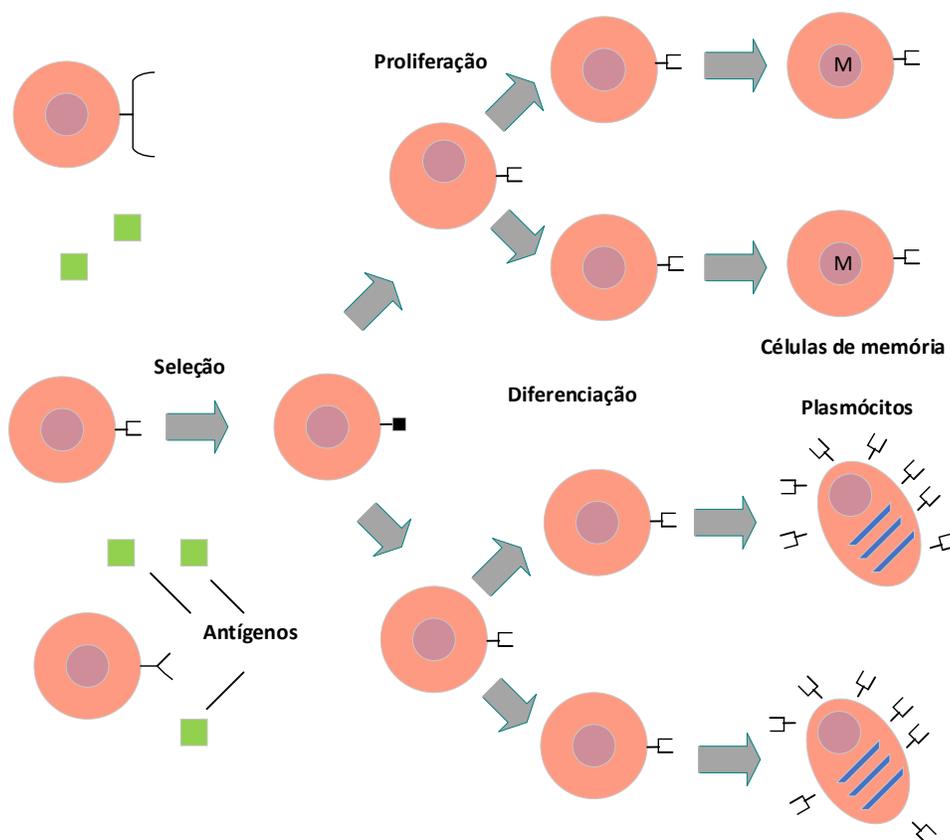
Fonte: Adaptado de (HART et al., 2011).

A seguir será apresentado o Algoritmo de Seleção Clonal (CLONALG) e sua modelagem para resolução do problema de localização de faltas.

4.1. Algoritmo de Seleção Clonal

O sistema imunológico é capaz de responder rapidamente quando exposto a antígenos já identificáveis por anticorpos, que os eliminam (GONG; JIAO; ZHANG, 2010). O princípio da Seleção Clonal, ilustrado na Figura 18, baseia-se no fato de que as células são capazes de reconhecer um antígeno, ou seja, as células com maior afinidade ao antígeno são as que reproduzem mais intensamente, sendo selecionadas em detrimento daquelas com baixa afinidade (CASTRO; ZUBEN, 2002).

Figura 18: Seleção Clonal.



Fonte: Adaptado de (CASTRO; ZUBEN, 2002).

A Figura 18 representa a proliferação desenvolvendo células filhas que podem sofrer mutação. As células filhas são semelhantes aos pais exceto por sutis diferenças em função da mutação que as tornam capazes de reconhecer os antígenos. Toda a seleção no processo de clonagem garante que permaneçam células com maior tempo de vida, chamadas células de memória, o que torna possível o combate a infecção (DE CASTRO; VON ZUBEN, 2009).

Para esta meta heurística o antígeno é o problema a ser resolvido e os anticorpos são as melhores soluções encontradas. Nesse contexto, os procedimentos para implementação do Algoritmo de Seleção Clonal é descrito da seguinte forma (CASTRO; ZUBEN, 2002):

Algoritmo de Seleção Clonal

Passo 1: Gere uma população inicial de indivíduos (anticorpos);

Passo 2: Avalie a população inicial em relação à afinidade com a função objetivo;

Passo 3: Ordene os anticorpos e selecione os melhores;

Passo 4: Enquanto o critério de parada não é satisfeito faça:

Gere clones;

Realize mutações sobre os clones (proporcional à afinidade);

Avalie os clones de acordo com a afinidade;

Selecione os melhores indivíduos para a próxima geração;

Passo 5: Retorne o melhor indivíduo da população.

4.2. Aplicação do Algoritmo de Seleção Clonal ao Problema de Localização de Faltas

Como visto, a meta heurística é usada para superar ótimos locais, com isso o CLONALG é aplicado ao problema de localização de faltas. A partir de valores registrados pelos medidores alocados de forma não otimizada na RDEE, obtêm-se como entrada no algoritmo valores de tensão registrados pelos medidores. A Figura 19 mostra o funcionamento do sistema proposto, onde a entrada é a variação de tensão nas três fases, provocadas pelas faltas.

Tais dados alimentam o CLONALG que proporciona, em sua saída, informações como o local da falta, trecho onde o defeito aconteceu, a distância, o tipo de curto circuito e a impedância de falta. O funcionamento do sistema será descrito a seguir.

Figura 19: Funcionamento da ferramenta proposta.

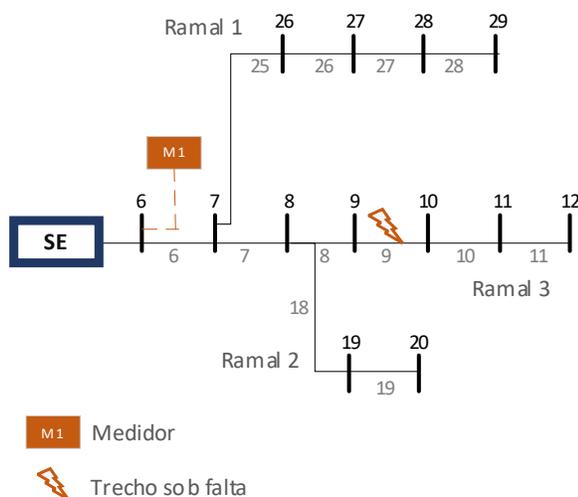


Fonte: Do autor.

• Ocorrência de falta

Neste trabalho, a localização do ponto de falta é tratada em termos da impedância da seção do trecho da linha entre duas barras que, por sua vez, é a distância percentual entre elas. Por exemplo, no sistema mostrado na Figura 20, identifica-se uma falta à 75% do trecho 9 (linha 9 - 10). Nesse caso, especificamente, como se trata de uma configuração radial, pode-se observar que, enquanto o serviço não é completamente restaurado, não há fluxo para as cargas à jusante da barra 9.

Figura 20: Rede elétrica radial.



Fonte: Do autor.

- **Representação de uma Solução**

Considerando uma ocorrência de falta na rede elétrica mostrada na Figura 20, esta é representada através de um vetor como indicado na Figura 21, o qual armazena as seguintes informações: trecho de ocorrência, distância dentro do trecho, tipo de curto circuito e impedância de falta.

Figura 21: Representação de uma solução.

Trecho	Distância	Tipo	Impedância
9-10	55,50%	Fase-Terra	15,5 Ω

Fonte: Do autor.

Destaca-se que, tipos de falta possíveis de ocorrer são fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra ou trifásica. As faltas assimétricas com impedância de defeito entre 0 e 20 Ω são representadas nos resultados.

- **Matriz de Simetria M_{simet}**

É construída uma matriz de simetria utilizada no código para indicar os trechos que têm as maiores probabilidades de formarem casos de simetrias (soluções com mesmo custo quando avaliadas pela função objetivo).

Por exemplo, tomando como referência a barra 6 no sistema da Figura 20 tem-se a matriz mostrada de simetria na Figura 22. Essa matriz é construída com m colunas e n linhas, onde m representa a quantidade de ramificações da rede elétrica que se origina a partir da barra do medidor e n representa a quantidade de camadas. Sendo uma camada o grupo de trechos a mesma distância da barra referência (medidor) – no caso da Figura 20, o medidor está na barra 6.

Uma vez construída esta matriz, pode-se utilizar cada trecho avaliado para construir um vetor de distância-simetria, V_{dist_simet} que indica os trechos vizinhos mais prováveis de formar um caso de simetria com um determinado trecho sob avaliação. Como exemplo, para uma avaliação do trecho 9 (alocado na camada 4 da matriz de simetria) tem-se o vetor V_{dist_simet} mostrado na Figura 23. Nesse caso, a construção se dá colocando o trecho avaliado na ordem 1 e, nas ordens seguintes, coloca-se os trechos mais próximos a ele de acordo com a matriz de simetria,

intercalando-se aqueles que estão na mesma camada, em uma camada acima e uma camada abaixo, nesta ordem.

Figura 22: Matriz de simetria para o sistema da Figura 20.

Camada 1	6		
Camada 2	7	25	
Camada 3	18	8	26
Camada 4	19	9	27
Camada 5	10	28	
Camada 6	11		

Fonte: Do autor.

Figura 23: Vetor de distância simetria para o trecho 9 do sistema da Figura 20.

Ordem 1	9	Ordem 5	8
Ordem 2	19	Ordem 6	28
Ordem 3	27	Ordem 7	26
Ordem 4	18	Ordem 8	11
Ordem 5	10	Ordem 9	...

Fonte: Do autor.

- **Vetor distância-trechos V_{dist}**

Com a finalidade de obter as distâncias entre trechos da rede elétrica, constrói-se um vetor distância V_{dist} . Por exemplo, tem-se uma solução (condição de falta) na Figura 20, na qual o

defeito está no trecho 9. A partir deste trecho insere-se em V_{dist} os demais trechos, tanto para a jusante quanto para a montante, como ilustrado na Figura 24.

Figura 24: Distância de trecho 9 para os demais trechos da Figura 20.

9	8	10	7	11	18	6	25	19	26	27	...
---	---	----	---	----	----	---	----	----	----	----	-----

Fonte: Do autor.

- **Avaliação da Função Objetivo**

A Função Objetivo (FO) deve ser um índice de mérito não negativo, sendo para este problema a distância entre valores calculados (para uma solução) e valores registrados pelos medidores utilizando o método de Mínimos Quadrados (ZERVAKIS; VENETSANOPOULOS, 1992) ou seja:

$$\min f = \sum_{i=1}^{N_m} [(V_{m_{iA}} - V_{c_{iA}})^2 + (V_{m_{iB}} - V_{c_{iB}})^2 + (V_{m_{iC}} - V_{c_{iC}})^2] \quad (4.1)$$

Onde:

$V_{m_{iA}}$, $V_{m_{iB}}$, $V_{m_{iC}}$: representam a magnitude da tensão lida pelo medidor m_i nas fases A, B e C, respectivamente;

$V_{c_{iA}}$, $V_{c_{iB}}$, $V_{c_{iC}}$: representam a magnitude da tensão calculada na barra do medidor m_i nas fases A, B e C, respectivamente;

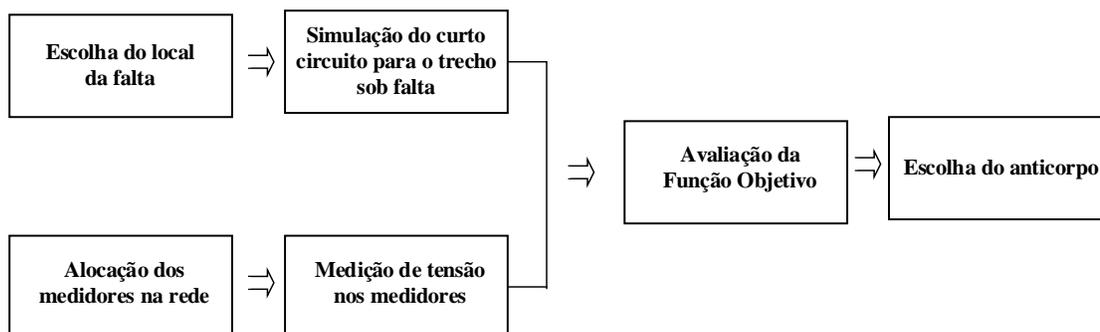
N_m : é o número de medidores instalados na rede.

- **População inicial**

A população inicial é constituída por anticorpos e seu tamanho varia de acordo com a complexidade da rede elétrica. A Figura 25 mostra a produção de anticorpos, primeiramente é realizada a simulação do sistema com as características definidas, local da falta, tipo, distância e impedância de falta. Além disso, tem-se o resultado da variação de tensão no momento da falta nos medidores alocados nos barramentos. Com isso, é possível comparar a simulação com a variação da medição do sistema, através da função objetivo. Por fim, de acordo com a rede elétrica

avaliada, define-se o número de anticorpos que são selecionados aleatoriamente para garantir a diversidade no espaço de soluções, para constituírem a população inicial.

Figura 25: Produção dos anticorpos.



Fonte: Do autor.

• Processo de Clonagem

De acordo com a proposta do CLONALG original, indivíduos mais aptos devem possuir um número maior de clones que aqueles menos aptos. Sendo assim, no algoritmo implementado, a quantidade de clones gerada por cada indivíduo foi calculada seguindo a equação seguinte:

$$C = (Q - (0,02 \cdot P \cdot Q)) \cdot B \quad (4.2)$$

Onde:

C : é a quantidade de clones por indivíduo;

Q : é a quantidade de nós do indivíduo;

P : é a classificação de um indivíduo em relação aos demais, sendo que o melhor indivíduo possui a classificação 0 e o pior recebe como classificação o valor n , equivalente ao tamanho da população;

B : é uma constante que varia de 0 à 1;

• Operadores de mutação

Três diferentes tipos de operadores de mutação foram implementados de forma que sejam escolhidos aleatoriamente, sendo cada um deles descritos a seguir.

M1 – Mutação da troca de trecho: Esse operador realiza a troca do trecho do clone (solução) utilizando o vetor V_{dist} . Para este caso considera-se um percentual definido para cada rede, assim é selecionado os primeiros elementos deste vetor, com a finalidade de fazer uma variabilidade no processo de mutação;

M2 – Mutação da troca do ponto de falta: Esse operador realiza, aleatoriamente, a troca ponto de falta no mesmo trecho do clone (solução), ou seja, irá trocar o tipo de curto circuito de acordo com um sorteio.

M3 – Mutação da impedância de defeito: esse operador altera o valor da impedância de falta entre 0 e 20 Ω .

No processo de mutação calcula-se a intensidade (I) de mutação, isto é, quantas vezes ela é aplicada sobre o clone e calculada aplicando a equação 4.3.

$$I = \left(10 + \left(\frac{B - 0,1}{Q} \right) \cdot P \right) \cdot 10 \quad (4.3)$$

Conforme pode ser observado, a lógica implementada para definir a intensidade de uma mutação sobre um anticorpo segue o proposto pelo Algoritmo Seleção Clonal original, que indica que soluções de boa qualidade devem sofrer pouca influência do processo de mutação, enquanto soluções de pior qualidade devem sofrer mutações de maior intensidade.

Cabe destacar que após a aplicação do operador de mutação, os clones que sofreram mutação foram avaliados considerando todos os tipos de curto circuito, pelo incremento computacional mínimo. Aquele curto-circuito com menor função de avaliação foi utilizado nesta metodologia.

- **Escolha da próxima população**

O anticorpo da população é comparado com o melhor anticorpo do grupo de clones gerados a partir dele e, assim, caso a função de avaliação melhore, este é substituído. Uma vez terminada a substituição, a população é ordenada pela função objetivo, do melhor ao pior deste grupo, onde substitui-se, de acordo com taxa percentual, as piores soluções pelo grupo de clones gerados nessa geração (de forma aleatória), garantindo a diversidade entre as soluções escolhidas.

O algoritmo permite que qualquer solução seja escolhida para passar à próxima geração, porém melhores soluções têm maior probabilidade de serem escolhidas, quando comparadas às piores. O tamanho da população é sempre mantido.

- **Critério de parada**

O Algoritmo de Seleção Clonal implementado utiliza como critério de parada o número de populações geradas. Este valor depende do tamanho do sistema elétrico avaliado. Para elaboração desse critério é elaborado testes na rede sob estudo, até identificar o melhor que estabeleça confiabilidade ao método.

- **Seleção**

Nas redes de distribuição há a característica de simetria, isso ocorre quando os medidores registram valores de tensão pós-falta iguais para defeitos em locais diferentes na rede. Com isso, gera mais de uma ótima solução na avaliação da função objetivo. Então com a finalidade de encontrar soluções que representam “simetria” realizou-se uma busca local a partir das soluções encontradas pelo CLONALG. Para isso, é utilizado o $V_{dist-simet}$, fazendo visita de soluções nos trechos que possuem maior probabilidade de casos de simetria. Dessa forma, a metodologia proporciona um conjunto de possíveis soluções e, caso não tenha soluções com simetrias o método avalia entre os demais anticorpos o que possui melhor avaliação da função objetivo.

Por fim a Figura 26 apresenta um fluxograma que descreve o funcionamento do CLONALG para resolução do problema de localização de faltas.

Figura 26: Método de localização de faltas com a aplicação do CLONALG.



Fonte: Do autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia proposta neste trabalho foi testada nas redes de distribuição IEEE-33 barras (BARAN; WU, 1989) e IEEE-69 (MISHRA; DAS; PAUL, 2014) com tensão de operação de 13,8 kV. A implementação computacional foi realizada em Matlab R2018a em um computador equipado com Intel® Core™ i5 6200U, 2.3GHz.

A apresentação dos resultados destina-se à avaliação da robustez do método em relação a localização de faltas em três casos diferentes, aplicados em trechos do sistema. A Tabela 2 mostra os tipos de curtos circuitos considerados na resolução deste trabalho.

Tabela 2: Tipos de curtos circuitos considerados no método.

Curto circuito	
Trifásico	FFF
Bifásico	FF
Bifásico-terra	FFT
Fase-terra	FT

Fonte: Do autor.

Para execução da metodologia nas redes IEEE-33 e IEEE-69 barras, definiu-se os seguintes parâmetros do CLONALG, especificados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros da metodologia.

Parâmetros	33 barras	69 barras
Tamanho da população	20	25
Nº geração máxima	20	20
B	0,8	0,8
Q	4	4
Quantidade de clones que substituíram anticorpos (%)	30%	35%
M1	50%	50%

Fonte: Do autor.

falta e a distância da falta. Já para as faltas FT e FFT, houve presença de simetria, ou seja, geram valores aproximados de tensão nos medidores no instante da falta elétrica.

Tabela 5: Resultados da Localização de Faltas para o Caso 1.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)	Função Objetivo
1 (Sol.1)	4	24,9982	FFF	0,00	$0,98 \times 10^{-5}$
1 (Sol.2)	4	25,0019	FFF	0,00	$1,10 \times 10^{-5}$
2 (Sol.1)	3	95,9567	FT	15,17	0,007
2 (Sol.2)	4	29,7827	FT	14,71	0,012
3 (Sol.1)	4	16,7586	FFT	5,03	0,025
3 (Sol.2)	3	82,2835	FFT	4,95	0,039
4 (Sol.1)	4	94,9999	FF	0,00	$0,23 \times 10^{-5}$
4 (Sol.2)	4	95,0012	FF	0,00	$0,30 \times 10^{-5}$

Fonte: Do autor.

- **Caso 2**

Para o caso 2, foram simulados 4 casos de condições de falta, todas referentes ao trecho 11, correspondente a linha 11-12, com as informações descritas na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 2.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)
1	11	50	FFF	0
2	11	50	FT	10
3	11	5	FFT	10
4	11	25	FF	15

Fonte: Do autor.

Com base nas informações de testes, os resultados são apresentados na Tabela 7. Os resultados do segundo caso, para as faltas FFF e FF mostra que o método foi capaz de estimar o local, classificar o tipo da falta e a distância da falta. Para a falta FT o método trouxe uma solução

simétrica ao local real da falta Sol.2, e identificou o local real da falta na Sol.1, como também estimou a impedância de falta corretamente. No entanto, para a falta FFT não houve caso de simetria, Sol.2, sendo a falta identificada na Sol.1.

Tabela 7: Resultados da Localização de Falhas para o Caso 2.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)	Função Objetivo
1 (Sol.1)	11	49,9999	FFF	0,00	$0,01 \times 10^{-5}$
1 (Sol.2)	11	50,0021	FFF	0,00	$0,9 \times 10^{-5}$
2 (Sol.1)	11	56,5147	FT	9,99	0,0006
2 (Sol.2)	10	70,3842	FT	10,22	0,0008
3 (Sol.1)	11	16,4319	FFT	9,84	0,008
3 (Sol.2)	30	31,0453	FFT	10,25	0,009
4 (Sol.1)	11	24,9988	FF	11,15	$0,24 \times 10^{-5}$
4 (Sol.2)	11	24,9968	FF	6,82	$0,64 \times 10^{-5}$

Fonte: Do autor.

- **Caso 3**

Para o caso 3, foram simulados 4 casos de condições de falta, todas referentes ao trecho 27, correspondente a linha 27-28, com as informações descritas na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 3.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)
1	27	25	FFF	0
2	27	50	FT	10
3	27	5	FFT	15
4	27	95	FF	15

Fonte: Do autor.

Com base nas informações de testes, os resultados são apresentados na Tabela 9. Nesse caso, o método estimou para a FT o local incorreto como indicado na Sol.1 e acertou na Sol.2. Para os demais tipos de faltas houve assertividade quando comparadas com as Tabela 8.

Tabela 9: Resultados da Localização de Falhas para o Caso 3.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)	Função Objetivo
1 (Sol.1)	27	25,0170	FFF	18,43	$3,27 \times 10^{-5}$
1 (Sol.2)	27	24,9816	FFF	7,16	$3,51 \times 10^{-5}$
2 (Sol.1)	8	0,9631	FT	10,13	0,0019
2 (Sol.2)	27	73,9849	FT	9,81	0,0026
3 (Sol.1)	27	4,5509	FFT	15,01	0,0009
3 (Sol.2)	27	5,5662	FFT	15,12	0,0033
4 (Sol.1)	27	94,9979	FF	14,24	$0,125 \times 10^{-5}$
4 (Sol.2)	27	95,0025	FF	0,0	$0,158 \times 10^{-5}$

Fonte: Do autor.

Na aplicação da metodologia, foram consideradas faltas assimétricas com presença da terra e impedância de defeito, sendo estas as mais difíceis de se identificar. Dessa forma, foram simuladas condições de falta (20 tentativas/trecho) em todos os trechos (no meio da linha) da rede, com impedância de defeito igual a 10Ω . Os resultados foram colocados na Tabela 10, na qual se indica a taxa de sucesso. Por exemplo, para faltas fase-terra em 7 trechos dos 32 trechos, a taxa de sucesso em encontrar o trecho no qual ocorreu a falta é entre 80% à 85%.

Tabela 10: Taxa de sucesso da metodologia – Rede de 33 barras.

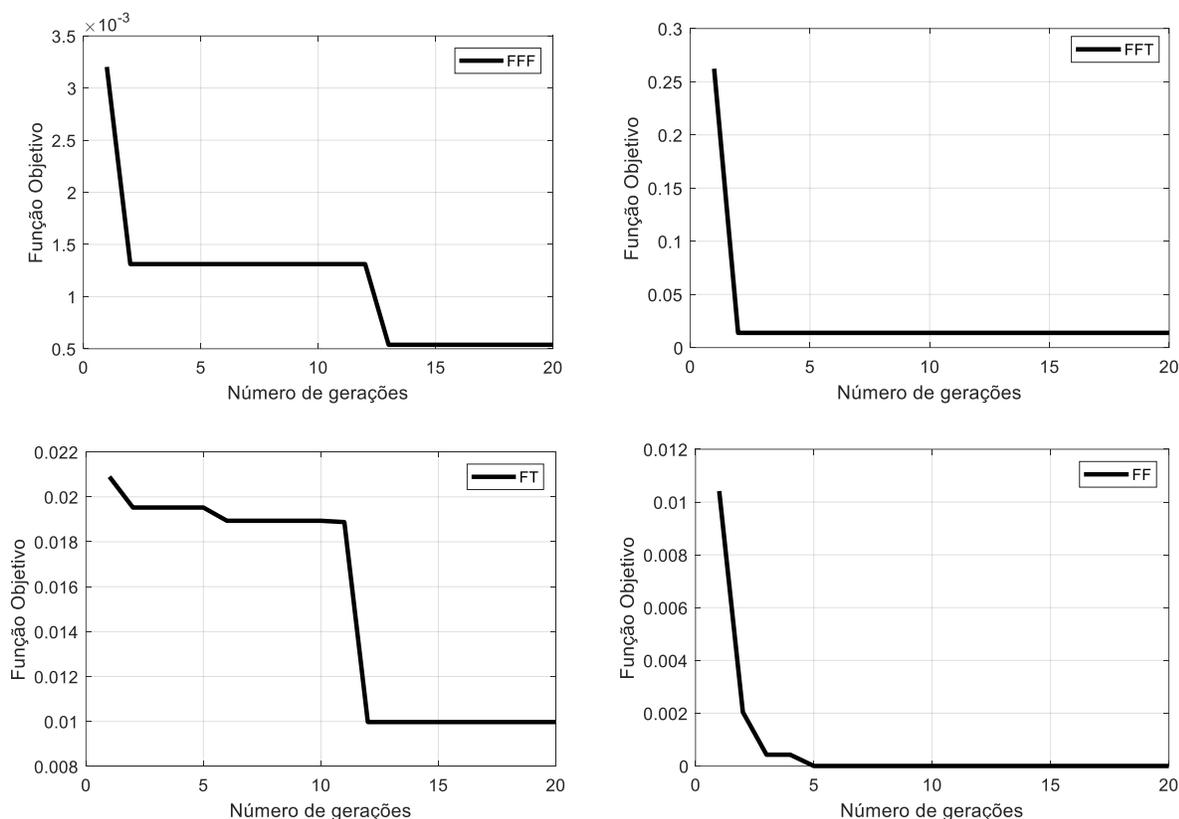
Tipo de falta	Número de trechos	Taxa de sucesso (%)
FT	7	80-85
	10	75-80
	9	70-75
	6	60-70
FFT	10	85-90
	6	80-85
	9	75-80
	7	70-75

Fonte: Do autor.

A Figura 28, a seguir, mostra o desempenho da metodologia no processo de otimização para a simulação das faltas na Tabela 8, Caso 3, na qual a solução inicial (melhor solução aleatória

da população inicial) tem uma função objetivo elevada. Durante as primeiras gerações o ganho da função objetivo é maior, quando comparada no final. No entanto, essa característica varia para cada tipo de curto circuito, as faltas FFT e FF sofrem convergência durante as primeiras gerações quando comparadas as faltas FFF e FT.

Figura 28: Convergência do CLONALG para o Caso 3.

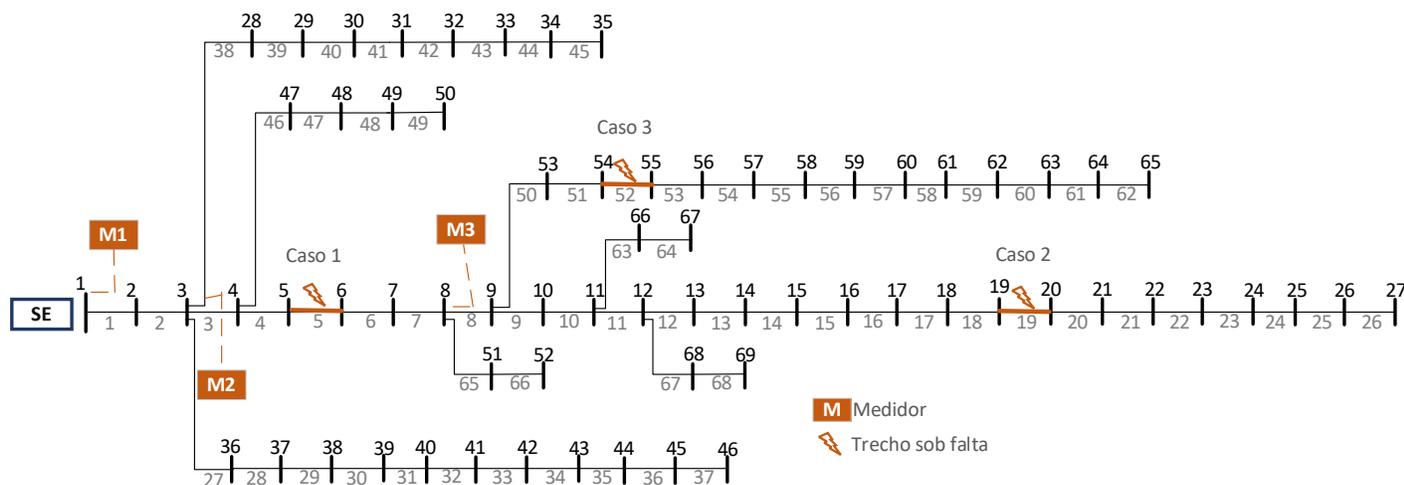


Fonte: Do autor.

5.2. Testes utilizando a rede de 69 barras

A Figura 29 ilustra em quais barras os medidores foram alocados, assim o medidor M1 encontra-se na subestação, o M2 na barra 3 que possui duas ramificações e o M3 na barra 8. Além disso, indica os pontos do sistema onde os casos foram simulados. Para cada um dos casos foram aplicadas diferentes condições de faltas, distância e impedância de falta. Os resultados são apresentados a seguir.

Figura 29: Representação dos casos para avaliação do método para 69 barras.



Fonte: Do autor.

• Caso 1

Para o caso 1, foram simulados 4 casos de condições de falta, todas referentes ao trecho 5, correspondente a linha 5-6, com as informações descritas na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 1.

Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)
1	5	FFF	0
2	5	FT	15
3	5	FFT	20
4	5	FF	10

Fonte: Do autor.

Com base nas informações de testes, os resultados são apresentados na Tabela 12. Os testes realizados nesse caso, obteve sucesso em encontrar o local do defeito, tipo de falta e a distância do ponto de ocorrência da falta. No entanto, observa-se que para encontrar a impedância de falta 0Ω para o tipo FFF precisou de muitas iterações e não houve assertividade.

Tabela 12: Resultados da Localização de Falhas para o Caso 1.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)	Função Objetivo
1 (Sol.1)	5	24,9998	FFF	9,6478	$3,83 \times 10^{-6}$
1 (Sol.2)	5	24,9978	FFF	17,7782	$4,57 \times 10^{-5}$
2 (Sol.1)	5	48,4633	FT	14,5597	0,00014
2 (Sol.2)	5	49,8085	FT	14,7321	0,00022
3 (Sol.1)	5	94,7999	FFT	16,4240	0,0011
3 (Sol.2)	5	94,6718	FFT	17,8163	0,0016
4 (Sol.1)	5	75,0153	FF	0,00	$7,1 \times 10^{-5}$
4 (Sol.2)	5	74,9822	FF	0,00	$8,5 \times 10^{-5}$

Fonte: Do autor.

- **Caso 2**

Para o caso 2, foram simulados 4 casos de condições de falta, todas referentes ao trecho 19, correspondente a linha 19-20, com as informações descritas na Tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 2.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)
1	19	75	FFF	10
2	19	25	FT	10
3	19	50	FFT	5
4	19	25	FF	15

Fonte: Do autor.

Com base nas informações de testes, os resultados são apresentados na Tabela 14. Para a falta FT o método trouxe uma solução simétrica ao local real da falta reconhecendo o trecho 18 como o local do defeito, e sendo o local real da falta a Sol.1. No primeiro teste, tipo de falta FFF não teve assertividade ao encontrar a impedância de falta precisando de muitas iterações.

Tabela 14: Resultados da Localização de Falhas para o Caso 2.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)	Função Objetivo
1 (Sol.1)	19	74,9983	FFF	0,00	$1,03 \times 10^{-6}$
1 (Sol.2)	19	75,0196	FFF	0,00	$1,43 \times 10^{-6}$
2 (Sol.1)	19	80,0138	FT	9,89	0,00019
2 (Sol.2)	18	84,8483	FT	10,09	0,00023
3 (Sol.1)	19	59,5713	FFT	5,3680	0,0011
3 (Sol.2)	19	64,5870	FFT	5,3920	0,0013
4 (Sol.1)	19	24,9984	FF	4,9362	$4,09 \times 10^{-6}$
4 (Sol.2)	19	25,0014	FF	14,0522	$4,93 \times 10^{-6}$

Fonte: Do autor.

- **Caso 3**

Para o caso 3, foram simulados 4 casos de condições de falta, todas referentes ao trecho 52, correspondente a linha 54-55, com as informações descritas na Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetros de simulação de falta para o Caso 3.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)
1	52	50	FFF	20
2	52	5	FT	15
3	52	75	FFT	10
4	52	95	FF	5

Fonte: Do autor.

Com base nas informações de testes, os resultados são apresentados na Tabela 16. Nesse caso, o método estimou para a FT o local incorreto indicado nas Sol.1 e 2, porém observa-se a existência de trechos simétricos ao trecho 52, como observado na Figura 29. Novamente, para o caso FFF a metodologia teve dificuldade em identificar a impedância de falta, conseguindo apenas na Sol.2.

Tabela 16: Resultados da Localização de Falhas para o Caso 3.

	Trecho em falta	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Impedância de falta (Ω)	Função Objetivo
1 (Sol.1)	52	49,9944	FFF	0	$1,15 \times 10^{-5}$
1 (Sol.2)	52	45,9914	FFF	19,63	$1,77 \times 10^{-5}$
2 (Sol.1)	51	3,7427	FT	15,31	0,000575
2 (Sol.2)	53	78,9939	FT	14,45	0,000677
3 (Sol.1)	52	75,5403	FFT	12,15	0,0033
3 (Sol.2)	52	72,3888	FFT	8,67	0,0042
4 (Sol.1)	52	94,9993	FF	0	$1,71 \times 10^{-5}$
4 (Sol.2)	52	95,0007	FF	6,3315	$1,91 \times 10^{-5}$

Fonte: Do autor.

Na aplicação da metodologia, foram consideradas faltas assimétricas com presença da terra e impedância de defeito, sendo estas as mais difíceis de se identificar. Dessa forma, foram simuladas condições de falta (20 tentativas/trecho) em todos os trechos (no meio da linha) da rede, com impedância de defeito igual a 10Ω . Os resultados foram colocados na Tabela 17, na qual se indica a taxa de sucesso. Por exemplo, para faltas fase-terra em 15 trechos dos 68 trechos, a taxa de sucesso em encontrar o trecho no qual ocorreu a falta é entre 75% à 85%.

Tabela 17: Taxa de sucesso da metodologia – Rede de 69 barras.

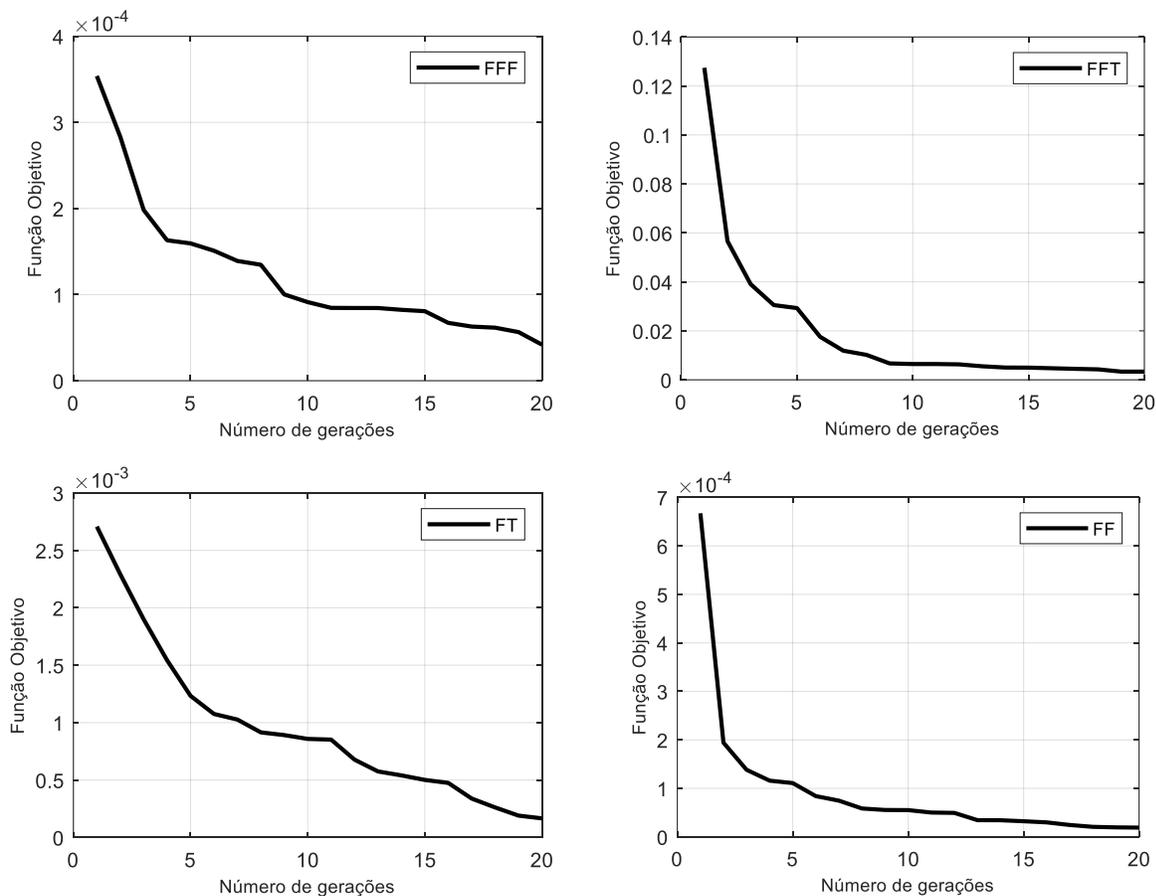
Tipo de falta	Número de trechos	Taxa de sucesso (%)
FT	15	75-85
	16	75-80
	11	70-75
	25	60-65
FFT	18	80-90
	25	80-85
	10	70-80
	15	60-70

Fonte: Do autor.

A Figura 30, a seguir, mostra o desempenho da metodologia no processo de otimização para a simulação das faltas na Tabela 15, Caso 3, na qual a solução inicial (melhor solução aleatória

da população inicial) tem uma função objetivo elevada. Durante as primeiras gerações o ganho da função objetivo é maior, quando comparada no final. No entanto, essa característica varia para cada tipo de curto circuito, as faltas FFT e FF sofrem convergência durante as primeiras gerações quando comparadas as faltas FFF e FT, como também observado para o Caso 3 da rede 33 barras.

Figura 30: Convergência do CLONALG para o Caso 3.



Fonte: Do autor.

6. CONCLUSÕES

Os sistemas de distribuição estão sujeitos a falhas frequentes, devido a diversos fatores, tais como o contato da vegetação, descargas atmosféricas, acidentes com os postes e cabos. Nessas circunstâncias os equipamentos de proteção atuam e os danos são reduzidos. No entanto, a interrupção de energia pode afetar muitos clientes, distribuidoras de energia que podem sofrer penalizações. Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de metodologias de Localização de Falhas com a finalidade de reduzir o tempo de busca pelo local do defeito e melhorar a eficiência no atendimento as ocorrências.

Neste trabalho, foi apresentada uma abordagem para o problema de localização de faltas no sistema de distribuição de energia. A metodologia consiste na aplicação da meta-heurística, Seleção Clonal (CLONALG), para identificar a localização de uma falta elétrica. A ferramenta foi aplicada a casos contemplando um amplo espectro de cenários nas redes de IEEE-33 e IEEE-69 barras.

O desenvolvimento da metodologia proposta, teve um desempenho satisfatório, visto que utiliza poucos medidores alocados na rede elétrica. Considerando as condições de controle, apresenta erros de localização, pois em alguns testes realizados encontrou-se locais simétricos ao local real da falta.

Durante os testes de realizados, nota-se que o CLONALG não converge rapidamente para os casos nos quais resistência de defeito não é nula, necessitando de mais iterações para a convergência. Nos casos em que os defeitos atingem ramificações da rede, a precisão dos resultados depende da presença de medidores nas proximidades.

Por fim, a solução implementada possibilita ao Centro de Operações passar o local real ou próximo ao local onde ocorreu o defeito na rede para as equipes, ou seja, reduzindo o tempo e espaço de busca.

6.1. Sugestões de Trabalhos Futuros

Para continuidade desse trabalho, são vislumbrados alguns pontos como:

- a) A utilização da ferramenta em outros sistemas de distribuição;

- b) Inserção de geração distribuída na rede;
- c) Alocação de medidores na rede;
- d) Uso do software OpenDSS para cálculo computacional do fluxo de potência e curto circuito.

6.2. Publicações

A metodologia de localização de faltas aplicando algoritmo de seleção clonal foi publicada em dois artigos.

a) Localização de Faltas em Redes Elétricas Radiais Utilizando Algoritmo De Seleção Clonal. (SOUZA et al., 2020)

b) Localização de Faltas Para a Terra em Redes Elétricas Radiais Utilizando Algoritmo de Seleção Clonal. (SOUZA et al., 2020b)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. **Recloser smart.** Disponível em: <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=7TKK000149&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8. v. 8, p. 88, 2018.

ANEEL. **Qualidade no fornecimento de energia em 2020 alcança melhor resultado.** Disponível em: <bit.ly/38I0Z27>. Acesso em: 21 jun. 2021.

BARAN, M., WU, F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **Justice System Journal**, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989.

C. CHRISTOPOULOS, A. W. **Electrical Power System Protection.** [s.l: s.n.]. v. 7

CASTRO, L. N. DE; ZUBEN, F. J. VON. Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle. v. 6, n. 3, p. 239–251, 2002.

DE CASTRO, P. A. D.; VON ZUBEN, F. J. BAIS: A Bayesian Artificial Immune System for the effective handling of building blocks. **Information Sciences**, v. 179, n. 10, p. 1426–1440, 2009.

DILEEP, G. A survey on smart grid technologies and applications. v. 146, 2020.

DZAFIC, I.; MOHAPATRA, P.; NEISIUS, H. T. Composite fault location for distribution management systems. **2010 9th International Power and Energy Conference, IPEC 2010**, p. 795–800, 2010.

FALVO, M. C. et al. Technologies for Smart Grids : a brief review. 2013.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Grupo Gen ed. [s.l: s.n.].

FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos.** [s.l: s.n.].

GÖNEN, T. **Electric Power Distribution Engineering.** Trird Edit ed. [s.l: s.n.].

GONG, M.; JIAO, L.; ZHANG, L. Baldwinian learning in clonal selection algorithm for optimization. **Information Sciences**, v. 180, n. 8, p. 1218–1236, 2010.

HART, E. et al. Advances in artificial immune systems. **Evolutionary Intelligence**, v. 4, n. 2, p. 67–68, 2011.

HUI, Y. et al. Fault location method for DC distribution network based on particle swarm optimization. **2019 2nd International Conference on Electronics Technology, ICET 2019**, p. 335–338, 2019.

J, D. **Power System Protective Relaying.** [s.l: s.n.].

JAMIL, M.; SINGH, R.; SHARMA, S. K. Fault identification in electrical power distribution system using combined discrete wavelet transform and fuzzy logic. **Journal of Electrical Systems**

and Information Technology, p. 1–11, 2015.

KAGAN, N. **Introdução à Sistemas Elétricos de Potência**. 2. ed. [s.l.] Blucher, 2010.

LI, G.; CHEN, Q.; JIANG, L. A Fault Location Method for Local Control Distribution Network Based on Switch Status. **2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)**, p. 916–920, 2020.

LUO, G. et al. Stacked Auto-Encoder-Based Fault Location in Distribution Network. **IEEE Access**, v. 8, p. 28043–28053, 2020.

MANASSERO, G.; DI SANTO, S. G.; SOUTO, L. Heuristic Method for Fault Location in Distribution Feeders with the Presence of Distributed Generation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 6, p. 2849–2858, 2017.

MARCUS, C. **ESTUDO COMPARATIVO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL**. [s.l: s.n.].

MAURIZIO. **Chave Fusível**. Disponível em: <http://www.maurizio.com.br/produtos/1/1/1/Chave_Fusível>. Acesso em: 12 jul. 2021.

MISHRA, S.; DAS, D.; PAUL, S. A simple algorithm for distribution system load flow with distributed generation. **International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, ICRAIE 2014**, n. 2, 2014.

MOHAMED, A. et al. Fault Location and Isolation Techniques in Smart Distribution Systems with Distributed Generation. **2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)**, p. 1--5, 2020.

NAIDU, I. O. D.; GORE, R.; ASHOK, S. A New Approach for Fault Location on Modern Distribution Systems with Integrated DER. p. 3–8, 2016.

OLIVEIRA, C. C. B. DE ET AL. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência Componentes Simétricas**. [s.l.] Editora Blucher, 2000.

PEREIRA, D. DE S. Localização de faltas em redes de distribuição no contexto de redes elétricas inteligentes utilizando algoritmos evolutivos. 2019.

PEREIRA, R. Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensões. **Ph. D. dissertation, Univ. Estadual Paulista, São Paulo, ...**, 2007.

PESSOA, A. L. DA S. A localização de faltas em um sistema de distribuição radial baseada na aplicação de árvores de decisão e redes neurais artificiais. p. 200, 2017.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J. J.; ROSOŁOWSKI, E. **Fault location on power networks**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2009.

SATO; FREITAS. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SCHNEIDER. **Relés compactos de proteção de sobrecorrente e falha a terra**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/65608-easergy-p1/?utm_campaign=email_mkt_-

[_schneider_electric_3&utm_medium=email&utm_source=RD+Station#overview](#)>. Acesso em: 12 jul. 2021.

SENGER, E. C. et al. Automated fault location system for primary distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2 II, p. 1332–1340, 2005.

SHINSUNG. **Seccionador**. Disponível em: <<http://www.ssiec.co.kr/pt-pt/products/overhead-line/sectionalizer/>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

SIEMENS. **Siemens Energy automation and smart grid**. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/siemens-energy-automation-and-smart-grid/product-30064-1199083.html>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

SONODA, D.; SOUZA, A. C. Z. DE; MÁRCIO, P. Fault identification based on artificial immunological systems. **Electric Power Systems Research**, v. 156, p. 24–34, 2018.

SOUZA, J. P. A. DE; FERREIRA, J. K.; CAMPOS, G. E. M. U. Uso do OpenDSS em Aplicações Reais para Distribuidoras de Energia. 2017.

SOUZA, L. F. et al. Localização de Faltas em Redes Elétricas Radiais Utilizando Algoritmo De Seleção Clonal. **Congresso Brasileiro de Automática - CBA.**, v. 2, n. 1, 2020a.

SOUZA, L. F. et al. Localização de Faltas Para a Terra em Redes Elétricas Radiais Utilizando Algoritmo de Seleção Clonal. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 75, 2020b.

TAO, S. ET AL. Fault location estimation based on voltage sag information of PQMS. **Dianwang Jishu/Power System Technology**, v. 40, n. 2, p. 642–648, 2016.

TRINDADE, F. C. L.; FREITAS, W. Low Voltage Zones to Support Fault Location in Distribution Systems With Smart Meters. p. 1–10, 2016.

W. S., J.; GRAINGER, J. **Power System Analysis**. [s.l.] McGraw-Hill Education, 1994.

ZALDÍVAR, D. et al. A better balance in metaheuristic algorithms : Does it exist ? v. 54, n. May 2019, 2020.

ZERVAKIS, M. E.; VENETSANOPOULOS, A. N. Iterative Least Squares Estimators in Nonlinear Image Restoration. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 40, n. 4, p. 927–945, 1992.

ANEXO A

Para a rede de 33 barras, a subestação encontra-se na barra 1.

Tabela 18: Rede de 33 barras.

Barras	P (kW)	Q (kVAR)	Linhas			
			Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
1	0	0				
2	100	60	1	2	0,0922	0,047
3	90	40	2	3	0,493	0,2511
4	120	80	3	4	0,366	0,1864
5	60	30	4	5	0,3811	0,1941
6	60	20	5	6	0,819	0,707
7	200	100	6	7	0,1872	0,6188
8	200	100	7	8	0,7114	0,2351
9	60	20	8	9	1,03	0,74
10	60	20	9	10	1,044	0,74
11	45	30	10	11	0,1966	0,065
12	60	35	11	12	0,3744	0,1238
13	60	35	12	13	1,468	1,155
14	120	80	13	14	0,5416	0,7129
15	60	10	14	15	0,591	0,526
16	60	20	15	16	0,7463	0,5454
17	60	20	16	17	1,289	1,721
18	90	40	17	18	0,732	0,574
19	90	40	2	19	0,164	0,1565
20	90	40	19	20	1,5042	1,3554
21	90	40	20	21	0,4095	0,4784
22	90	40	21	22	0,7089	0,9373
23	90	50	3	23	0,4512	0,3083
24	420	200	23	24	0,898	0,7091
25	420	200	24	25	0,898	0,7011
26	60	25	6	26	0,203	0,1034
27	60	25	26	27	0,2842	0,1447
28	60	20	27	28	1,059	0,9337
29	120	70	28	29	0,8042	0,7006
30	200	600	29	30	0,5075	0,2585
31	150	70	30	31	0,9744	0,963
32	210	100	31	32	0,3105	0,3619
33	60	40	32	33	0,341	0,5302

Tabela 19: Rede de 69 barras.

Barras	P (kW)	Q (kVAR)	Linhas			
			Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
1	0	0	Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
2	0	0	1	2	0,0005	0,0012
3	0	0	2	3	0,0005	0,0012
4	0	0	3	4	0,0015	0,0036
5	0	0	4	5	0,0251	0,0294
6	2,6	2,2	5	6	0,366	0,1864
7	40,4	30	6	7	0,3811	0,1941
8	75	54	7	8	0,0922	0,047
9	30	22	8	9	0,0493	0,0251
10	28	19	9	10	0,819	0,2707
11	145	104	10	11	0,1872	0,0619
12	145	104	11	12	0,7114	0,2351
13	8	5	12	13	1,03	0,34
14	8	5,5	13	14	1,044	0,345
15	0	0	14	15	1,058	0,3496
16	45,5	30	15	16	0,1966	0,065
17	60	35	16	17	0,3744	0,1238
18	60	35	17	18	0,0047	0,0016
19	0	0	18	19	0,3276	0,1083
20	1	0,6	19	20	0,2106	0,069
21	114	81	20	21	0,3416	0,1129
22	5	3,5	21	22	0,014	0,0046
23	0	0	22	23	0,1591	0,0526
24	28	20	23	24	0,3463	0,1145
25	0	0	24	25	0,7488	0,2475
26	14	10	25	26	0,3089	0,1021
27	14	10	26	27	0,1732	0,0572
28	26	18,6	3	28	0,0044	0,0108
29	26	18,6	28	29	0,064	0,1565
30	0	0	29	30	0,3978	0,1315
31	0	0	30	31	0,0702	0,0232
32	0	0	31	32	0,351	0,116
33	14	10	32	33	0,839	0,2816
34	9,5	14	33	34	1,708	0,5646
35	6	4	34	35	1,474	0,4873
36	26	18,55	3	36	0,0044	0,0108
37	26	18,55	36	37	0,064	0,1565

Barras	P (kW)	Q (kVAR)	Linhas			
			Envio	Receptora	R (Ω)	X (Ω)
38	0	0	37	38	0,1053	0,123
39	24	17	38	39	0,0304	0,0355
40	24	17	39	40	0,0018	0,0021
41	1,2	1	40	41	0,7283	0,8509
42	0	0	41	42	0,3100	0,3623
43	6	4,3	42	43	0,0410	0,0478
44	0	0	43	44	0,0092	0,0116
45	39,22	26,3	44	45	0,1089	0,1373
46	39,22	26,3	45	46	0,0009	0,0012
47	0	0	4	47	0,0034	0,0084
48	79	56,4	47	48	0,0851	0,2083
49	384,7	274,5	48	49	0,2898	0,7091
50	384,7	274,5	49	50	0,0822	0,2011
51	40,5	28,3	8	51	0,0928	0,0473
52	3,6	2,7	51	52	0,3319	0,1114
53	4,35	3,5	9	53	0,174	0,0886
54	26,4	19	53	54	0,203	0,1035
55	24	17,2	54	55	0,2842	0,1447
56	0	0	55	56	0,2813	0,1433
57	0	0	56	57	1,59	0,5337
58	0	0	57	58	0,7837	0,263
59	100	72	58	59	0,3042	0,1006
60	0	0	59	60	0,3861	0,1172
61	1244	888	60	61	0,5075	0,2585
62	32	23	61	62	0,0974	0,0496
63	0	0	62	63	0,145	0,0738
64	227	162	63	64	0,7105	0,3619
65	59	42	64	65	1,041	0,5302
66	18	13	11	66	0,2012	0,0611
67	18	13	66	67	0,0047	0,0014
68	28	20	12	68	0,7394	0,2444
69	28	20	68	69	0,0047	0,0016



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “ Localização de Faltas no Sistema de Distribuição Utilizando o Algoritmo de Seleção Clonal ” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 09 de maio de 2022 .

Jauna Freitas Sousa

Nome completo do(a) aluno(a)