

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM SISTEMAS DE ENERGIA

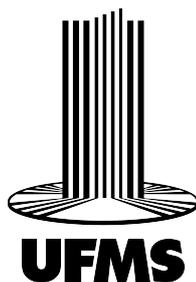


# **Algoritmo genético para alocação ótima de sensores de corrente para detecção de faltas de alta impedância**

**Hugo Cezar Sales de Souza**

Campo Grande - MS

1 de dezembro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM SISTEMAS DE ENERGIA



## **Algoritmo genético para alocação ótima de sensores de corrente para detecção de faltas de alta impedância**

Hugo Cezar Sales de Souza

Dissertação de mestrado apresentada como exigência para obtenção do título de Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

Orientador: Prof. Dr. Edson Antonio Batista

Coorientador: Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito

Campo Grande - MS

1 de dezembro de 2023

# Algoritmo genético para alocação ótima de sensores de corrente para detecção de faltas de alta impedância

Dissertação de mestrado apresentada como exigência para obtenção do título de  
Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia da Universidade  
Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

## **Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Edson Antonio Batista

---

Prof. Dr. Marcos Roberto de Araújo

---

Prof. Dr. Luigi Galotto Junior

Campo Grande - MS  
1 de dezembro de 2023

# Agradecimentos

Desde pequeno, sempre tive na minha mente que o mais importante para o desenvolvimento de uma pessoa são os seus laços. O ser humano nunca evolui sozinho e, ao entender isso, descobri que também é importante manter os bons laços que se é conquistado. A minha evolução, hoje, está sendo finalizada em forma deste trabalho, e nesta seção quero agradecer a cada um dos laços que me ajudaram a conquistar esse título.

Primeiro, quero agradecer aos meus professores que me proporcionaram auxílio e o conhecimento necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial, aos meus orientadores, Prof. Dr. Edson e Prof. Dr. Moacyr, e aos Prof. Dr. Luigi e Prof. Dr. Marcos que, não só compuseram minha banca, mas assim como meus orientadores, me auxiliaram diretamente no desenvolvimento dessa dissertação, inclusive em períodos que não eram próximos dos momentos de avaliação.

Preciso agradecer também, quem me ajudou a me manter são mentalmente, os meus amigos. Em especial, o Ms. Julio Lescano que foi quem me incentivou a ingressar no mestrado. Além deste, os meus amigos que me ajudaram a passar pelo luto, que me divertiram, me abraçaram, comemoraram comigo, me deram forças para conseguir terminar, me carregavam para Sonora para que eu tivesse um fim de semana reanimador. Apesar de ter citado apenas o Júlio, faço sabendo que, abençoado como sou, citar tantos amigos que tenho faria estes agradecimentos serem demasiadamente extensos e que ótimo que este é meu problema. Eu amo cada um de vocês, os que estão distantes fisicamente, os que se distanciaram sentimentalmente e os que estão todo dia reclamando das lamúrias da vida comigo. Obrigado por estarem na minha vida e me amarem, como eu amo vocês.

E por fim, é a minha família. Infelizmente, no dia que recebi a notícia que ingressei ao mestrado, recebi também a notícia que meu pai havia falecido. Ele nunca soube que meu sonho de me tornar um doutor tinha se iniciado. Não em vida. Porém, minha família não é composta apenas do meu pai, é também por ele, e minha mãe esteve aqui o tempo todo, passando o luto comigo e me ajudando a seguir o sonho, que apesar de tudo a vida continua. Entre brigas e choros, foi minha companheira, que fez e faz de tudo por mim, e palavras me faltam para descrever sua magnificência. Eu amo vocês, obrigado por toda educação e sacrifício para que eu chegasse aqui, espero recompensar um dia. Arkham e Megan, vocês também são minha família, apesar de não saberem ler, suas lambidas me ajudam dia após dia.

Essa seção é finita, mas saiba que se em algum momento você passou pela minha vida, seja pessoa ou evento, eu me lembro, mesmo que não tenha uma citação nominal aqui. Somos quem somos pelo que vivemos, agradeça pelo que viveu, evite o que for ruim, ame as pessoas e a coisas boas. Venceremos!

# Resumo

Faltas de alta impedância são defeitos que ocorrem em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. Além de perda de energia, este tipo de falta ameaça as vidas na região próxima ao contato, podendo causar danos nas estruturas, fatalidades e incêndios, causando impactos negativos nos índices de DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Diversas pesquisas visam desenvolver uma plataforma eficiente de detecção deste tipo de distúrbio, visto que, os métodos de detecção tradicionais não são capazes de identificar as características intrínsecas deste evento. Paralelamente a isso, com a evolução da computação e dos métodos computacionais, a resolução de problemas ganha novas ferramentas. Redes neurais, algoritmos evolucionários, lógica nebulosa, aliados ao aumento da capacidade computacional, favorecem a implementação em hardware e, por consequência, auxiliam no desenvolvimento de métodos para detecção das FAIs. Este trabalho visa implementar um algoritmo de detecção de FAIs junto a um algoritmo para alocação otimizada de sensores. Os resultados demonstram a necessidade de robustez no algoritmo de detecção e de alocação, visto que o último depende do primeiro. Apesar disto, o trabalho demonstra que o algoritmo de alocação consegue reduzir de forma satisfatória a quantidade de sensores de forma otimizada, sendo a alocação de sensores uma ferramenta importante para aumentar a efetividade dos métodos de detecção de FAI.

**Palavras-chaves:** Algoritmo genético, Falta de alta impedância, IEEE 34, Rede IEEE, Sistema de distribuição.

# Abstract

High impedance faults are defects that occur in electricity transmission and distribution networks. In parallel with the loss of power, this type of fault threatens lives in the area close to the contact, and can cause damage to structures, fatalities and fires, negatively impacting the DEC (Equivalent Duration of Interruption per Consumer Unit) and FEC (Equivalent Frequency of Interruption per Consumer Unit) indices. Several studies aim to develop an efficient platform for detecting this type of disturbance, since traditional detection methods are unable to identify the intrinsic characteristics of this event. At the same time, with the evolution of computational methods, problem solving has gained new tools. Neural networks, evolutionary algorithms, fuzzy logic and other methods, combined with the increase in computing power, favor hardware implementation and, consequently, help in the development of methods for detecting HIFs. This work aims to implement an algorithm for detecting HIFs combined with an algorithm for optimized sensor allocation. The results demonstrate that the detection algorithm need to robustness, since the allocation algorithm depends for that. Overall, the work demonstrates that the allocation algorithm can research a satisfactorily reduction in the number of sensors to optimized response, and the allocation algorithm is an important tool for increasing the effectiveness of HIFs detection methods.

**Keywords:** Distribution networks, Genetic algorithms, High impedance faults, IEEE 34, IEEE Network.

# Lista de figuras

Figura 1	–	Imagem exemplificativa de uma FAI proposta pela Energisa . . . . .	16
Figura 2	–	Estágios de uma FAI causada por rompimento do condutor. . . . .	17
Figura 3	–	Características induzidas na corrente ao ocorrer uma FAI. . . . .	19
Figura 4	–	Circuito deduzido dos métodos de direcionalidade . . . . .	20
Figura 5	–	Modelo proposto por Emanuel . . . . .	26
Figura 6	–	Modelo proposto para simular a variação da resistência variável da terra. . . . .	27
Figura 7	–	Modelo proposto por Chan (1998) . . . . .	28
Figura 8	–	Modelo proposto por Ham (2001) . . . . .	28
Figura 9	–	Modelo proposto por Yong (2004) . . . . .	29
Figura 10	–	Modelo proposto por Machalik et al. (2005) . . . . .	30
Figura 11	–	Modelo proposto por Lai (2006) . . . . .	31
Figura 12	–	Fluxograma de funcionamento de um algoritmo genético . . . . .	39
Figura 13	–	Componentes de um cromossomo de um indivíduo . . . . .	40
Figura 14	–	Exemplo de um operador de cruzamento PMX . . . . .	42
Figura 15	–	Diagrama unifilar da rede IEEE 34 . . . . .	45
Figura 16	–	Implementação parcial da rede IEEE 34 no Simulink. . . . .	45
Figura 17	–	Sistema para simular uma FAI. . . . .	46
Figura 18	–	Sistema para detectar a ocorrência de uma FAI no sistema via análise fasorial. . . . .	47
Figura 19	–	Sistema para detectar a ocorrência de uma FAI no sistema via análise da corrente de sequência zero. . . . .	48
Figura 20	–	Sistema interno do bloco chamado “Bloco de detecção de referência”. . . . .	48
Figura 21	–	Sistema interno do bloco chamado “Bloco de atraso”. . . . .	48
Figura 22	–	Sinal de corrente de sequência zero no sensor 836 . . . . .	53
Figura 23	–	Desempenho dos indivíduos em relação ao fator de seleção - Indivíduos globais . . . . .	55
Figura 24	–	Desempenho dos indivíduos em relação ao fator de seleção - Indivíduos da última geração . . . . .	55
Figura 25	–	Desempenho do algoritmo em relação aos fatores de seleção e cruzamento . . . . .	56
Figura 26	–	Comportamento do algoritmo em relação ao tamanho da população com fator de seleção 0,35 . . . . .	56

Figura 27	–	Comportamento do algoritmo em relação à taxa de cruzamento com fator de seleção 0,35 . . . . .	57
Figura 28	–	Comportamento do algoritmo com fator de seleção 0,35 . . . . .	57
Figura 29	–	Desempenho dos indivíduos em relação ao fator de cruzamento - Indivíduos globais . . . . .	58
Figura 30	–	Desempenho dos indivíduos em relação ao fator de cruzamento - Indivíduos da última geração . . . . .	58
Figura 31	–	Regressão não-linear dos fatores de cruzamento . . . . .	59
Figura 32	–	Demonstração dos fatores de mutação . . . . .	60
Figura 33	–	Representação gráfica das respostas . . . . .	62

# Lista de algoritmos

1	Algoritmo principal (AG2AS) . . . . .	50
2	Função de aptidão (Função Fitness) . . . . .	50
3	Função Seleção . . . . .	51
4	Função Cruzamento . . . . .	52
5	Função Mutação . . . . .	52

\*

# Lista de tabelas

Tabela 1 –	Tabela de resultados do algoritmo . . . . .	61
------------	---	----

# Lista de abreviaturas e siglas

FT	Fase - Terra
FF	Fase - Fase
FFT	Fase - Fase - Terra
FFF	Fase - Fase - Fase
FFFT	Fase - Fase - Fase - Terra
FAI	Falta de alta impedância

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
1.1	Contextualização	12
1.2	Falta de alta impedância	14
1.2.1	Características principais	14
1.2.2	Estudos desenvolvidos	18
1.2.3	Modelos de falta de alta impedância	25
1.2.4	Métodos de detecção	27
1.2.4.1	Métodos de medição	29
1.2.4.2	Métodos de análise de domínio	30
1.2.4.3	Métodos classificadores	33
1.2.5	Componentes simétricas e de sequência zero	33
1.2.6	Algoritmo de detecção utilizado	34
1.3	Objetivos	35
1.4	Publicações	35
1.5	Estrutura do trabalho	36
<b>2</b>	<b>Algoritmos de otimização</b>	<b>37</b>
2.1	Algoritmo genético	38
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento do algoritmo para alocação de sensores</b>	<b>44</b>
3.1	Algoritmo de alocação de sensores de corrente em uma rede de distribuição (AG2AS)	44
3.2	Simulação da rede no Simulink	45
3.3	Funções do Algoritmo AG2AS	49
<b>4</b>	<b>Resultados das simulações de alocação dos sensores</b>	<b>53</b>
4.1	Sintonização do algoritmo de detecção	53
4.2	Sintonização do algoritmo genético	54
4.2.1	Fator de seleção	54
4.2.2	Tamanho da população	55
4.2.3	Fator de cruzamento	58
4.2.4	Fator de mutação	59
4.3	Resultado da alocação de sensores	60
	<b>Conclusão</b>	<b>63</b>
	<b>Referências</b>	<b>65</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

As redes de energia elétrica são vitais para o funcionamento das sociedades modernas, sendo elas as responsáveis por transmitir energia entre os centros de geração e os consumidores finais. A integridade destas redes é de alta importância tendo em vista que qualquer variação no suprimento de potência ou interrupção de fornecimento de energia causará transtornos para o funcionamento da sociedade, influenciando no tráfego, na economia, no suprimento de alimentação e, até mesmo, no suporte à vida dos enfermos. Adicionalmente, a produção do país, em termos de produtos e serviços, é diretamente afetada pela falta de energia.

Sendo assim, os dispositivos de monitoramento e proteção das redes são grandes áreas de pesquisa das fornecedoras de energia, sendo delas a responsabilidade pela situação destas redes. É interessante que a energia elétrica seja fornecida de forma estável e ininterrupta. Porém, como as linhas estão expostas ao ambiente, garantir esse fornecimento ininterrupto é um grande desafio. No Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através da resolução normativa ANEEL n.º 956/2021, criou um documento com objetivo de regulamentar todas as operações em relação às redes de distribuição chamado "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional" ou PRODIST. No módulo 8 do PRODIST são denominados dois índices para determinar a qualidade da entrega da energia que são: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). O DEC se relaciona com a quantidade de tempo média no qual o fornecimento de energia não se reestabelece, enquanto a FEC diz respeito a ocorrência dessas interrupções durante determinada quantidade de tempo (mensal, anual, etc.) (SANTOS et al., 2011).

Em redes de transmissão e distribuição, há duas maneiras de se transmitir a energia: via condutores aéreos e via condutores subterrâneos. Como os condutores aéreos estão mais expostos à dinamicidade do ambiente, estes condutores estão mais expostos a possíveis adversidades. Ao haver alguma variação fora do permitido de alguma das características ou parâmetros da rede (ZHOU et al., 2019), este evento é considerado uma falta. Conforme descrito em Prasad, Edward e Ravi (2018), pode-se classificar as faltas em dois tipos: falta em série (que se interpreta com um circuito aberto) e falta em paralelo (quando ocorre um curto-circuito, que podem ser chamadas também de faltas em "shunt" ou faltas de curto-circuito). Nas faltas em série, a característica latente é a variação da tensão das fases. Caso haja um incremento de qualquer tensão das fases, há uma falta em série. Este tipo de falta raramente ocorre em redes de transmissão.

As faltas de curto-circuito são as de maior ocorrência e mais estudadas. Diferente das faltas em série, as faltas de curto-circuito modificam o comportamento da corrente das fases. Os sistemas de proteção de uma rede normalmente são projetados tendo em vista este tipo de falta. As faltas de curto-circuito se dividem em simétricas e assimétricas. Faltas simétricas envolvem as três fases simultaneamente (FFF ou FFFT), enquanto as assimétricas, envolvendo duas ou menos (FT, FF, FFT). Por ser o tipo de falta mais frequente, a maioria dos sistemas de proteção são projetados com o objetivo de identificar as características deste tipo de falta, como a de sobrecorrente.

Ao se analisar as faltas de curto-circuito, há um tipo denominado falta de alta impedância. Conforme o trabalho de [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#), este tipo de falta se caracteriza por apresentar um aumento de magnitude de corrente dentro dos limites aceitáveis pelos dispositivos de proteção usuais, de modo que as FAIs não são detectadas pelos métodos de proteção tradicionais. Descrevem-se as FAIs pelo contato de uma ou mais fases com o solo diretamente, seja por um condutor aéreo que rompeu e caiu ao solo, seja por vegetação ou objetos externos que fazem o contato entre os conectores desprotegidos e o solo, onde este solo tem alta resistência, resultando assim no impedimento do aumento súbito de corrente para caracterizar este evento como sobrecorrente e atuar os dispositivos de proteção. Há diversos perigos oriundos deste contato como: área ao entorno do contato eletricamente energizada, risco de incêndio caso esteja em contato com vegetação seca ou materiais inflamáveis, risco de explosões devido ao aquecimento de materiais e geração de gases, entre outros, além do fluxo de energia desperdiçado e potencial dano a equipamentos conectados à rede.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos de modo a conseguir modelar a falta, de modo a conseguir detectar características capazes de identificar a porção de rede que se encontra faltosa. Atualmente, com o avanço computacional e o aumento da capacidade de resolução de problemas, os trabalhos desenvolvidos se utilizam de diversos métodos de decisão computacional em conjunto com ferramentas matemáticas para melhorar a eficiência da detecção, ou se aproveitam do aumento do poder computacional de microprocessadores para embarcar métodos de detecção junto aos relés tradicionais. Como exemplo, tem-se o trabalho de [Veerasamy et al. \(2021\)](#) que utiliza redes neurais para classificar os tipos de faltas que ocorrem em uma rede integrada de painéis fotovoltaicos. No trabalho de [Silva et al. \(2018\)](#), combinaram-se as técnicas de aprendizado de máquina junto à transformada "wavelet" discreta para extrair componentes do sinal das correntes e criar um classificador capaz de identificar através da extração de componentes das correntes se há falta ou não. O trabalho desenvolvido por [Sarwar et al. \(2020\)](#) utiliza uma máquina de suporte de vetores de múltiplas classes para classificar as características extraídas dos sinais da corrente da rede e identificar se há falta ou não.

A contribuição deste trabalho consiste em desenvolver uma combinação de técnicas

para detecção de FAIs em redes de energia. A primeira técnica consiste em um algoritmo de detecção que demande baixa capacidade computacional capaz de ser embarcada em microprocessadores para atuar em conjunto com relés tradicionais já operantes, baseado no trabalho desenvolvido por [Batista et al. \(2022\)](#) que apresentou um método capaz de detectar falta de alta impedância utilizando análise fasorial em conjunto com a análise de componentes simétricas. Aliado à técnica de detecção, foi desenvolvido um algoritmo genético que, a partir de simulações, identifica a distância de detecção de cada sensor e apresenta a melhor disposição de sensores para proteger a maior porção de rede, conforme a alocação prévia de sensores definida pelo exequente.

## 1.2 Falta de alta impedância

Falta de alta impedância é o principal objeto de estudo deste trabalho. Este capítulo tem como objetivo apresentar os estudos sobre este evento, as modelagens matemáticas, os métodos de detecção desenvolvidos para a superação deste evento.

### 1.2.1 Características principais

As linhas de transmissão e distribuição são instaladas com objetivo de transferir energia entre as usinas geradoras e os polos consumidores com o máximo de eficiência. É um sistema que, normalmente, se estende por centenas de quilômetros e, portanto, é esperado que faltas ocorram em diversos pontos dos sistemas de transmissão e distribuição. Tendo em vista estas faltas e os impactos negativos que podem ocorrer, esforços são direcionados para o estudo destes tipos de anomalias ([CHEN; HUANG; HE, 2016](#)). Classificação dos tipos de falta, como detectar cada tipo e como isolar o sistema faltoso rapidamente são objetos de estudos para diminuir o prejuízo energético, material, financeiro e de segurança da rede.

Limitação de corrente, monitoramento em tempo real, análise do espectro das frequências e redes neurais ([GURURAJAPATHY; MOKHLIS; ILLIAS, 2017](#); [GHADERI; III; MOHAMMADPOUR, 2017](#)) são alguns exemplos de métodos que podem ser empregados para análise, detecção e mitigação de faltas nas redes elétricas. Estas soluções têm como limitação principal, as características do monitoramento. A confiabilidade dos sensores, a capacidade de manutenção, a quantidade de sensores são algumas das possíveis limitações ao utilizar quaisquer técnicas de monitoramento da rede para detecção de faltas. A atenuação do sinal devido à distância entre o evento e o sensor mais próximo, a influência de eventos ambientais e a influência de manipulação de eventos típicos da rede (como entrada e saída de cargas, banco de capacitores, motores, novos geradores, etc.) também devem ser considerados para a confiabilidade de detecção de faltas em redes de magnitudes quilométricas. Diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo do tempo,

como apresentado em [Furse et al. \(2020\)](#) baseadas na análise do tempo e/ou da frequência.

Dentre os vários tipos de faltas estudadas, FAIs estão entre os principais tipos pesquisados no meio acadêmico e técnico, para o desenvolvimento de uma solução otimizada que consiga se adequar à maioria das redes de transmissão já disponíveis e utilizadas. A solução deve apresentar uma resposta rápida e confiável, pouca ou nenhuma intervenção, ou adequação da rede (a instalação de novos equipamentos de monitoramento deve ser minimizada) e minimização de custos. Se necessária instalação de novos equipamentos, a manutenção deve ser facilitada, de forma que, a implementação da técnica de detecção e isolamento da falta, seja economicamente viável e seja seguramente precisa.

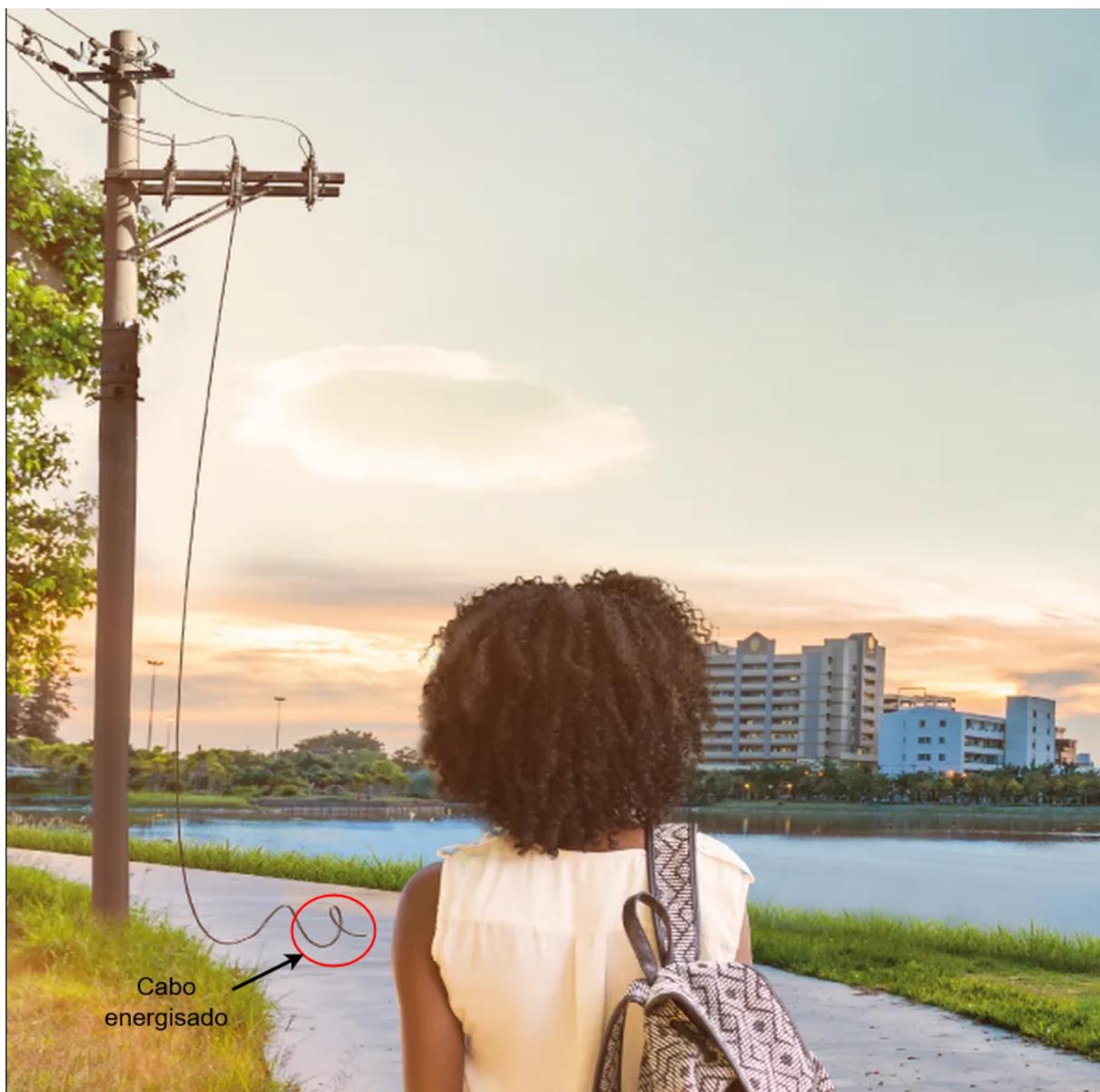
Como descrito em [Ghaderi, III e Mohammadpour \(2017\)](#), faltas de alta impedância (FAI) são distúrbios que ocorrem na rede de distribuição no qual não se há aumento de corrente significativo devido ao contato da rede com a alta impedância do solo. Sendo assim, as proteções convencionais não conseguem detectar este tipo de anomalia, pois se baseiam em identificar variações magnéticas devido a sobrecorrente ou variações térmicas devido à capacidade de condução dos condutores que se conectam aos elementos de proteção.

Este distúrbio ocorre mediante a um contato direto ou indireto, como visto na [Figura 1](#), ou com a aproximação da parte condutiva do cabo ao solo, onde esta distância é suficiente para criar a ignição de um arco elétrico entre as superfícies. A variação ambiental influencia diretamente no comportamento dos sinais da rede onde ocorreu uma FAI. A umidade do ar e do solo, tipo do solo, vegetação, topologia da rede, tipos de carga são exemplos de variáveis descritas em [Ghaderi, III e Mohammadpour \(2017\)](#) que influenciam nas características dos sinais de uma FAI, sendo necessária a compreensão destas individualidades para tornar o método de detecção da falta mais robusto. Dentre estes fatores, os que mais influenciam nas características dos sinais das faltas são: a umidade do solo e o tipo de material do solo em contato com o condutor.

No trabalho de [Cui, El-Arroudi e Weng \(2019\)](#), agrupou-se os tipos de faltas em: falta monofásica fase-terra (FT), falta bifásica (FF), falta bifásica fase-terra (FFT) e falta Trifásica fase-terra (FFFT). Em todos os casos, a ocorrência da falta pode se dar em contato direto dos condutores com o solo ou, via um agente externo (galhos, árvores, postes) que faz contato entre os condutores e o solo, como descrito em [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#). No trabalho de [Silva \(1992\)](#), além de se classificar as faltas em relação às fases, também classifica-se as faltas em relação ao fluxo de corrente entre os elementos presentes. Quando há fluxo de corrente entre a linha e o solo, se caracteriza falta ativa. Quando não há, caracteriza-se falta passiva. Na [Figura 2](#), demonstra a linha cronológica de ocorrência de uma FAI quando se romper um condutor.

Ao observar a imagem, destaca-se que durante a aproximação do condutor rompido com o solo (ou na aproximação do agente externo com o condutor) definido na imagem

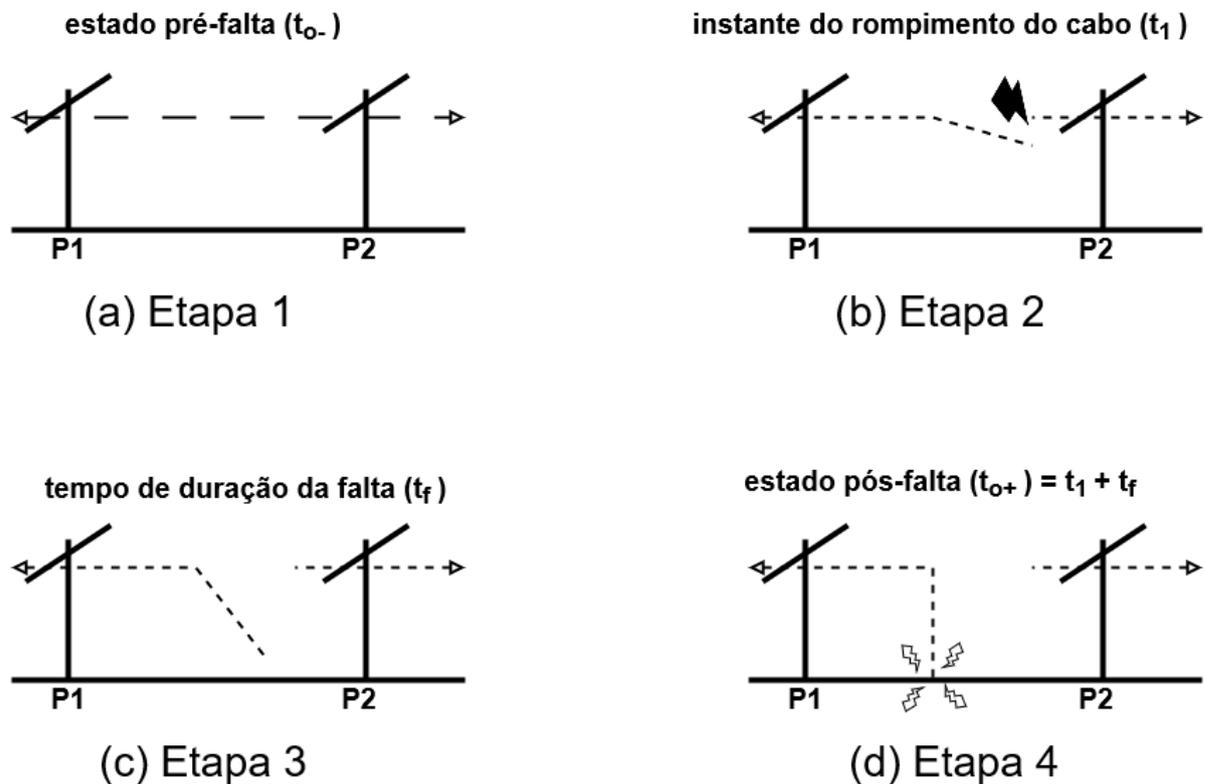
Figura 1 – Imagem exemplificativa de uma FAI proposta pela Energisa



Fonte: G1 (2021)

como tempo de queda do cabo ( $t_{queda}$ , na imagem 2.c), acontecerá a ignição de um arco elétrico entre as superfícies. Conforme descrito em Ghaderi, III e Mohammadpour (2017), para a formação do arco há dois tipos de variáveis a serem consideradas: a tensão da rede e a distância entre as superfícies. O ar é um material dielétrico, ou seja, é capaz de conduzir energia elétrica ao ser exposto a um campo elétrico de alta intensidade. O arco se forma ao reduzir a distância entre o condutor e o solo, pois assim, existirão menos moléculas de ar, diminuindo a quantidade de material resistente ao campo gerado entre a rede e o terra. O campo elétrico gerado tem comportamento senoidal similar ao da tensão da rede, atingindo valor máximo (pico) a cada semiciclo, fazendo com que em um período da rede ocorram duas ignições de arco e duas extinções de arco. Em cada um destes eventos, gera-se um aquecimento excessivo em pontos específicos, causando fagulhas como explicado em

Figura 2 – Estágios de uma FAI causada por rompimento do condutor.



Fonte: Adaptado de Nakagomi (2006)

Ghaderi, III e Mohammadpour (2017).

Os riscos associados às FAIs, conforme demonstrado em Ghaderi, III e Mohammadpour (2017), Arias (2015), Santos et al. (2012) são: deixar a área em torno do contato energizada colocando em risco tanto vida selvagem quanto humana e a iminência de se iniciar fagulhas, conforme o tipo de solo no qual se flui a corrente. Em vegetações ou em épocas de baixa umidade, essas fagulhas podem gerar incêndios de grandes proporções, causando danos a propriedade e ameaçando a vida na região.

Como as FAIs não se comportam como outros distúrbios de redes conhecidos, estudos específicos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de observar, identificar e modelar as características principais que ocorrem nos sinais de tensão e corrente de uma rede na qual ocorre este evento. Estudos como os apresentados em Ghaderi, III e Mohammadpour (2017), Santos et al. (2012), demonstraram e destacaram as características principais de um FAI, como demonstrado na Figura 3. Destacam-se:

- **Assimetria:** Os picos têm valores diferentes entre os semiciclos;
- **Não-linearidade:** A relação entre tensão e corrente não apresenta característica linear;

- **Build-Up**: A magnitude da corrente vai crescendo lenta e gradualmente até o valor máximo;
- **Shoulder**: Intervalos de constância enquanto cresce a corrente de falha;
- **Intermitência do arco**: durante as reignições do arco, a corrente conduzida através do ar podem ter baixa magnitude, com isso, há um extinção de corrente súbita observada no sinal da corrente;
- **Corrente não-estacionária**: O espectro de frequência da corrente varia enquanto a falta ocorre;
- **Componentes de baixa frequência**: geram-se componentes acima de 300 Hz na tensão e 600 Hz na corrente.
- **Componentes de alta frequência**: devido à reignição de arcos elétricos, componentes de alta frequência aparecem na corrente.

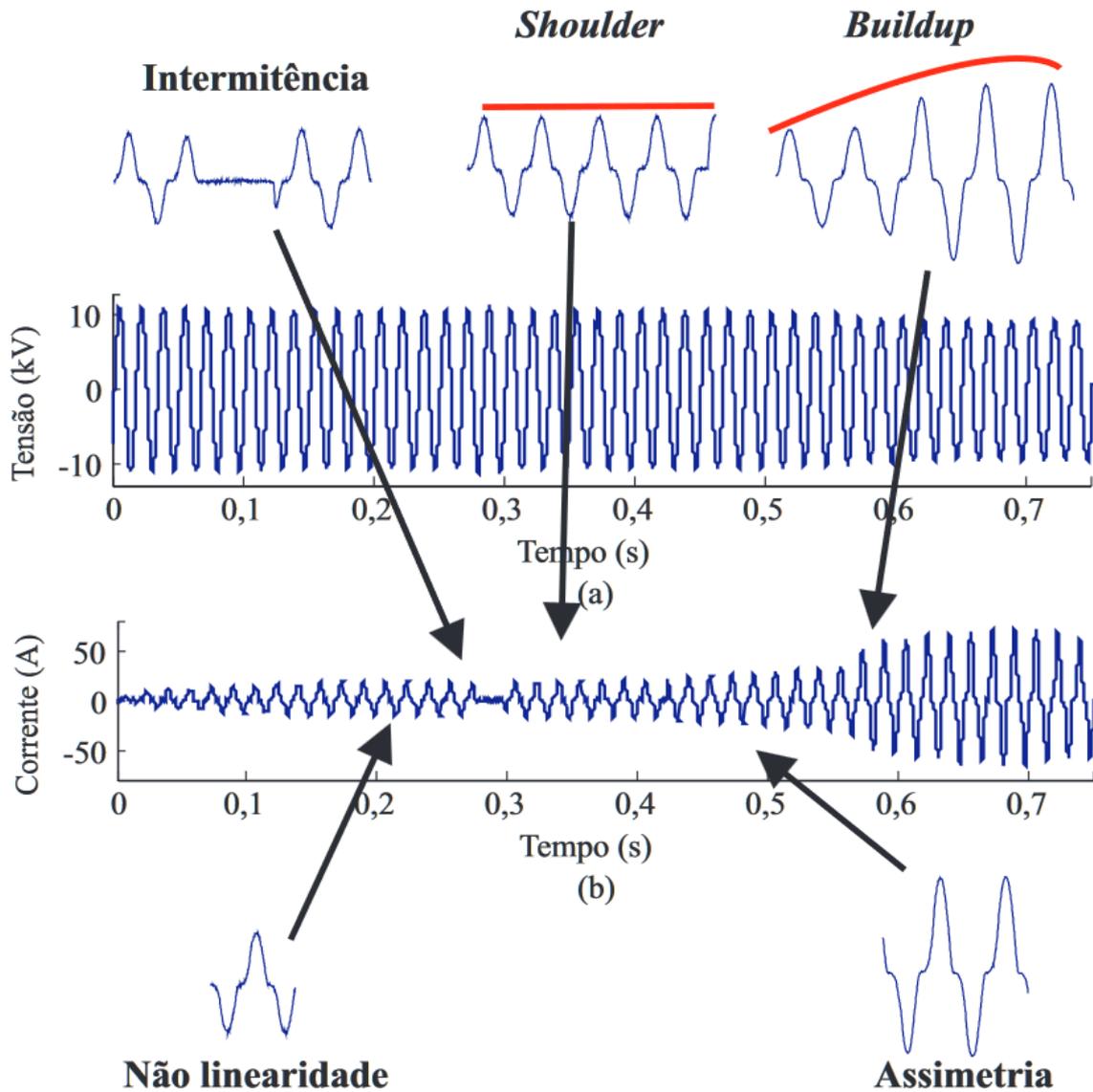
### 1.2.2 Estudos desenvolvidos

Para se desenvolver técnicas de detecção e mitigação das FAIs, foi necessária a modelagem do circuito equivalente de uma FAI de modo a se conseguir simular este evento em redes simuladas e/ou em laboratório. Em 2018, um circuito com dois diodos em antiparalelo, cada um em série com uma fonte CC e com resistores controlados, foram colocados entre a fase e terra, para simular a falta. Os resistores são controlados para simular a variação de umidade e introduzir a componente de aleatoriedade da FAI (THERON; PAL; VARGHESE, 2018). Em 2021, adaptou-se o modelo de Ferraz, que consiste em uma série de resistências em paralelo com uma indutância. A série de resistências são definidas por um polinômio obtido via aproximação de dados reais. Então, utilizou de um software para regressão o polinômio, diminuindo os parâmetros, para diminuir a complexidade do sistema e obter mais velocidade. Para adquirir as características de assimetria, dois diodos em antiparalelo, cada um em série com uma fonte CC com valores diferentes entre si foram inseridos (DORIA-GARCÍA et al., 2021).

Através das modelagens como as apresentadas nos trabalhos citados no parágrafo anterior, técnicas de detecção foram desenvolvidas. Em 2018, desenvolveu-se uma técnica (GONZALEZ et al., 2018) via modelagem da rede a fim de medir a capacitância de sequência zero, utiliza-se desta estimativa da capacitância para as conclusões. Deduziu-se o circuito de uma rede isolada neutra que houve uma FAI, a partir dos métodos de direcionalidade, apresentado na Figura 4.

Na Figura 4,  $U_1$  representa a tensão de falta,  $R_{\text{fault}}$  representa a resistência da falta,  $C_0$  representa a capacitância da rede antes ("back") e depois ("after") da falta,  $I_0$

Figura 3 – Características induzidas na corrente ao ocorrer uma FAI.



Fonte: SANTOS et al. (2016)

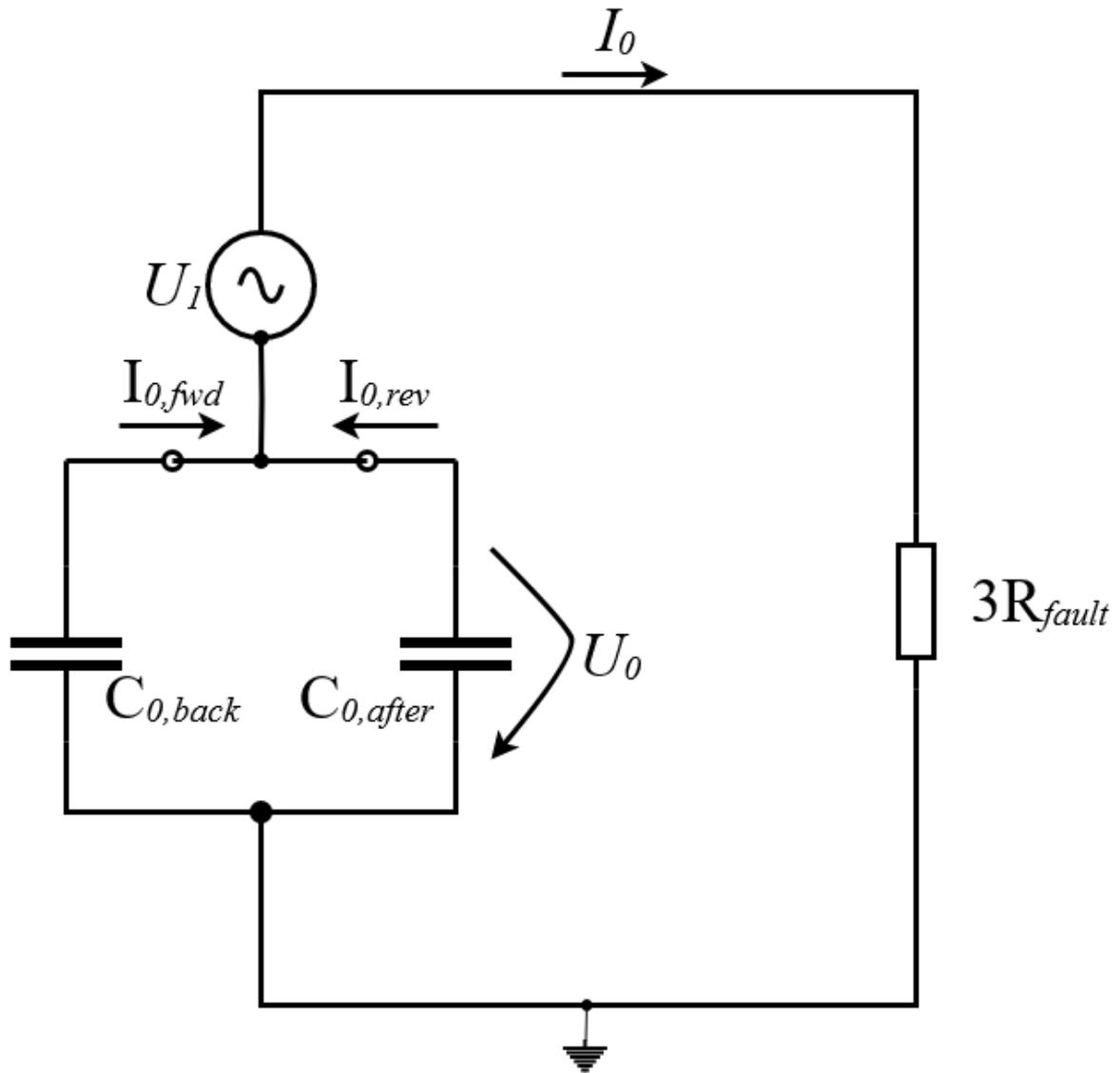
a corrente de sequência zero e  $U_0$  a tensão de sequência zero. Através deste circuito, obtêm-se as equações 1.1 e 1.2:

$$R_{fault}(C_0) = \frac{\sqrt{U_1^2 - U_0^2}}{3\omega C_0 U_0} \quad (1.1)$$

$$R_{fault}(C_0) = \frac{1}{3\omega C_0} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_1 \omega C_0}{I_0}\right)^2 - 1} \quad (1.2)$$

sendo  $\omega$  a frequência angular (em rad/s) e  $C_0$  a capacitância de sequência zero total da rede, que combina as capacitâncias pré e pós-falta. Através da análise da janela de detecção de um relé para eventos de sobrecorrente, o trabalho utilizou o menor valor

Figura 4 – Circuito deduzido dos métodos de direcionalidade



Fonte: Adaptado de [Gonzalez et al. \(2018\)](#)

de detecção do relé para  $U_0$  e  $I_0$  para calcular os valores de  $R_{\text{fault}}$  a fim de observar a janela de não detecção para as FAIs.

Então, através de algoritmos de equação diferencial (DEA, do inglês "*Differential Equation Algorithm*") calcula-se corrente e tensão de sequência zero da rede em tempo real, e assim, se calcula a capacitância estimada através da [Equação 1.3](#):

$$C_{0,k} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{i_{0,k} + i_{0,k-1}}{u_{0,k} - u_{0,k-1}} \quad (1.3)$$

sendo  $k$  a amostra atual no tempo discreto e  $\Delta t$  é calculado por  $\frac{1}{F_S}$ , sendo  $F_S$  a frequência de amostragem do sinal. O resultado da capacitância também indicará a direcionalidade da falta, através do sinal da capacitância estimada. Contudo, detectaram-se problemas

em dois instantes: quando a tensão de sequência zero atinge o valor de pico, onde não há variação de tensão no tempo, e quando há re-ignição da falta. Para evitar estes problemas, um vetor de tamanho  $n$  é requerido para que meio período da forma de onda seja capturado, sendo que o tamanho  $n$  é calculado pela [Equação 1.4](#) :

$$n = \frac{F_s}{2 \cdot F_g} \quad (1.4)$$

sendo  $F_g$  a frequência da rede. Substituindo os termos de variação de corrente e tensão de sequência zero pelo vetor de variação de sequência de tamanho  $n$  na [Equação 1.3](#), têm-se as equações [1.5](#) e [1.6](#).

$$b = \frac{\Delta t}{2} \cdot \begin{vmatrix} i_{0,1} + i_{0,0} \\ i_{0,2} + i_{0,1} \\ \vdots \\ i_{0,n} + i_{0,n-1} \end{vmatrix} \quad (1.5)$$

$$B = \begin{vmatrix} u_{0,1} + u_{0,0} \\ u_{0,2} + u_{0,1} \\ \vdots \\ u_{0,n} + u_{0,n-1} \end{vmatrix} \quad (1.6)$$

$$b = B \cdot C_0 \quad (1.7)$$

Em redes balanceadas que estão no estado de pré-falta, as magnitudes da tensão e corrente de sequência zero são nulos. Contudo, na realidade, há pequenos desbalanços nas redes que causam fugas de corrente, fazendo com que a corrente e tensão de sequência zero tenha valores diferentes de zero. Para evitar que haja divisão por zero, um fator  $\alpha$  é adicionado à [Equação 1.7](#). Este sinal  $\alpha$  é uma onda triangular de frequência  $F_s/2$  com média zero para não influenciar no cálculo da capacitância. Para equação [Equação 1.7](#), então, assume-se:

$$C_0 = \frac{(B + \alpha)}{b} \quad (1.8)$$

A amplitude do sinal  $\alpha$  é calculada com base em limites estabelecidos para a capacitância média. Estes limites são heurísticamente delimitados pelo desenvolvedor. Porém, é necessário evitar a influência de ruídos no momento da medição dos sinais obtidos. Portanto, para compensar estes efeitos, a equação da magnitude de  $\alpha$  é demonstrada na [Equação 1.9](#):

$$A = \sqrt{4n \cdot \sigma_u^2 + \frac{2n\Delta t}{\tau} \dot{\sigma}_i \sigma_u} \quad (1.9)$$

sendo  $\tau$  os limites nos quais a  $C_{0,avg}$  (capacitância média estimada no estado de pré-falta) varia. Neste trabalho está definida entre  $\pm 3 \cdot 10^{-9}$  e  $\pm 4,5 \cdot 10^{-9}$ .  $\sigma_i$  e  $\sigma_u$  são os sinais de ruídos de corrente e tensão, respectivamente. Como resultado, o algoritmo tem grande rapidez ao se detectar FAI para as magnitudes menores que os valores mínimos das zonas de detecção dos relés convencionais. Porém, há alguns reverses com a estimação da capacitância, o método de resolução das equações, o cálculo do parâmetro A para compensar os ruídos e a condição de uma rede equilibrada e sua influência no método.

Também em 2018, após incêndios da sexta-feira negra que ocorreram na Austrália, o governo australiano criou um programa para desenvolver métodos de proteção a incêndios florestais induzidos por redes elétricas, o PBSP (do inglês, "*Powerline Bushfire Safety Program*"). Uma das iniciativas do programa foi o desenvolvimento de um banco de dados de sinais de redes nos quais foram induzidas FAIs em ambiente controlado através do projeto chamado "*Vegetation Conduction Ignition Testing*". Este ambiente consistia em uma rede não carregada e não aterrada, trifásica, 22 kV, onde foram realizados testes com diferentes tipos de vegetação para observar quais tipos de vegetação tem maior tendência a se incendiar. Com a corrente de falta delimitada de 0,5 a 4A, foram coletadas informações em dois canais paralelos: um canal de baixa frequência (LF, do inglês, "*Low frequency*") que tem monitoramento contínuo de 100 kS (mil amostras)/s, com o espectro de frequência de 0 a 50 kHz. O outro espectro, é de alta frequência (HF, do inglês, "*High frequency*"), tem amostragem por varredura, como taxa de amostragem de 2 MS/s, com o espectro de frequência de 10 kHz a 1 MHz. A janela de varredura é dividida a cada 1 segundo, onde os primeiros 20 milissegundos é o tempo de leitura e os outros 980 milissegundos, tempos para tratamento de sinal, classificação e decisão computacional.

Para extrair-se o espectro de frequência dos sinais de alta frequência dos sinais, utilizou-se (GOMES; OZANSOY; ULHAQ, 2018) a transformada discreta de wavelet (DWT, do inglês, "*Discrete Wavelet Transform*") para obter componentes para classificar os sinais. A Equação 1.10 demonstra como é feita a decomposição do sinal.

$$DWT(x, m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_o^m}} \sum_l x(k) \psi\left(\frac{n - la_o^m}{a_o^m}\right) \quad (1.10)$$

sendo  $x(k)$  o sinal amostrado,  $\psi(n)$  é a onda wavelet mãe,  $a_o^m$  é o coeficiente de dilatação e  $la_o^m$  é o coeficiente de translação. Estes coeficientes são calculados com base na Análise de multi resolução (MRA, do inglês, "*Multi-Resolution Analysis*"). O MRA consiste em um procedimento iterativo que separa as componentes de frequência do sinal a cada iteração. A primeira saída é o resultado da convolução do sinal inicial com dois sinais impulso, um com resposta em baixa frequência, outro em alta frequência, além de se obter dois outros sinais, componente de aproximação ( $y_a$ ) e de detalhamento ( $y_d$ ). Estes resultados alimentam a próxima iteração do MRA, detalhando o sinal em frequência a

cada iteração. A equação que descreve os coeficientes  $y_a$  e  $y_d$  é dada por:

$$y_d^i[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_d^{i-1}[k] \cdot h[2n-k] \quad (1.11)$$

$$y_a^i[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_a^{i-1}[k] \cdot g[2n-k] \quad (1.12)$$

sendo  $h[t]$  e  $g[t]$  as funções de resposta de impulso em baixa e alta frequência, respectivamente. A cada iteração, o cálculo da frequência de corte de alta ( $Fb_{up}$ ) e baixa frequência ( $Fb_{down}$ ) para detalhamento do sinal é dado pelas equações 1.13 e 1.14:

$$Fb_{up} = \frac{Fs}{2^n} \quad (1.13)$$

$$Fb_{down} = \frac{Fs}{2^{n+1}} \quad (1.14)$$

sendo  $Fs$  a frequência de amostragem e  $n$ , o nível de decomposição do sinal. Através desta decomposição se obtém as características utilizadas no trabalho para classificar os sinais: percentual de energia, soma de valores absolutos, picos, desvio padrão e entropia de Shannon. Juntamente a estas características, através da análise do espectro da potência (PSD, do inglês, "Power Spectral Density"), dentro do domínio da frequência, calculou-se periodogramas através do método de Welch, que consiste em se segmentar o sinal em vários espaços de tempo que se sobrepõem, obtendo um resultado estimado e normalizado. O resultado é um periodograma não paramétrico dado pela equação:

$$P(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_k(f_n) \quad (1.15)$$

sendo  $K$  o número de segmentos na série temporal,  $f_n$  a frequência analisada e  $I_k$  o periodograma de cada um dos segmentos calculados pela equação:

$$I_k(f_n) = c \left| \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} X_k(j) W(j) \exp -2kijn/L \right|^2 \quad (1.16)$$

sendo  $L$  é a largura do segmento,  $X_k$  é o  $k$ -ésimo segmento,  $j$  é o número da amostra,  $W$  é a janela da função e  $c$ , uma constante que depende do tamanho do segmento e da janela usada.

Extraindo as características, testaram-se diferentes métodos classificadores para definir qual melhor método para identificar quais características mais relevantes diferenciam uma rede com FAI e uma rede saudável. O autor utilizou ferramentas disponíveis no

software MATLAB e através dos resultados obtidos foi definido o método de árvore de decisão melhorada entre análise discriminante, máquina de suporte de vetores,  $K$ -ésimo vizinho mais próximo e árvore de decisões.

O algoritmo apresenta alta acurácia geral com as limitações propostas (cerca de 98%) e apresenta uma abordagem diferente da maioria dos trabalhos da área, pois se analisa a tensão e o espectro de alta frequência, ao contrário da maioria dos trabalhos desenvolvidos que se baseiam na corrente e espectro da baixa frequência. Porém, é necessário evidenciar que a necessidade de alta taxa de amostragem irá requerer uma grande necessidade de poder computacional e de memória para os dados necessários para treinamento do algoritmo de modo a adicionar maior robustez ao método, aumentando a dificuldade de se embarcar o algoritmo junto a um dispositivo de proteção. Além disso, o tempo de amostragem em relação ao tempo de cálculo computacional demonstra a complexidade do método, reforçando a necessidade de um poder computacional considerável para lidar com a quantidade de dados e complexidade de cálculos necessários à execução do método.

Em 2020, o método descrito em Ozansoy (2020) analisa a assimetria da corrente da rede através de quatro diferentes métodos de cálculo de assimetria por métodos computacionais: método do coeficiente de assimetria de Pearson (Equação 1.17), o segundo método de Pearson chamado de método de assimetria mediana (Equação 1.18), coeficiente de assimetria de Bowley (Equação 1.19) e método *medcouple* de Brys (Equação 1.20).

$$s_k = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{N \cdot \sigma^3} \quad (1.17)$$

$$s_k = \frac{3 \cdot (\mu - M)}{\sigma} \quad (1.18)$$

$$s_k = \frac{Q_1 - 2 \cdot Q_2 + Q_3}{Q_3 - Q_1} \quad (1.19)$$

$$s_k = \text{med}_{x_i \leq Q_2 \leq x_j} \frac{(x_j - Q_2) - (Q_2 - x_i)}{x_j - x_i} \quad (1.20)$$

Nestas equações,  $s_k$  é o resultado da assimetria,  $\mu$  a média,  $\sigma$  o desvio padrão,  $M$  a mediana e  $Q_i$  representa os quartis, onde o subscrito representa a numeração do quartil. Através assimetria relativa, que consiste em analisar a assimetria de um conjunto de dados em relação a ele mesmo, utilizou-se os dados da corrente em baixa frequência (LF). Determinando a janela de cálculo da assimetria, a assimetria relativa foi realizada. Entre um conjunto a amostra mais recente obtida até a 10<sup>a</sup> mais recente, e outro conjunto da 11<sup>a</sup> a 20<sup>a</sup> amostras mais recentes da corrente rms da rede, comparou-se os resultados dos métodos de cálculo de assimetria, demonstrando que o método de Pearson (Equação 1.17)

foi o mais eficiente em separar sinais com FAI de sinais normais. Entretanto, não foi possível diferenciar eventos de manobras dentro da rede em relação a faltas. Assimetria é um cálculo computacionalmente custoso, sendo outro revés da aplicação deste método.

### 1.2.3 Modelos de falta de alta impedância

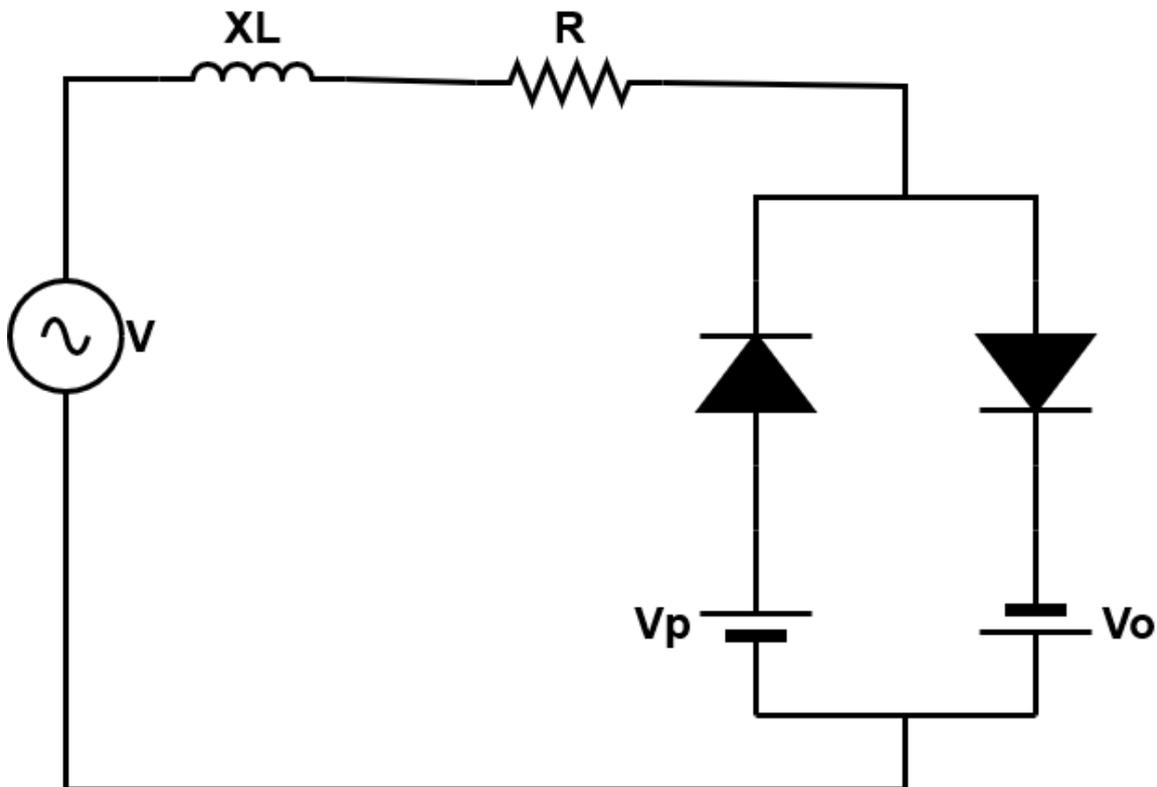
É extremamente necessário que, para a aplicação de técnicas de mitigação, detecção e aquisição de dados sobre FAIs, desenvolvam-se ambientes simulados e/ou controlados, pois a ocorrência de uma FAI em uma rede elétrica real ameaça a vida dos pesquisadores, a integridade do ambiente em volta e da rede no qual este evento será induzido. Dada a deterioração dos equipamentos utilizados e o uso de um espaço físico relativamente grande (algumas dezenas de metros quadrados), o custo de criar um ambiente para estudos é significativo. Para manter a operação segura, os processos de segurança devem ser extremamente minuciosos, aumentando o custo e a complexidade deste tipo de operação. Sendo assim, criou-se a necessidade de se desenvolver um modelo matemático capaz de simular as características de uma FAI em um ambiente computacional para sobrepor os reverses anteriormente citados.

A primeira abordagem de modelagem de uma FAI foi desenvolvida baseada no modelo de Emanuel conforme descrito em [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#) e [Zamanan e Sykulski \(2014\)](#). Este modelo baseia-se em simular a ocorrência do arco elétrico que ocorre durante uma FAI e incluir neste modelo, as características de assimetria e não linearidade explicadas na [subseção 1.2.1](#). Na [Figura 5](#) apresenta-se o circuito baseado no modelo de Emanuel. Os diodos conectados em anti-paralelo, cada um em série com uma fonte CC, são os responsáveis por tentar simular o comportamento assimétrico do fenômeno.

Em 1993, o modelo foi redesenhado considerando a não linearidade da resistência da terra durante o acontecimento da FAI. Duas resistências variantes no tempo foram colocadas em série com os diodos no lugar das fontes CC, a fim de manipular a resistência da falta no lugar da indutância e resistência do modelo de Emanuel como demonstrado na [Figura 6](#).

Um modelo mais complexo, baseado no modelo de arco de Emanuel, foi desenvolvido em 1998. Nele, há duas chaves que desacoplam o condutor da linha e acopla no modelo que simula a FAI. Outra chave é responsável por simular os eventos de re-ignição do arco elétrico, controlado por um TACS (Sistema de controle de análise transiente, do inglês, *transient analysis of control system*). A resistência variável é responsável por controlar a magnitude da corrente de falta e os diodos em antiparalelo em série com as fontes S1 e S2 são responsáveis por induzir a característica de assimetria da falta em cada parte do semiciclo durante a condução do arco. Porém, as características de *"shoulder"* e *"build-up"* não são bem representadas, conforme descrito em [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#)

Figura 5 – Modelo proposto por Emanuel



Fonte: Adaptado de [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#)

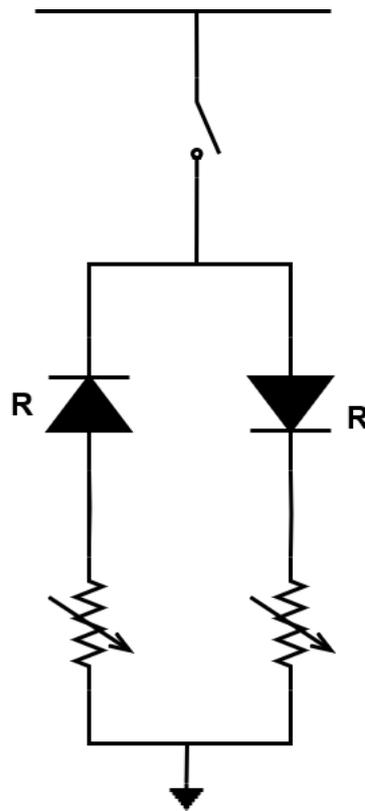
Em 2001, Ham desenvolveu um novo modelo que se utiliza de um TACS para coordenar as resistências variáveis, que está demonstrado na [Figura 8](#). Os dois resistores são dispostos em série e o TACS é o responsável por induzir as características específicas de uma FAI usando os resistores, onde, um é responsável pelas características de assimetria e não linearidade da corrente pós-falta e o outro é utilizado para simular as características de "shoulder" e "build-up".

Um modelo que retorna com dois diodos em antiparalelo foi apresentado em 2004 e demonstrado na [Figura 9](#). Nela, há duas fontes CC que variam a magnitude da tensão aleatoriamente para induzir o comportamento de assimetria. O resistor variável é alimentado com um controlador embarcado com um comportamento aleatório tornando o comportamento mais dinâmico e mais próximo à realidade.

Outro modelo foi proposto em Machalik et al. (2005), apresentando um modelo que o controle do arco é feito por dois diodos e duas tensões de rampa. A resistência e componentes da falta são controladas pela resistência não-linear dispostas em série com a resistência linear.

Em 2006, um modelo simplificado do modelo de Emanuel foi proposto por Lai. Este modelo foi baseado em uma falta que ocorre quando se há uma superfície arenosa. Nela, as fontes são responsáveis pelo comportamento de re-ignição do arco onde, quando

Figura 6 – Modelo proposto para simular a variação da resistência variável da terra.



Fonte: Adaptado de [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#)

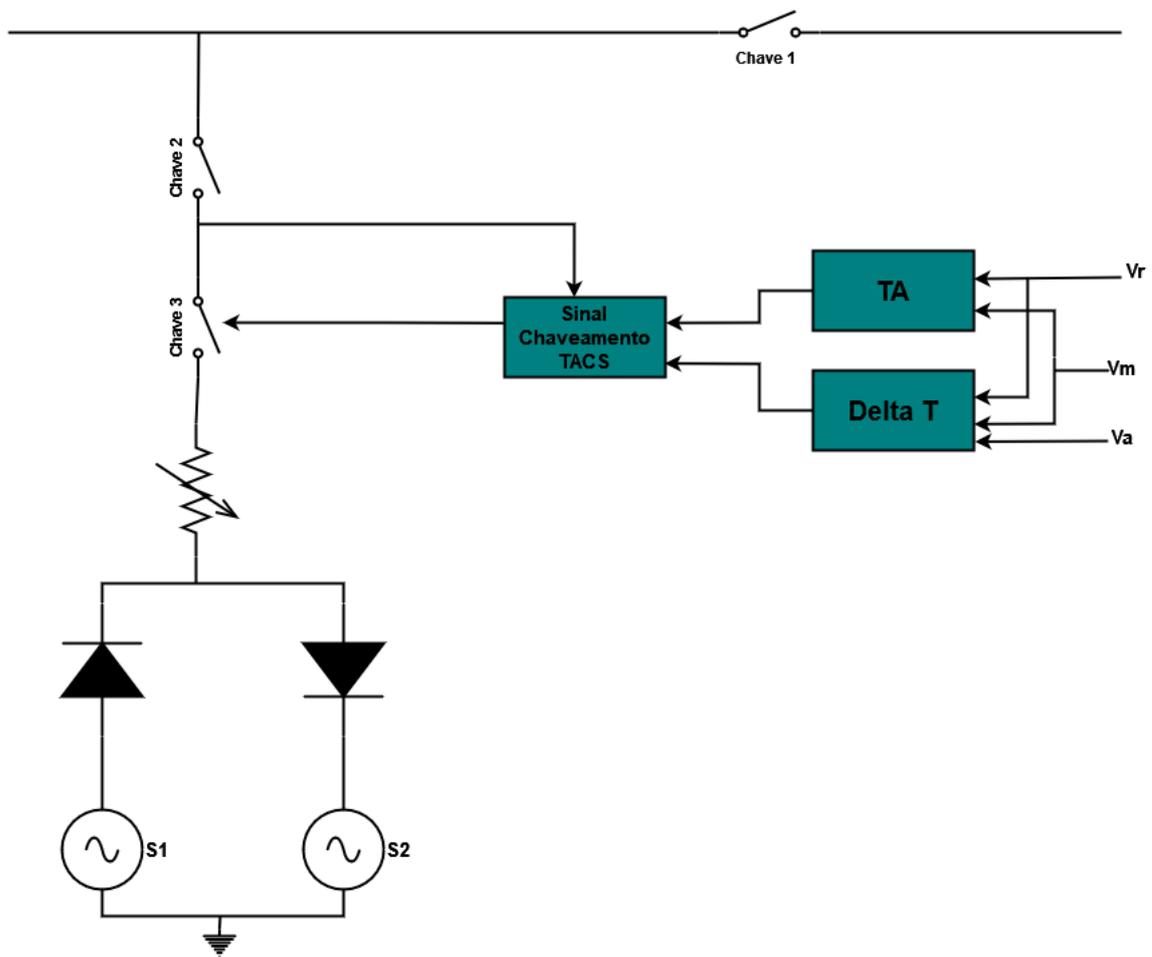
a tensão da rede for maior que a tensão das fontes (simulando a rigidez dielétrica do ar) há fluxo de corrente entre a rede e o terra. Cada fonte é responsável pela condução em um semiciclo ( $V_p$ , semiciclo positivo e  $V_n$ , semiciclo negativo). As resistências têm valores diferentes para simular a assimetria. A resistência da falta é o resultado da resistência equivalente entre as duas.

#### 1.2.4 Métodos de detecção

A partir dos estudos de modelagem de falta de alta impedância, há base para simulação e validação para desenvolvimento dos métodos de detecção. Os eventos são simulados em ambientes computacionais, fazendo com que seja possível extrair os sinais de tensão e corrente da rede, possibilitando identificar quais características são induzidas nos sinais da rede, permitindo a identificação de padrões oriundos deste tipo de falta.

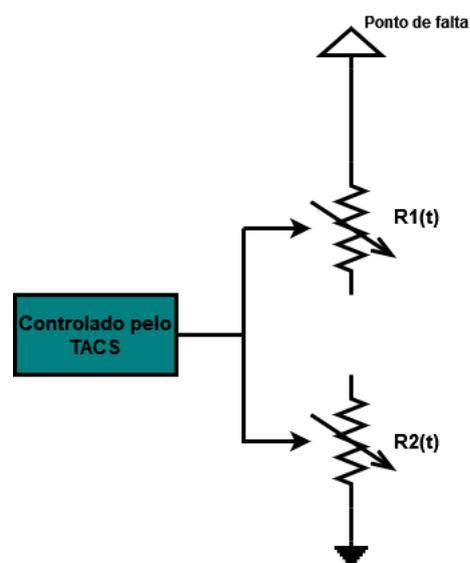
Há diversos tipos de métodos com o objetivo de identificar os efeitos de uma FAI num sistema. Assim como descrito em [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#), os métodos principais de detecção se dividem em dois tipos: métodos mecânicos e métodos elétricos. Os métodos mecânicos, apesar de existirem, são pouco utilizados devido a limitações de instalação, custo e baixa acertabilidade. Um exemplo de um método mecânico foi apresentado em [Wester \(1998\)](#) que consiste em um braço (ou uma barra) capaz de criar uma falha do

Figura 7 – Modelo proposto por Chan (1998)



Fonte: Adaptado de Mishra e Panigrahi (2019)

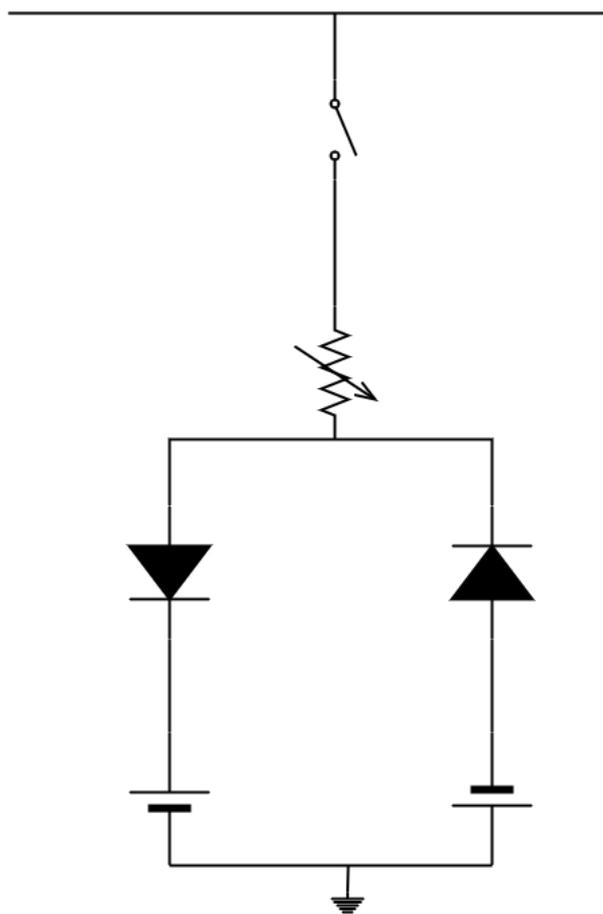
Figura 8 – Modelo proposto por Ham (2001)



Fonte: Adaptado de Mishra e Panigrahi (2019)

aterramento a partir do rompimento de um condutor. O condutor ao romper, força a mola a retirar a malha de aterramento induzindo assim, o relé a atuar, protegendo a rede.

Figura 9 – Modelo proposto por Yong (2004)



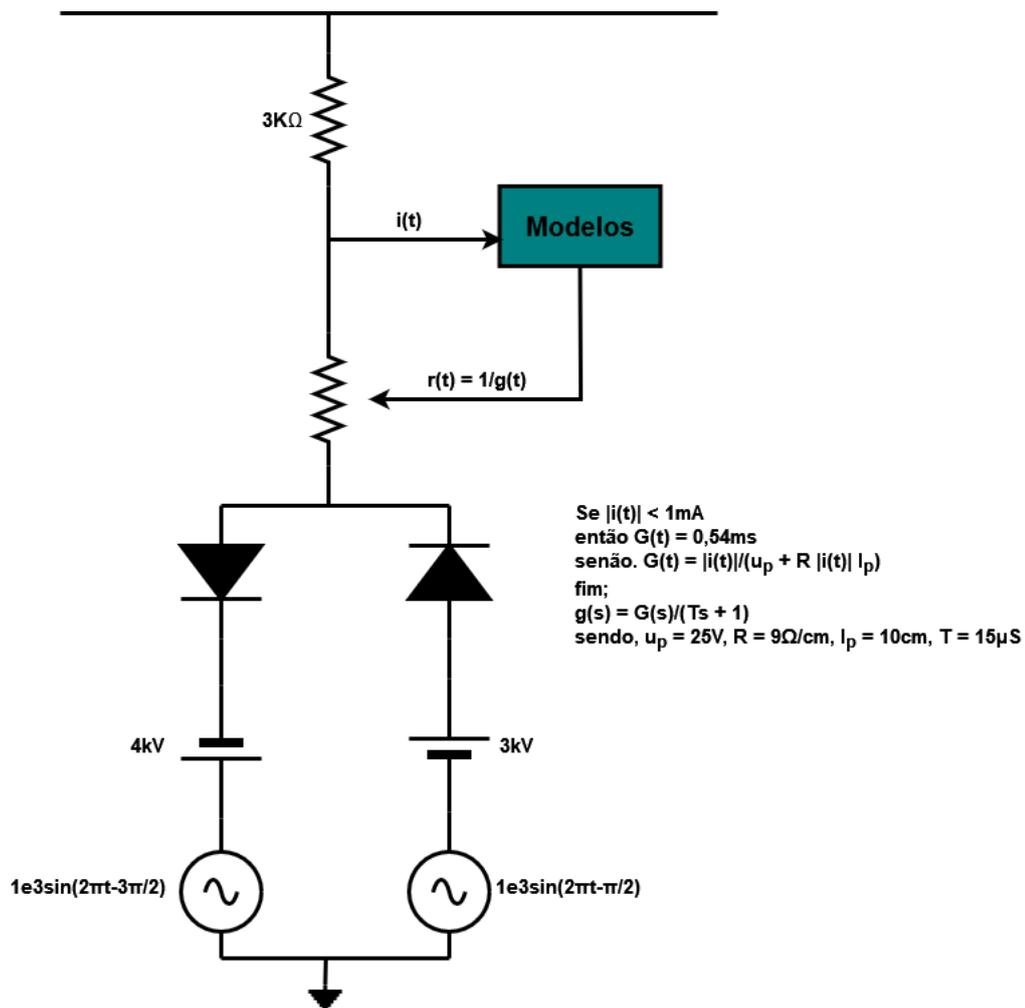
Fonte: Adaptado de [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#)

Os métodos elétricos são onde se encontram a maioria dos estudos e esforços para se desenvolver uma solução viável a se detectar as FAIs de modo consistente. Conforme dito em [Ghaderi, III e Mohammadpour \(2017\)](#), os métodos elétricos de detecção das FAIs podem ser segmentados em etapas conforme intensidade de tratamento dos sinais medidos, já que os métodos convencionais não conseguem extrair características necessárias para identificar o evento. A cada etapa, aumenta-se a complexidade e demanda de poder computacional. Organizam-se as etapas ascendendo o nível de complexidade conforme a sumarização descrita a seguir: métodos de medição, métodos de análise de domínio, métodos de análise de espectros e métodos classificadores.

#### 1.2.4.1 Métodos de medição

Inicialmente, estes métodos são definidos como métodos que, através da medição de alguma grandeza da rede (corrente, tensão, fluxo magnético, etc.) consegue-se identificar alguma alteração no comportamento padrão da rede. Em métodos que utilizam a medição da corrente, aliando a medição à análise do espectro da frequência, consegue-se identificar quais componentes em frequência podem caracterizar uma FAI. Porém, há elementos nas redes que podem atuar como filtros (transformadores que podem ter efeito secundário de

Figura 10 – Modelo proposto por Machalik et al. (2005)



Fonte: Adaptado de [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#)

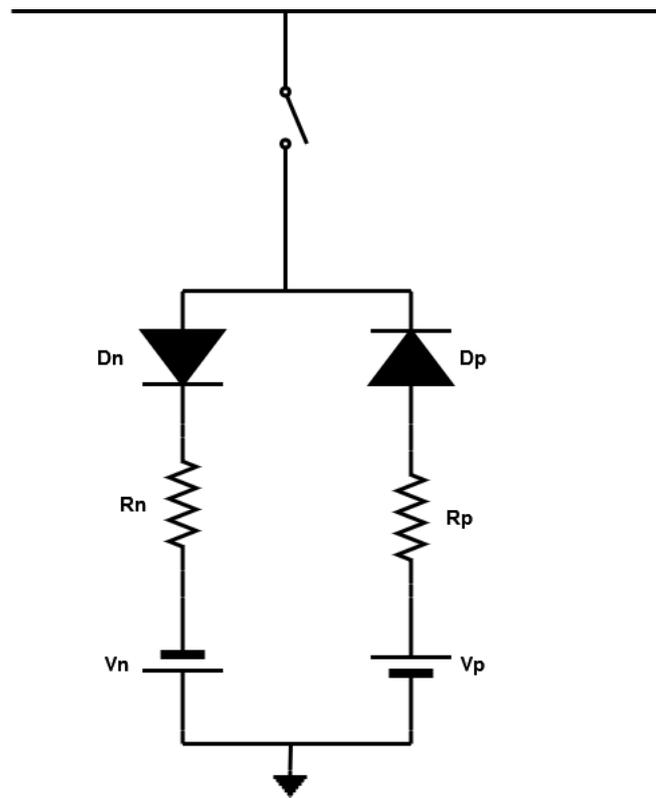
um filtro passa baixa) que podem atenuar os sinais necessários para detecção. Em [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#), o algoritmo de retransmissão proporcional (do inglês, *Proportional relaying algorithm*) é um exemplo de método que se utiliza da medição de corrente para melhorar a sensibilidade do relé de segurança em sistemas multi-aterrados.

Métodos que medem a tensão tem baixa viabilidade em detecção de FAIs, visto que a natureza desta falta implica em pouco ou nenhum distúrbio na magnitude das tensões. Porém, ao combinar métodos de medição de tensão e corrente há uma melhora na detecção de FAIs. Porém, também há aumento de custo, manutenção e operacionalidade devido ao aumento de dispositivos responsáveis por medir e transmitir dados.

#### 1.2.4.2 Métodos de análise de domínio

Quando se deseja identificar características mais intrínsecas, os métodos de análise de espectro são empregados como um passo a mais de complexidade de análise dos sinais. Através da mensuração e armazenamento dos dados coletados, é possível expor estes dados

Figura 11 – Modelo proposto por Lai (2006)



Fonte: Adaptado de [Mishra e Panigrahi \(2019\)](#)

a decomposições em diferentes espectros com objetivo de identificar padrões para sinais oriundos do mesmo evento.

Como é característico das FAIs terem pouca variação na magnitude do sinal da corrente, decompor os sinais medidos em diversos domínios com a utilização de ferramentas matemáticas é necessário para identificar outros comportamentos que podem conseguir identificar este evento. As características mencionadas na [subseção 1.2.1](#) são algumas das características de identificação que podem ser encontradas ao avaliar se sinais são provenientes de uma FAI ou não.

Os sinais são decompostos nos seguintes domínios: domínio do tempo contínuo, domínio escala de tempo, domínio da frequência e domínio em tempo-frequência. Aliado a decomposição do sinal, é importante o tratamento de dados, pois decidir qual ferramenta para a decomposição, quais dados utilizados, reduz a memória e capacidade computacional necessária para o funcionamento. Portanto, o uso de classificadores é necessário para se definir o conjunto de dados que serão utilizados. Na sequência, estes domínios são descritos.

**Domínio do tempo:** A decomposição em tempo contínuo extrai as componentes temporais da forma de onda desejada. Através destas componentes, identificam-se as irregularidades do sinal no tempo. Para a detecção de FAIs, ao utilizar os sinais primários (magnitude, valor eficaz, média, etc.) no domínio do tempo, há poucas informações para

identificar a falta. Portanto, deve-se combinar com outras ferramentas a fim de obter algum resultado satisfatório. Por exemplo, em [Oliveira et al. \(2022\)](#) utiliza-se uma rede de transmissão, onde os métodos de comunicação via cabeamento está implementado (do inglês, *Power line communication* ou PLC), através dos pulsos e da frequência de comunicação, utiliza-se o método de reflectometria no domínio do tempo para identificar a ocorrência de FAI na rede.

**Domínio na escala de tempo:** Os métodos no domínio da escala de tempo extraem informações em frequência em uma janela de tempo. Na transformada de Fourier, transporta-se um sinal que está no domínio do tempo para o domínio da frequência, perdendo a informação sobre a localização do tempo do sinal. Já na transformada wavelet, transformada mais utilizada neste domínio, transporta uma porção do sinal em determinado instante de tempo, e analisa seu espectro em frequência. A partir deste instante determinado, a variação temporal do sinal selecionado é chamado de janela de tempo. O tamanho desta janela implica inversamente na resolução da frequência, ou seja, quanto maior a janela de tempo, menor a resolução em frequência do sinal. Este domínio é o mais empregado nos métodos de detecção de FAI segundo [Ghaderi, III e Mohammadpour \(2017\)](#), 40% dos trabalhos publicados utilizam-se de técnicas que extraem características dos sinais, o domínio de escala de tempo. No trabalho de [Gomes, Ozansoy e Ulhaq \(2018\)](#), utiliza-se a transformada wavelet para extrair as componentes de alta frequência do sinal da corrente para treinar um classificador capaz de distinguir o instante de ocorrência de uma FAI. No entanto, ao decompor sinais utilizando este domínio, deve-se considerar o tamanho da janela de tempo, sendo importante dispor de uma boa resolução em frequência e escolher bem a onda portadora, pois esta será a onda na qual o sinal será decomposto para extrair seu comportamento de forma competente.

**Domínio da frequência:** A análise no domínio da frequência apresenta vantagens em termos de análise de FAIs, uma vez que uma das características que se destaca durante a ocorrência, sobretudo devido à re-ignição de arcos elétricos, são componentes de baixa e alta frequência. No trabalho de [Lima et al. \(2018\)](#), através da STFT (Transformada de Fourier de curto termo do inglês, *Short-time Fourier transform*) pretende identificar a 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> harmônica do sinal da corrente já que estas componentes têm maior predominância ao ocorrer uma FAI. O problema de se utilizar informações oriundas apenas do domínio da frequência é que existem componentes em frequência que se assemelham entre FAIs e eventos distintos da rede como chaveamento de cargas, manipulação de banco de capacitores, entre outros. Então, como estes eventos tem assinaturas em frequência parecidas, necessita-se da capacidade temporal para distingui-los.

**Domínio em tempo-frequência:** De modo a superar as desvantagens de utilizar apenas o domínio de tempo ou frequência e evitar as desvantagens do domínio na escala de

tempo, diversos trabalhos utilizam-se de métodos diferentes para adquirir características de um sinal ponto a ponto, em tempo e frequência. Contudo, ao se trabalhar em ambos espectros, há necessidade de um poder computacional consideravelmente maior que nos outros domínios. No trabalho [Biswal et al. \(2021\)](#), utiliza-se a decomposição intrínseca em tempo-frequência que equilibra as informações extraídas em frequência estimando a informação temporal do sinal via uma janela temporal. Esta técnica é utilizada para sinais não estacionários e não lineares e funciona decompondo o sinal em várias funções referentes às componentes de cada frequência encontradas no sinal ao longo de uma janela de tempo.

#### 1.2.4.3 Métodos classificadores

Após a decomposição dos sinais, necessita-se de uma classificação entre quais padrões são capazes de identificar a situação na qual a rede se encontra. Para isso, métodos classificadores são utilizados para realizar um tratamento de dados para excluir dados não necessários. Os métodos classificadores podem ser divididos em:

**Classificador simples:** Classifica-se apenas se houve ou não uma FAI na rede. Estes classificadores mais simples ignoram outros tipos de eventos que podem ocorrer na rede e que tenham características similares a uma FAI.

**Classificador com contagem:** Para evitar a desvantagem de um classificador simples, realiza-se uma contagem durante as medições dos sinais da rede. Caso esta contagem chegue a um limiar, considera este evento como uma FAI. Porém, o sistema necessita de mais memória para armazenamento das informações e, pode também ocorrer em falsos positivos dependendo da duração do evento.

**Métodos de decisão computacional:** Métodos de decisão computacional tem capacidade de encontrar padrões de forma mais eficaz que classificadores matemáticos ou empíricos. Por isto, empregar algoritmos de decisão computacional após a decomposição do sinal tem capacidade de diferenciar os eventos de forma mais minuciosa de acordo com o algoritmo empregado. No trabalho [Gomes, Ozansoy e Ulhaq \(2018\)](#), utilizam-se quatro métodos de decisão computacional para se agrupar eventos de falta e de manipulação dos sinais medidos da rede.

#### 1.2.5 Componentes simétricas e de sequência zero

Em um sistema polifásico, é importante analisar os fasores de modo a se mensurar o estado do balanceamento do consumo de potência. Um fasor é a representação de uma função senoidal invariante no tempo em forma de vetor destacando sua amplitude,

frequência angular e fase. Utilizando do teorema de Fortescue, simplifica-se a análise de balanço entre as fases em um equilíbrio de  $360^\circ$  graus elétricos.

O teorema de Fortescue consiste em demonstrar que: dado um sistema polifásico de “ $N$ ” fases, é possível decompor este sistema em “ $N$ ” sistemas monofásicos equilibrados, onde cada sistema apresenta comportamento linear. Em um sistema trifásico, decompõe-se o sinal em três conjuntos denominados de sequência positiva, negativa e zero.

As componentes de sequência positiva representam as condições de operação nominais e a sequência das fases com a mesma disposição do sistema original. As condições de operação são iguais à situação em que o sistema se encontrasse totalmente equilibrado em regime permanente, ou seja, com os fasores em magnitudes iguais, defasados em  $120^\circ$  graus elétricos entre eles. As componentes de sequência negativa representam parte do desequilíbrio do sistema que se opõe ao equilíbrio em regime permanente. Assim como as componentes de sequência positiva, os fasores são iguais em magnitudes, dispostos em  $120^\circ$  entre si de modo que as fases estejam dispostas em sequência contrária a do sistema original. Por fim, as componentes de sequência zero possuem mesma magnitude e estão todas em fase. Estas componentes estão geralmente associadas aos desequilíbrios relacionados ao neutro ou à terra.

Conforme o trabalho de [Fernandes et al. \(2021\)](#), ao aplicar o teorema de Fortescue em uma rede trifásica equilibrada, teremos apenas componentes de sequência positiva. Assim, quando surgem desequilíbrios no sistema, surgem componentes negativas e de sequência zero. Através da relação entre as componentes de sequência negativa e zero em relação às componentes de sequência positiva, há detecção de faltas ou eventos na rede.

### 1.2.6 Algoritmo de detecção utilizado

A técnica desenvolvida por [Batista et al. \(2022\)](#) foi o método de detecção utilizado neste trabalho por apresentar resultados de simulação satisfatórios e conter flexibilidade e simplicidade para a adequação do algoritmo de alocação de sensores. Além disso, a mensuração do sinal da corrente é amplamente utilizada por diversos sistemas de proteção, podendo operar o algoritmo de detecção de FAI em paralelo com outros, sendo a medição das correntes, uma das principais abordagens na literatura para os algoritmos para detecção de FAI e/ou aplicações que necessitam avaliar o comportamento da rede de distribuição. A técnica de detecção é baseada em duas etapas: primeiro, na defasagem angular entre as correntes de linha, onde, em uma rede trifásica levemente balanceada (com a defasagem entre as fases por volta de  $120^\circ$ ), ao se extinguir a corrente em uma das fases, as duas fases adjacentes tendem a se defasar em  $180^\circ$  graus. Combinado à análise fasorial, monitoram-se as componentes de sequência zero das correntes, para observar a variação que se enquadra em um distúrbio que se aproxima do comportamento de uma FAI. A análise de sequência zero consegue prolongar a distância de detecção entre a falha

e o sensor, permitindo assim, contornar o problema da atenuação do sinal propagado pela rede. O método se mostrou robusto, conseguindo detectar mesmo com o acoplamento e desacoplamento de cargas na rede, e também, em redes onde há desbalanceamento de carga entre as fases.

Para trabalhar em conjunto com o método de detecção de FAI, considera-se que sensores embarcados com o algoritmo de detecção serão distribuídos pela rede de forma estimada e em pontos definidos heurísticamente. Esta disposição de sensores serve como ponto inicial para o desenvolvimento de um algoritmo que, através das respostas das simulações, sinaliza quais os sensores, dentre os dispostos inicialmente, são necessários para proteger a rede contra FAI eficientemente, ou seja, reduzindo o número de sensores redundantes e verificando se a proteção atua na rede na sua totalidade (ou que proteja a maior proteção de rede possível, nos piores casos).

### 1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi definido como: “desenvolver um algoritmo para alocação ótima de sensores para redes de distribuição para atuar a partir da resposta das simulações de algoritmo responsável pela detecção de FAIs”. A partir deste objetivo principal, objetivos menores foram definidos a fim de realizar o desenvolvimento do trabalho. Primeiro, através da adaptação do trabalho apresentado por [Batista et al. \(2022\)](#), implementou em ambiente de simulação, o algoritmo de análise fasorial e análise de componentes simétricas, sendo este o algoritmo de detecção de FAIs utilizado.

Após a implementação, foi definida a rede a ser simulada. Nesta rede, definiram-se pontos de pré-alocação de sensores. Assim, foi desenvolvido um ambiente de simulação para obter as respostas dos sensores pré-alocados e alimentou um banco de dados criado para ser um parâmetro do algoritmo genético. O desenvolvimento do algoritmo genético foi a próxima etapa, onde a análise bibliográfica e o desenvolvimento do código foram executados. Por fim, o algoritmo de alocação foi sintonizado para encontrar as melhores respostas e, após a sintonização, foram realizadas várias execuções para as respostas otimizadas desejadas, verificando a viabilidade do trabalho desenvolvido.

### 1.4 Publicações

Durante o desenvolvimento deste trabalho, algumas contribuições científicas foram publicadas em congressos nacionais. No trabalho [Araujo et al. \(2023\)](#), publicado no congresso INDUSCON 2023, foi desenvolvida uma abordagem semelhante a apresentada neste trabalho, porém fazendo a análise da rede via grafos, utilizando o método de detecção de FAIs proposto em [Batista et al. \(2022\)](#). Em [Souza et al. \(2023\)](#), publicado no

congresso COBEP/SPEC 2023, foi publicado um artigo em uma versão mais rudimentar deste trabalho, porem com as mesmas diretrizes e com alguns resultados já obtidos.

## 1.5 Estrutura do trabalho

No [Capítulo 1](#) foi apresentado a motivação, uma revisão sobre o problema encontrado (a não detecção de faltas de alta impedância) e os objetivos do trabalho. No [Capítulo 2](#), uma revisão sobre os algoritmos de otimização é apresentada, com enfoque no tipo de algoritmo utilizado neste trabalho, o algoritmo genético. O [Capítulo 3](#) apresentou o desenvolvimento do algoritmo principal deste trabalho, o AG2AS, demonstrado como foi definida cada um de suas funções. No [Capítulo 4](#) foram demonstradas as etapas de sintonização do AG2AS, para otimizar as respostas obtidas, e a etapa de resultados da alocação, após a sintonização do algoritmo. Por fim, no [Capítulo 4.3](#) foram apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho e as sugestões para melhorias futuras.

## 2 Algoritmos de otimização

Com o avanço tecnológico, a computação tornou-se uma grande aliada na resolução de problemas. Utilizando-se da capacidade de conseguir realizar várias operações matemáticas por segundo, a resolução de problemas lineares foi sendo transportada para os computadores. Porém, a medida em que novos problemas surgiam, tornavam-se cada vez mais complexos e demandavam cada vez mais capacidade computacional. Problemas não-lineares (cuja resolução não tem correlação linear com as variáveis) e multiobjetivos foram grandes desafios para a computação, pois solucionar estas questões de forma eficiente é um problema de grande dificuldade e, quando se consegue encontrar uma boa solução, fortalece o uso desta ferramenta. Sendo assim, novos tipos de resoluções que englobassem a resolução destes sistemas de forma rápida e precisa foram necessários. Desta demanda, derivou-se uma área dentro da computação chamada de *Computação Natural* (BRABAZON; O'NEILL; MCGARRAGHY, 2015). Nela, através da observação da natureza e seus sistemas complexos, desenvolveram-se algoritmos que replicam os comportamentos observados em ambiente computacional, tendo como objetivo desenvolver ferramentas mais eficientes (que sejam mais rápidos e com menor necessidade de poder computacional) de resolução para sistemas complexos. Computação evolucionária, social, gramatical, neurocomputação e imunocomputação são subdivisões dentro da computação natural que categorizam os algoritmos conforme sua inspiração e método para resolução de problemas.

A computação evolucionária se baseia na teoria de seleção e evolução natural de Charles Darwin e Alfred Wallace (DARWIN; WALLACE et al., 1958; DARWIN, 2003) que constatou que, em uma sociedade, os indivíduos mais adaptados ao ambiente a tendem sobreviver por mais tempo por serem menos suscetíveis aos reveses do ambiente. Como consequência, estes indivíduos têm maior probabilidade de atingirem maturidade sexual e se reproduzir, transmitindo seus genes para das gerações posteriores e, com isso, perpetuando estes genes que permitem maior adaptabilidade na população, fazendo com que aquela sociedade se torne mais bem próspera (ou extinta, caso os genes não favoreçam a existência desta sociedade) (BRABAZON; O'NEILL; MCGARRAGHY, 2015).

A partir do desenvolvimento desta área, vários algoritmos que seguem essa premissa se desenvolveram, como o utilizado neste trabalho, o algoritmo genético. O algoritmo genético é um tipo de algoritmo iterativo que, junto à estratégia evolucionária, programação evolucionária e evolução diferencial, como descrito em Barcellos (2000) e Brabazon, O'Neill e McGarraghy (2015), são exemplos de algoritmos mais utilizados que foram desenvolvidos com base na computação evolucionária. Por se basearem na mesma premissa, muitas vezes os conceitos e métodos se misturam a ponto de não ser possível distinguir

de qual algoritmo aquele método se baseou, sendo, muitas vezes, definidos como base nas referências do trabalho a se desenvolver.

## 2.1 Algoritmo genético

O algoritmo genético é utilizado devido a sua capacidade de adaptação à maioria dos problemas, como descrito em [Filho e Poppi \(1999\)](#) e [Torquato \(2017\)](#). O algoritmo genético apresenta as seguintes vantagens em relação á outros algoritmos:

- Não depende do gradiente do problema;
- Mínimos locais não diminuem a efetividade do algoritmo;
- Baseiam na solução através dos problemas, não através da otimização;
- Utiliza-se transições probabilísticas, não determinísticas;

Um algoritmo genético é composto por: indivíduo, população, operadores genéticos e função objetivo ([SILVEIRA; BARONE, 1998](#)). Cada um destes itens faz analogia a um conjunto de indivíduos que vive em um ambiente hostil, prezando pela sobrevivência da espécie.

Cada indivíduo da população é uma possível solução do problema, assim como no ambiente natural, cada indivíduo apresenta uma adaptação ao ambiente única, pode ser boa ou ruim. A população é o conjunto de indivíduos, portanto a população se torna o conjunto de soluções a ser analisado.

A função objetivo calcula o desempenho do indivíduo baseada no objetivo que se deseja alcançar. Ela indica qualitativamente a adaptação do indivíduo ao ambiente. Normalmente, a função objetivo é definida heurísticamente, podendo ser multi-objetivo, a depender da interação do indivíduo com as variáveis do ambiente.

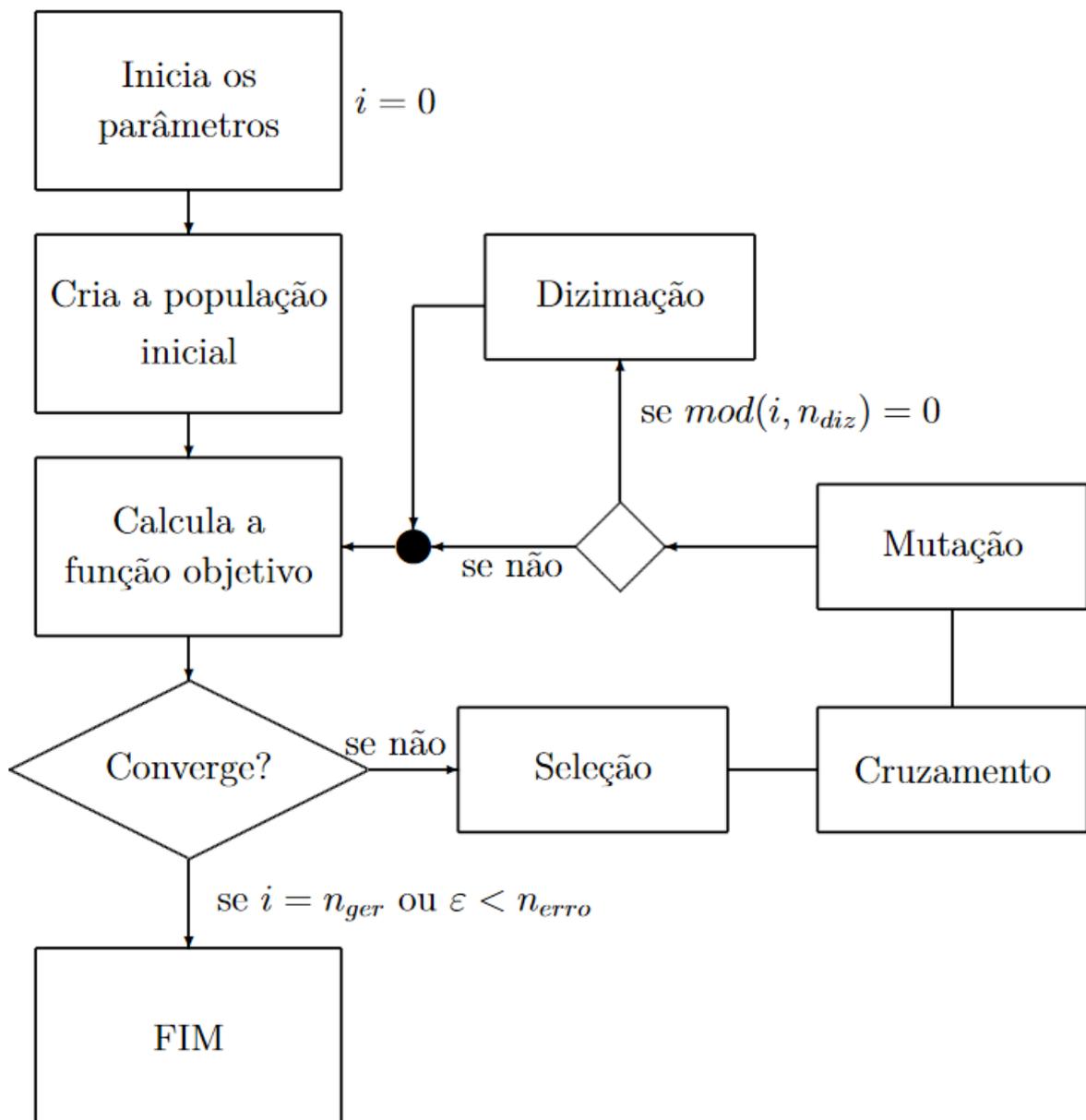
Enfim, os operadores genéticos emulam a etapa de reprodução sexual vista dos indivíduos biológicos. Podem ser definidos como o conjunto de estratégias definidas pelo programador para que a população evolua buscando encontrar a melhor solução através do resultado da função objetivo de cada indivíduo.

Considerando os parágrafos acima, exemplifica-se o fluxograma da execução de um algoritmo genético na [Figura 12](#) e textualmente conforme a descrição de John H. Holland ([BARCELLOS, 2000](#)):

1. Inicie uma população com valores aleatórios;
2. Defina quais são os melhores e piores indivíduos através da função objetivo;

3. Selecione os indivíduos que irão mesclar seus materiais genético para a nova população;
4. Elimine a antiga população substituindo pelos novos indivíduos fruto da reprodução da antiga população;
5. Se algum dos critérios de parada forem acionados, extrai-se a resposta. Se não, repita o passo 2.

Figura 12 – Fluxograma de funcionamento de um algoritmo genético

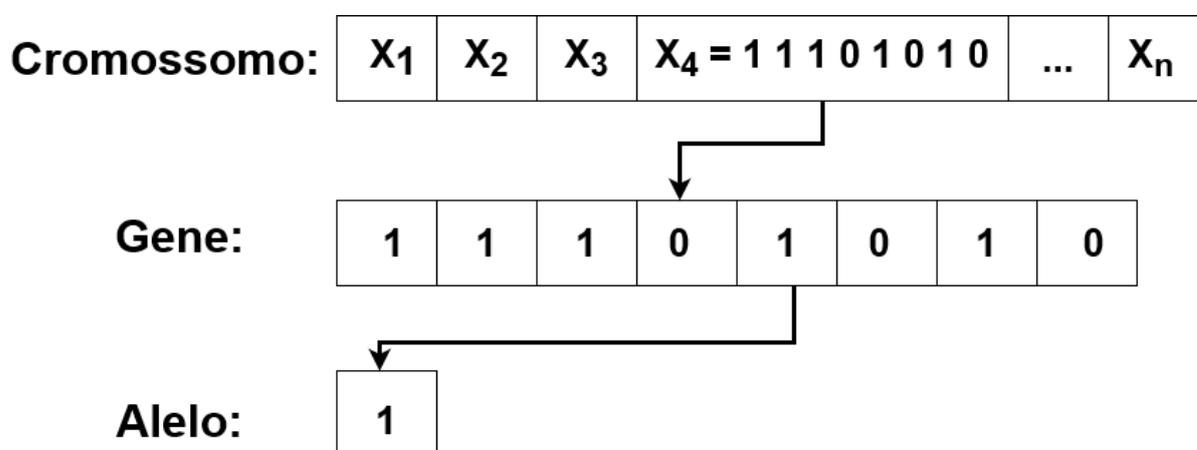


Fonte: Colherinhas (2016)

Cada indivíduo possui uma codificação, semelhante a um ser biológico que possui o "DNA", sendo uma sequência de caracteres codificada de forma a demonstrar alguma

característica específica, no caso do algoritmo genético, a sequência de codificação é a representação de uma possível solução do problema. Como já mencionado, iniciar uma população é o primeiro passo para o funcionamento de um algoritmo genético, portanto, é necessário saber como representar os indivíduos para que se consiga percorrer todas as possibilidades de solução de um problema durante a execução do algoritmo. Em alguns casos, pode-se determinar quais soluções não devem ser consideradas, restringindo o número total de possibilidades de solução do problema, e por consequência, melhorando a velocidade do algoritmo. Na [Figura 13](#) demonstra-se a codificação de um indivíduo e suas subdivisões.

Figura 13 – Componentes de um cromossomo de um indivíduo



Fonte: Adaptado de [Colherinhas \(2016\)](#)

Após a determinação da codificação do indivíduo (que podemos chamar de cromossomo), é necessário medir o seu desempenho em relação ao problema proposto. Para isto, utilizamos a função objetivo. Esta função é, usualmente, definida heurísticamente, utilizando como referência o problema e a qualidade da solução apresentada pelo indivíduo, de modo a realçar os indivíduos que tenham características que apresentam uma solução viável do problema. Como em um algoritmo genético, todo indivíduo é uma provável solução, o desempenho deles são classificados conforme o resultado da função objetivo, sendo ela o parâmetro utilizado para direcionar as estratégias dos operadores genéticos cujo objetivo é encaminhar as próximas populações a regiões mais próximas das regiões onde se encontram os melhores resultados.

Os operadores genéticos são os responsáveis por selecionar os pais, combinar os cromossomos dos pais e mutar os cromossomos dos indivíduos da nova população. Cada nova população é denominada uma nova geração. O operador genético responsável por selecionar indivíduos a reproduzir é denominado “*seleção*”. Nesta etapa do algoritmo, define-se uma quantidade e escolhem-se indivíduos com base no seu desempenho para combinar os cromossomos e por consequência, gerar novos indivíduos que farão parte da geração posterior. Os indivíduos escolhidos chamam-se pais. Pode-se escolher dois

(CHAN; BAI; HE, 2018) ou mais (ARRAM; AYOB, 2019) indivíduos para realizar a combinação. No trabalho de (COLHERINHAS, 2016) são demonstrados os principais métodos utilizados:

- **Elitismo:** Classificando os indivíduos em relação à função objetivo, elimina-se uma determinada parcela de indivíduos que apresentam baixo desempenho em relação à função objetivo. O restante são combinados entre si. Dessa forma, apenas uma fração da população transmite os genes. O problema deste método consiste em diminuir a variabilidade genética dos indivíduos, caso houver uma exclusão muito agressiva. Este revés pode resultar em uma rápida convergência com baixa procura de soluções, podendo encaminhar o algoritmo para um ótimo local, apresentando uma resposta de baixa qualidade;
- **Roleta:** Calcula-se a proporção da função objetivo de cada indivíduo em relação à soma de todos os outros. Quanto melhor o desempenho da função objetivo do indivíduo, maior a proporção. Realiza-se então, sorteios mapeando a área de cada indivíduo em relação à proporção. Espera-se que, os indivíduos que tenham maior valor de adaptabilidade tenham mais chances de serem selecionados, porém, ainda há possibilidade de indivíduos com pior desempenho consigam combinar seus genes, favorecendo a variabilidade genética;
- **Torneio:** Primeiramente, define-se um fator de seleção. Então, sorteia-se e seleciona uma pequena quantidade de indivíduos e os classificam conforme a função objetivo. Gera-se um número aleatório e compara-o com o fator de seleção e seguem-se as seguintes regras: se o número gerado for maior que o fator de seleção, o indivíduo mais adaptado é selecionado. Se for menor, o menos adaptado é selecionado. Com este método de seleção, combina-se aleatoriamente todos os indivíduos, podendo ou não beneficiar os mais bem adaptados. Através do fator de seleção, é possível controlar a convergência do algoritmo (que não pode ser prematura) e a variabilidade genética;

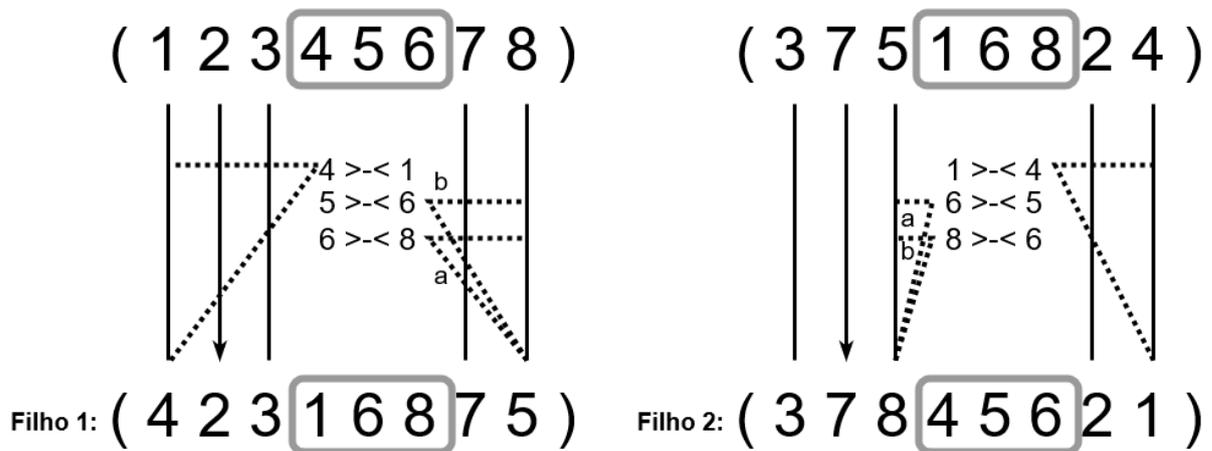
O próximo operador genético dentro do algoritmo genético, define o tipo de cruzamento que será realizado entre os indivíduos. Este operador é chamado de cruzamento (do inglês, “*crossover*”) e é definido conforme o tipo de codificação dos cromossomos, pois dependendo da complexidade da codificação, apenas trocas entre alelos podem acabar limitando a variabilidade genética das próximas gerações. No trabalho de Mirjalili et al. (2020) são apresentados vários métodos de cruzamento, mas destacam-se os seguintes métodos:

- **Ponto único:** os cromossomos dos pais são quebrados no mesmo ponto e as partes resultantes são recombinadas (a parte “1” do pai é combinado com a parte “2” da mãe

e vice-versa), gerando assim dois novos indivíduos;

- **Multi ponto:** similar ao método de ponto único, os cromossomos são quebrados em múltiplos pontos e recombinados entre si;
- **Uniforme:** seleciona uma posição aleatória e se intercambia os alelos entre os cromossomos dos pais. Pode ocorrer em uma ou mais posições. É utilizada quando o cromossomo não pode ser segmentado por haver relação entre os genes vizinhos (KATOCH; CHAUHAN; KUMAR, 2021);
- **Parcialmente Combinado (PMX):** Recorta-se o cromossomo dos pais entre dois pontos aleatórios definidos. Esse recorte serão copiados aos filhos. Então, correlaciona cada gene entre esse mapeamento. Os genes restantes, um dos filhos herdará de um dois pais, como ocorreria em um multi ponto de dois pontos de quebra. Porém, após copiados, através do primeiro recorte, os genes que estão na mesma posição dentro do recorte são correlacionados. Então, observa-se nos alelos copiados fora do recorte, quais estão dentro do mapeamento e, estes alelos assumem os valores iguais ao de mesma posição dentro do recorte do outro cromossomo. Na Figura 14 demonstra-se este tipo de cruzamento;

Figura 14 – Exemplo de um operador de cruzamento PMX



Fonte: Adaptado de Katoch, Chauhan e Kumar (2021)

O fator de cruzamento refere-se a probabilidade do conjunto de pais atual reproduzirem e gerar novos indivíduos. Quanto maior o fator de cruzamento, mais pais irão passar pelo operador cruzamento e misturar seus cromossomos. Quanto menor, mais pais irão apenas copiar seus cromossomos, fazendo com que os filhos sejam cópias idênticas dos pais, diminuindo a capacidade de procura de soluções do algoritmo, mas favorecendo a convergência.

O último operador genético em um algoritmo genético é a mutação. O operador mutação modifica partes do cromossomo dos novos indivíduos antes que eles sejam integrados na nova geração. Esse operador tem como intuito explorar possibilidades nas quais o operador cruzamento é limitado pelo cromossomo dos indivíduos pais e ajuda a evitar que o algoritmo caia em ótimo local (KATOCH; CHAUHAN; KUMAR, 2021). Modificando parte do cromossomo de maneira aleatória faz com que aumente a variabilidade genética dos indivíduos, podendo descobrir características úteis à resolução do algoritmo. Porém, como se trata de modificar os cromossomos de forma aleatória e sem distinção, grandes probabilidades de mutação, impossibilitando a convergência do algoritmo a uma resposta considerada ótima. Portanto, a mutação deve ter baixa prevalência de modo a não impedir a convergência do algoritmo, porém permitindo a exploração do espaço de buscas.

Os tipos de mutações mais comuns, conforme descrito em Colherinhas (2016) e Katoch, Chauhan e Kumar (2021), são: **Mutação binária:** em um cromossomo codificado binariamente, modifica-se um gene/alelo aleatório do cromossomo do novo indivíduo pela sua contraparte (se o alelo for 0, transforma em 1 e vice-versa); **Mutação de inversão simples:** seleciona dois genes/alelos aleatórios e inverte suas posições dentro do cromossomo; **Mutação uniforme:** seleciona um número aleatório de alelos/genes e, através de um limite inferior e superior (estes limites relacionados a limitação do problema), se realiza sorteio aleatório para definir o novo valor.

Após todas as determinações e dimensionamento de cada operador genético, respeitando as restrições de cada problema, a realização de um algoritmo genético se torna possível. Com isso, definem-se os critérios de parada do algoritmo. A resposta de um algoritmo genético não implica em obter a melhor resposta, e sim, uma resposta que satisfaça os requisitos do projeto requerido. Por se tratar de uma busca aleatória sobre todo o espaço de buscas de um determinado problema, um mesmo algoritmo pode entregar respostas diferentes se executado diversas vezes, pois estas respostas se cumprirem os requisitos definidos, pode ser definida como uma resposta ótima.

## 3 Desenvolvimento do algoritmo para alocação de sensores

Neste capítulo apresenta-se detalhadamente o desenvolvimento e sintonização do algoritmo genético para o método de alocação dos sensores proposto nesse trabalho. O objetivo desta etapa é encontrar uma solução que torne viável economicamente a implementação da proposta de detecção e atuação na FAI. A atuação do algoritmo foi testada utilizando a rede IEEE 34, porém pode-se adaptar o trabalho para se executar em outras redes. Os resultados foram publicados no congresso COBEP 2023 (SOUZA et al., 2023).

### 3.1 Algoritmo de alocação de sensores de corrente em uma rede de distribuição (AG2AS)

No algoritmo de alocação de sensores, é necessário previamente, distribuir na rede pontos de possíveis alocações de sensores para que, via simulações da rede, o algoritmo consiga identificar qual combinação de sensores tem a melhor capacidade de proteção. Juntamente com os resultados das simulações, um algoritmo de decisão computacional foi utilizado para a identificação dos melhores cenários. O algoritmo de decisão selecionado foi o algoritmo genético. A nomenclatura para este algoritmo será AG2AS.

Após decisão de pontos de pré-alocação, cada ponto representará um sensor. Então, se mapeará as posições previamente e uma cadeia de números com o tamanho da quantidade de posições será utilizada para variar os cenários de simulação. Cada sensor possuirá uma binaridade de estados: sensor existente e sensor inexistente. Então, a cadeia de posições terá apenas valores entre 0 e 1, onde, “1” significa sensor presente e “0” sensor ausente. Assim, as possíveis soluções, portanto, os cromossomos do algoritmo genético serão codificados.

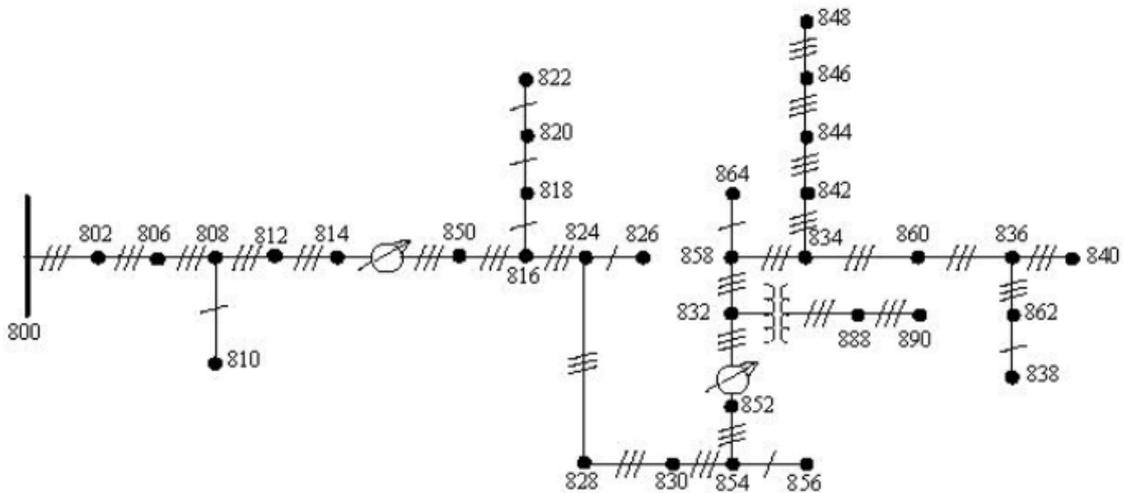
O ambiente de programação utilizado foi o software MATLAB. Ao se desenvolver o algoritmo, o código foi dividido em funções que compreendem cada etapa de funcionamento de um algoritmo genético conforme descrito na [seção 2.1](#) com objetivo de aumentar sua adaptabilidade e independência dos operadores genéticos, aumentando a facilidade de modificá-los sem redesenhar o código inteiro. Todas as funções são alimentadas por um algoritmo principal, no qual são definidos os parâmetros iniciais da simulação. Os parâmetros iniciais foram variados para observar a influência e eficácia de cada operador genético no resultado do algoritmo.

## 3.2 Simulação da rede no Simulink

Para fornecer o banco de dados para alimentar o algoritmo genético, a rede foi simulada no software Simulink que faz parte do ambiente de programação do MATLAB. Foram simuladas faltas em diversos pontos da rede de forma a criar cenários consistentes de detecção dos sensores. Com esta modularidade, o banco de dados pode ser criado externa ou paralelamente ao algoritmo genético, dividindo forças de trabalho em diversas máquinas, otimizando o trabalho computacional do hardware disponível.

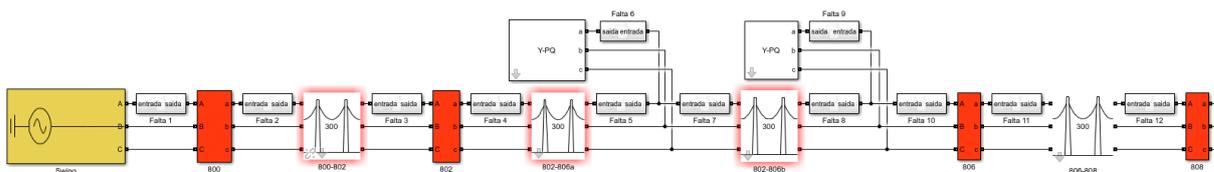
A rede escolhida para as simulações e treinamento do algoritmo foi a mesma utilizada em [Batista et al. \(2022\)](#), a rede IEEE 34. O diagrama unifilar da rede está representado na [Figura 15](#). Foram utilizadas diversas bibliotecas disponíveis na implementação da rede IEEE 34 dentro do software Simulink, fornecidas pela comunidade presente no fórum MathWorks. Precisamente foi utilizada, além das bibliotecas padrões disponíveis pelo Simulink, uma biblioteca chamada CTSlib para apresentar os blocos de transmissão de energia e cargas do sistema. Na [Figura 16](#) uma implementação parcial da rede.

Figura 15 – Diagrama unifilar da rede IEEE 34



Fonte: [Mwakabuta e Sekar \(2007\)](#)

Figura 16 – Implementação parcial da rede IEEE 34 no Simulink.

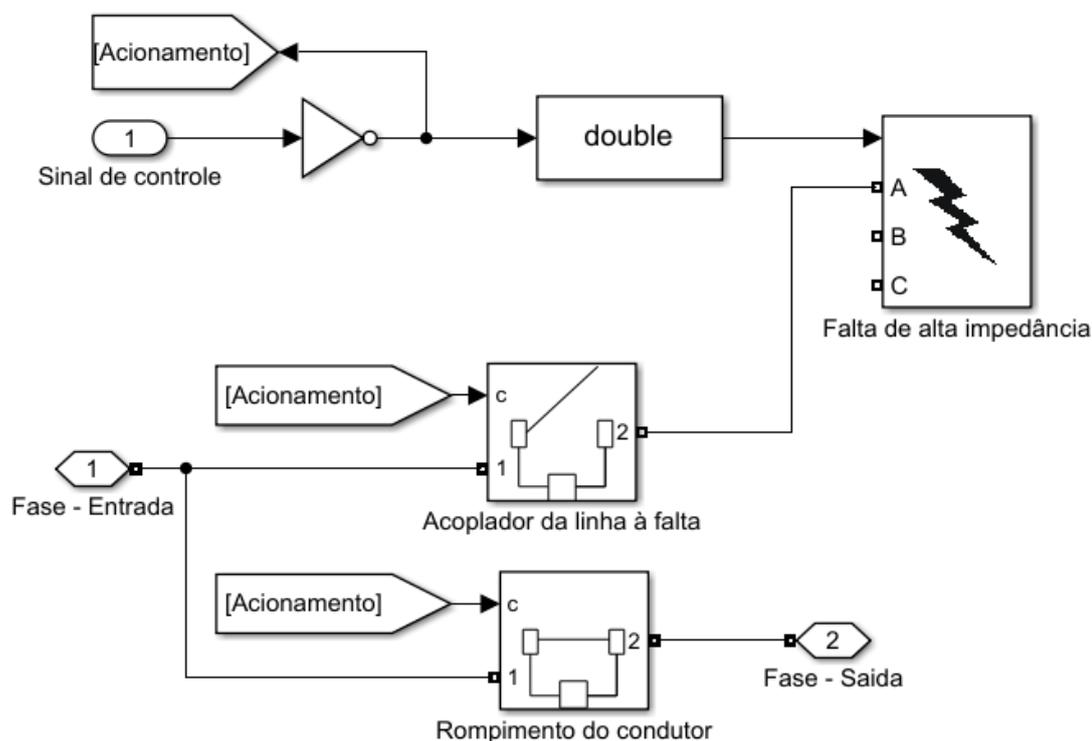


Fonte: Autoria própria

Para simular FAIs nesta rede, foi adaptado um sistema que consiste em um degrau como sinal de controle para uma chave desconectar um ramo da rede e conecta à terra e está representado na [Figura 17](#). Estas faltas foram adicionadas na entrada e saída de

cada elemento da rede. Nos ramos trifásicos, a fase A foi selecionada para se induzir a FAI enquanto nos ramos monofásicos não há escolha sendo induzida na fase disponível. Utilizando-se deste método, foram possíveis 176 localizações de faltas, que serão combinadas em até 2 pontos de faltas simultâneas para capturar seus resultados para a alimentação do banco de dados para o algoritmo genético.

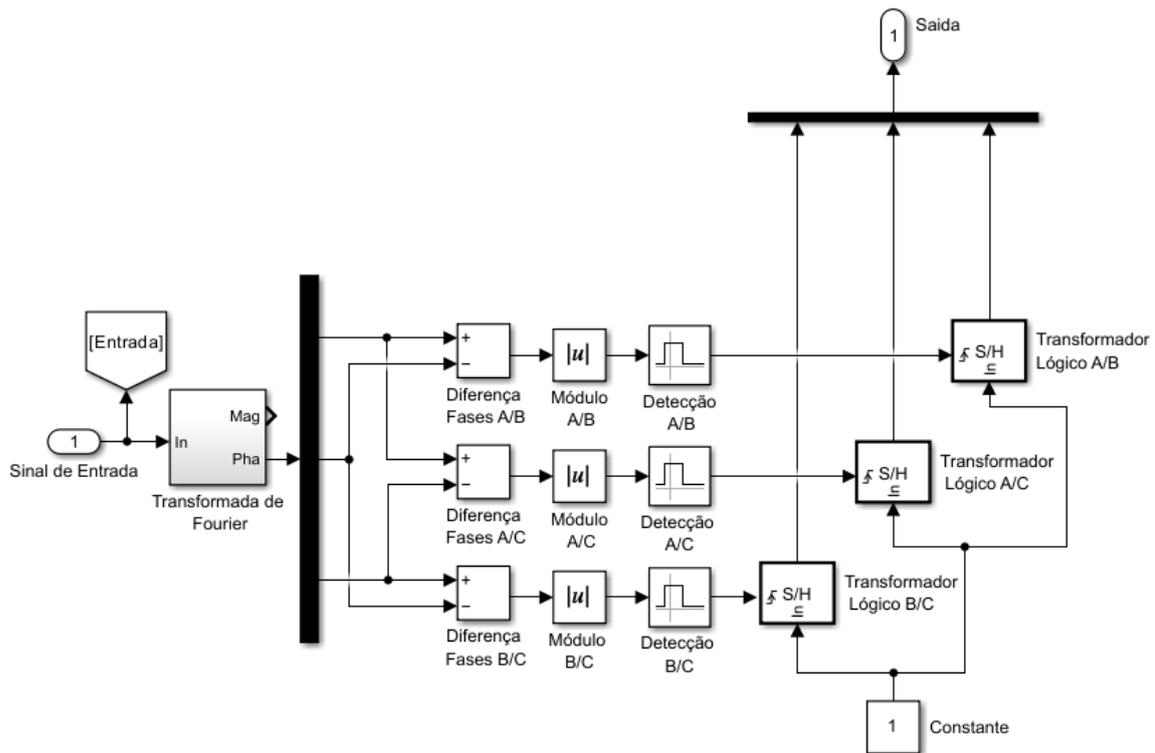
Figura 17 – Sistema para simular uma FAI.



Fonte: Autoria própria

Na [Figura 16](#) é demonstrada a implementação da rede no Simulink. Cada bloco vermelho é um conjunto de sensores que irão obter as características das tensões e correntes. Além deste, existem blocos que simulam redes de transmissão e blocos que simulam carga, conforme a concepção inicial da rede. Capturando os sinais e os tratando, através do algoritmo descrito na [seção 3.1](#), têm-se a resposta do sensor ao evento induzido. A implementação do algoritmo de detecção fasorial em blocos está demonstrado na [Figura 18](#) onde, se calculará a diferença de fase entre as correntes e, se houver uma variação nas fases que faça a diferença entre duas fases encontrar-se dentro dos limites estabelecidos (entre  $170^\circ$  e  $190^\circ$ ), sinalizará ao relé como uma falta de alta impedância e o atuará. Para o banco de dados, a diferença entre cada fase é calculada, e então, é enviada como um sinal lógico verdadeiro (1), se o limite está dentro dos estabelecidos, ou falso (0) se não está.

Figura 18 – Sistema para detectar a ocorrência de uma FAI no sistema via análise fasorial.

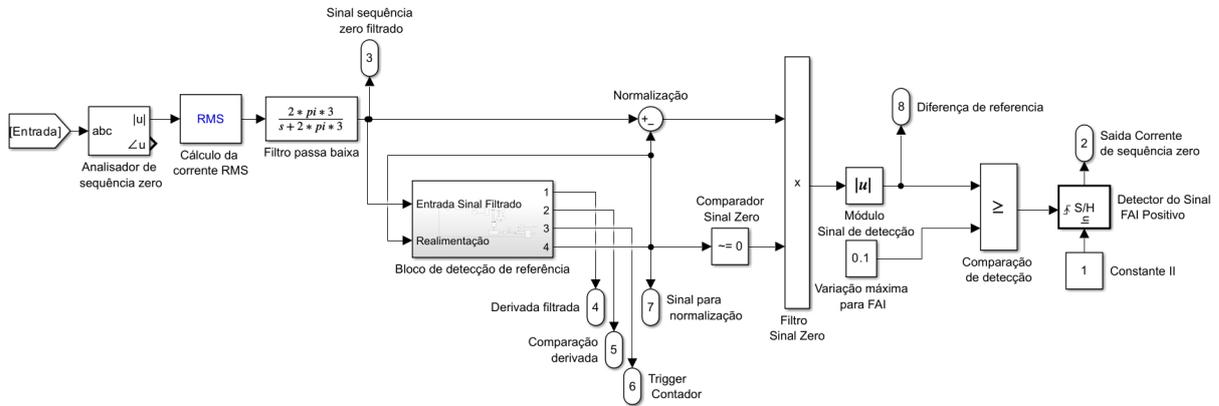


Fonte: Autoria própria

Nas figuras 19, 20 e 21, são apresentados os métodos de como a análise de referência do sinal de sequência zero é calculada e comparada com o sinal obtido em tempo real. Na Figura 19, recebe-se o sinal da rede, calcula-se o valor da corrente de sequência zero em tempo real, que é filtrado e alimenta, tanto o bloco de detecção de referência quando o bloco de comparação. Na Figura 20, está representado o bloco que se calcula a referência de estabilidade do sinal de corrente de sequência zero, chamado “Bloco de detecção de referência”. Através da derivada, calcula-se a variação do sinal de corrente de sequência zero. Caso esse sinal, tenha variação abaixo do valor do bloco chamado “variação máxima”, envia-se um sinal para iniciar a contagem no bloco de atraso, demonstrando na Figura 21. Dentro do bloco de atraso, inicia-se um contador de 200 milissegundos. Caso a variação do sinal se mantenha abaixo da variação máxima por um tempo maior que o determinado no contador, adota-se esse valor de corrente como o patamar de referência da rede para a corrente de sequência zero. Então, inicia-se o monitoramento da variação da corrente calculada em tempo real. Caso, a variação seja maior que a variação máxima, o sinal será comparado com a referência adotada. Se a diferença for maior que  $0,1A_{RMS}$ , será considerada como uma FAI, então, o relé é acionado. Para o banco de dados, também utilizou-se os sinais lógicos. Caso se detecte a FAI, este envia um sinal lógico verdadeiro (1), e vice-versa.

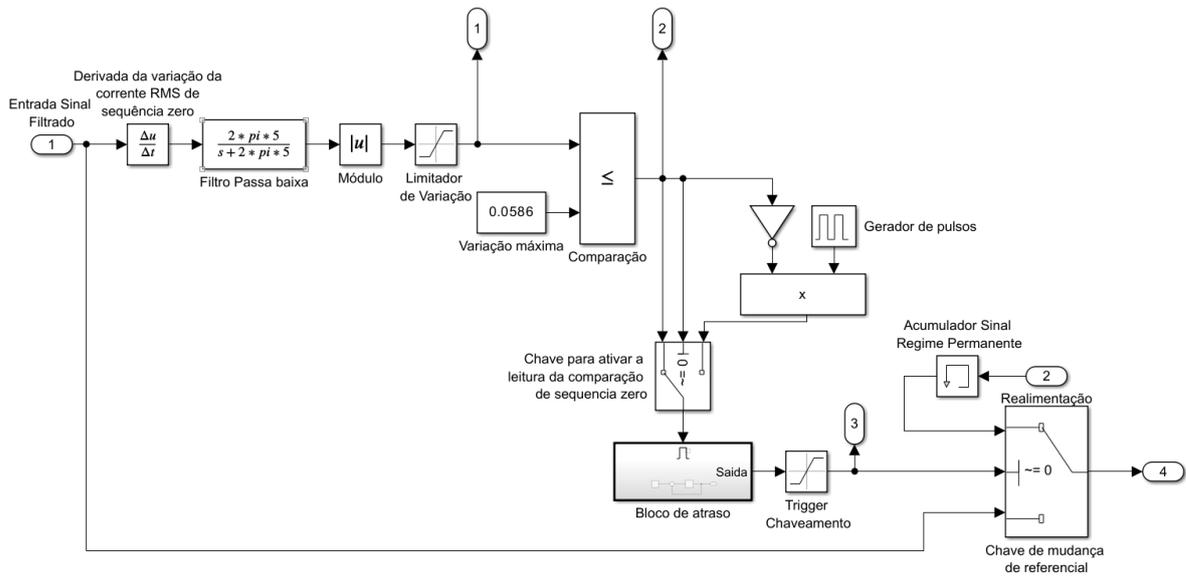
Para criar um banco de dados consistente e controlar as combinações de faltas,

Figura 19 – Sistema para detectar a ocorrência de uma FAI no sistema via análise da corrente de sequência zero.



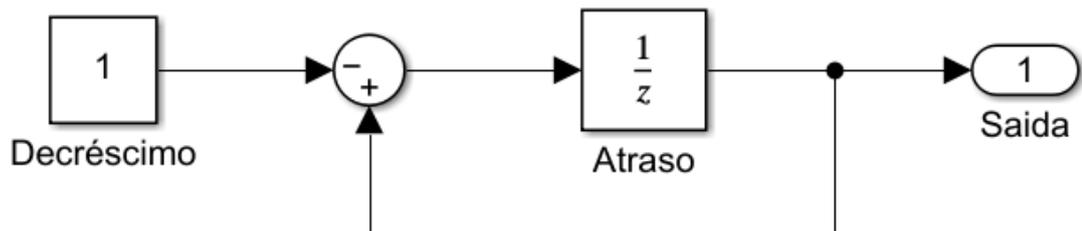
Fonte: Autoria própria

Figura 20 – Sistema interno do bloco chamado “Bloco de detecção de referência”.



Fonte: Autoria própria

Figura 21 – Sistema interno do bloco chamado “Bloco de atraso”.



Fonte: Autoria própria

separou-se a execução das simulações da execução do algoritmo genético. Assim, é possível apenas exportar um novo banco de dados, manipular a simulação independente do algoritmo como classificar os eventos que acontecem no sistema, podendo não se utilizar apenas FAIs, mas acoplamento de cargas, banco de capacitores e executar as simulações em paralelo ao algoritmo genético. Porém, todas as posições dos sensores devem ser mantidas fixas, para não haver conflito no tratamento de dados.

### 3.3 Funções do Algoritmo AG2AS

Implementado o algoritmo de detecção, o próximo passo será realizar a execução do algoritmo genético. O algoritmo de alocação de sensores funciona com base nas respostas colhidas pelo ambiente de simulação. Este algoritmo foi desenhado para cada função represente uma etapa de funcionamento do algoritmo genético. A lógica de funcionamento de cada função foi desenhada para fácil adaptação para entre elas, caso haja necessidade de trocar ou adaptar quaisquer funcionalidades.

A primeira função é a função responsável pela inicialização do algoritmo e criar uma população de forma aleatória, definindo o espaço de busca do algoritmo. Com os indivíduos iniciais definidos, calcula-se o aptidão de cada indivíduo através da função objetivo. Esta inicialização da população está incorporada dentro da função principal. A função principal é a função que define e inicia os parâmetros iniciais. A saída desta função é o resultado de uma rodada de execução do algoritmo genético onde, é demonstrada qual a melhor alocação que o algoritmo conseguiu encontrar. O pseudocódigo desta função está demonstrado no algoritmo [1](#).

A função objetivo foi desenvolvida baseada na seguinte premissa: um banco de dados é fornecido (neste caso, pela resposta das simulações), seguindo a estrutura: primeira coluna indica o número do evento, as colunas 2, 3 e 4 são referentes a indicação booleana referente a algoritmo fatorial e a coluna 5 é referente a indicação booleana do algoritmo de sequência zero. Cada evento possui “ $n + 1$ ” colunas, onde “ $n$ ” é a quantidade de sensores pré-alocados e na primeira coluna é a identificação do evento. Com isso, de acordo com a representação cromossômica, onde cada alelo dos cromossomos é ausência ou presença do sensor da referida posição, as informações de detecção dos sensores presentes serão extraídas. A heurística desenvolvida para esta função baseia-se em penalizar gravemente a cada falta não detectada pelo indivíduo e, também, penalizar a quantidade de sensores, pois assim, será demonstrado ao algoritmo que quanto mais sensores, menos apto o indivíduo está. A estratégia de variação dos valores dos sensores foi adotada para verificar se, um indivíduo que tenha menores preços, mas aloque mais sensores e redundância na detecção, consegue sobrepor um indivíduo que tenha maiores preços, mas poucas alocações e evite redundância. O pseudocódigo da função aptidão está demonstrado no algoritmo [2](#).

**Algoritmo 1** Algoritmo principal (AG2AS)

Variáveis iniciais:

$N_{pop}$  = Tamanho da população,  
 $N_{crom}$  = Tamanho do cromossomo,  
 $N_{Ger}$  = Número de gerações máxima,  
 $Tx_{conv}$  = Taxa de convergência,  
 $N_{Faltas}$  = Número de faltas,  
 $N_{sensores}$  = Número de sensores alocados,  
 $Tx_{selecao}$  = Fator de seleção  
 $Tx_{cruzamento}$  = Fator de cruzamento  
 $Tx_{mutacao}$  = Fator de mutação

**Início do código**

```

procedure POPULAÇÃO NOVA( $N_{pop}, N_{crom}$ )
  for  $N = 1:N_{pop}$  do
     $Ind \leftarrow \text{random}(1, N_{crom})$ 
     $Pop(N, :) \leftarrow Ind$ 
  while  $Ger_{Atual} \leq N_{Ger}$  ou  $Tx_{conv} \leq 70\%$  do
     $M_{Fitness} \leftarrow \text{Fitness}(Pop)$ 
     $M_{pares} \leftarrow \text{Seleção}(M_{Fitness})$ 
     $Pop \leftarrow \text{Crossover}(M_{pares})$ 
  return  $Pop, M_{Fitness}$ 

```

**Algoritmo 2** Função de aptidão (Função Fitness)

```

function FITNESS( $Pop$ )
  for  $N = 1:N_{Faltas}$  do
    for  $N = 1:N_{pop}$  do
       $Ind \leftarrow Pop(N, :)$ 
      if Detectou a Falta then
         $Fit_{Ind} \leftarrow Fit_{Ind-1}$ 
      else
         $Fit_{Ind} \leftarrow Fit_{Ind} + 100$ 
       $Fit_{Ind} \leftarrow Fit_{Ind} + N_{sensores} * \text{random}(50, 52, 5)$ 
     $M_{Fitness}(1, :) \leftarrow Ind$ 
     $M_{Fitness}(2, :) \leftarrow Fit_{Ind}$ 
  return  $M_{Fitness}$ 

```

As condições de parada são verificadas após o cálculo da função objetivo e, se uma das condições do programa foi atingida, é finalizada a execução do algoritmo. As seguintes condições de parada definidas são: convergência da população (se 70% da população possuírem o mesmo cromossomo) ou quantidade máxima de gerações (100 gerações neste trabalho). Se atingido alguma delas, a função principal retorna o resultado com os indivíduos da população. Caso contrário, o algoritmo continua sua execução.

Obtida a resposta da função objetivo dos indivíduos, a etapa de seleção é realizada.

O operador genético escolhido foi o torneio onde, sorteia-se três indivíduos aleatórios, classificando-os em ordem de crescente à função objetivo. Define-se o fator de seleção que será responsável por privilegiar os indivíduos com melhor classificação, porém, caso seja muito baixa, diminuirá a variabilidade genética necessária para uma boa conversão do algoritmo. Por meio de uma função pseudoaleatória, um número entre 0 e 1 é sorteado e, caso o número seja maior do que o fator de seleção, será selecionado o indivíduo mais adaptado, se for menor, o menos adaptado, preservando a possibilidade dos indivíduos menos adaptados de propagar suas características, evitando uma convergência prematura.

O próximo operador genético é o de cruzamento (ou “*crossover*”). O operador definido foi o cruzamento binário, onde dois ponteiros serão definidos aleatoriamente dividindo os cromossomos em três partes, de modo que a parte central de cada indivíduo seja trocada entre eles, formando dois novos indivíduos. Semelhante à etapa de seleção, temos um fator de cruzamento, sendo este responsável por definir se os pares escolhidos realizarão o cruzamento ou apenas replicaram seus cromossomos. Esta estratégia melhora a variabilidade genética por permitir uma segunda chance a indivíduos, preservando suas características. Os pseudoscódigos dos operadores de seleção e de cruzamento estão nos algoritmos 3 e 4, respectivamente.

---

**Algoritmo 3** Função Seleção
 

---

```

function SELEÇÃO( $M_{Fitness}$ )
  for  $N = 1:N_{pop}/2$  do
    Pares  $\leftarrow$  random( $M_{Fitness}, 3$ )
    if random  $\geq T_{x_{selecao}}$  then
      if  $M_{Pares}(N, 1) = Pares(1)$  then
         $M_{Pares} \leftarrow Pares(2)$ 
      else
         $M_{Pares} \leftarrow Pares(1)$ 
    else
      if  $M_{Pares}(N, 1) = Pares(3)$  then
         $M_{Pares} \leftarrow Pares(2)$ 
      else
         $M_{Pares} \leftarrow Pares(3)$ 
  return  $M_{Pares}$ 

```

---

A última etapa é de responsabilidade do operador de mutação. Esta etapa é utilizada para explorar situações além das quais os operadores de cruzamento e seleção conseguem induzir a população, aumentando a exploração do espaço de buscas, e evitando que o algoritmo caia em um mínimo local. Porém, a mutação não deve ter uma grande probabilidade para que o código não se torne totalmente aleatório, por isso, utiliza-se uma probabilidade abaixo de 5%. No algoritmo 5, está demonstrado o pseudocódigo de mutação. E então, após a população ser reestabelecida ao tamanho original com os novos indivíduos, retornamos a função objetivo até que se atinga um dos critérios de parada.

**Algoritmo 4** Função Cruzamento

---

```

function CROSSOVER( $M_{Pares}$ )
  for  $N = 1:N_{pop}/2$  do
    if  $\text{random} \geq T_{x_{crossover}}$  then
      Filho1  $\leftarrow$  Mix( $M_{Pares}(N,1), M_{Pares}(N,2)$ )
      Filho2  $\leftarrow$  Mix( $M_{Pares}(N,2), M_{Pares}(N,1)$ )
    else
      Filho1  $\leftarrow$   $M_{Pares}(N,1)$ 
      Filho2  $\leftarrow$   $M_{Pares}(N,2)$ 
    Filho1  $\leftarrow$  Mutação(Filho1)
    Filho2  $\leftarrow$  Mutação(Filho2)
  Novapop[ $N,1$ ]  $\leftarrow$  Filho1
  Novapop[ $N,2$ ]  $\leftarrow$  Filho2
return Novapop

```

---

**Algoritmo 5** Função Mutação

---

```

function MUTAÇÃO(Ind)
  TamanhoInd  $\leftarrow$  size(Ind)
  IndMutacao  $\leftarrow$  random(TamanhoInd)
  if IndMutacao( $N$ )  $\leq T_{x_{Mutacao}}/Tamanho_{Ind}$  then
    Change(Ind( $N$ ))
return Ind

```

---

Os dados de entrada da função principal são: número de gerações máxima, os fatores de seleção, cruzamento e mutação, quantidade de sensores pré-alocados (tamanho do cromossomo), matriz do banco de dados e a quantidade de faltas. A saída do algoritmo consiste na população final, convergência da população (quantidade de indivíduos iguais), indivíduo com mais prevalência, tempo do algoritmo, geração de parada (geração no qual algum dos critérios de parada foi atingido), indivíduo, valor e geração do maior "fitness" de todas as gerações e da última geração. Durante a resolução do algoritmo, os indivíduos são descritos de forma binária para melhor manipulação do algoritmo. Após a parada e finalização do algoritmo, os indivíduos são codificados de forma decimal para melhor visualização e interpretação, pois quanto maior o número de sensores pré-alocados, mais difícil de observar se todos os alelos dos cromossomos estão iguais.

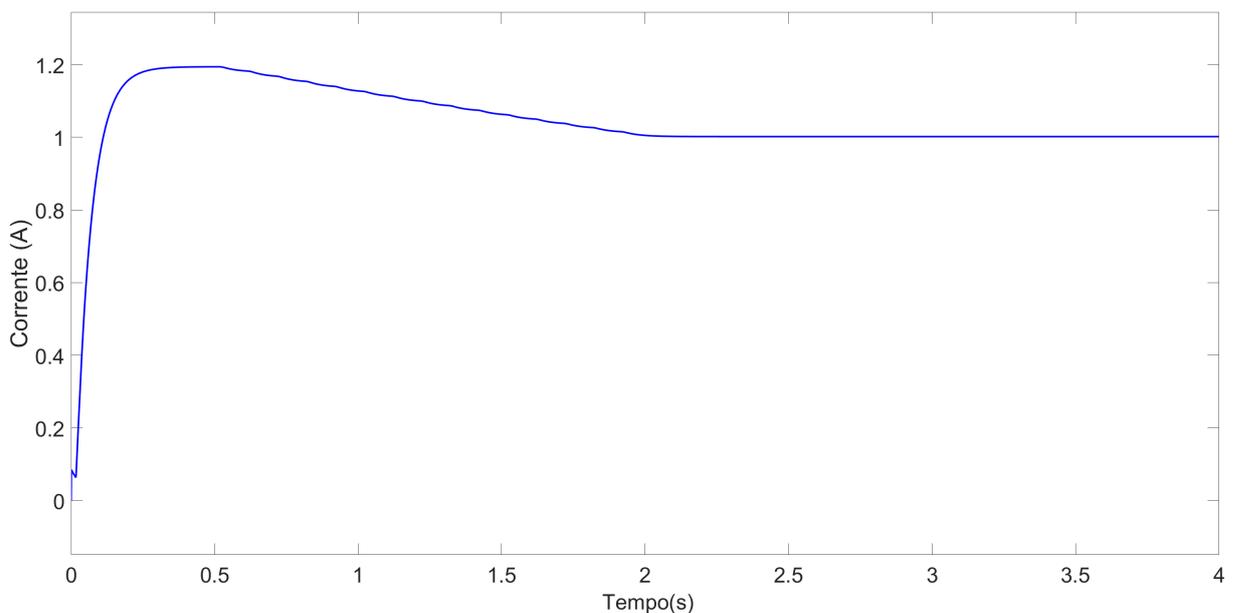
## 4 Resultados das simulações de alocação dos sensores

Este capítulo apresenta os resultados da sintonização do algoritmo genético e os resultados da alocação dos sensores, demonstrando a redução do montante total de sensores e problemas encontrados durante a execução do algoritmo, assim como as possíveis soluções e melhorias a serem desenvolvidas.

### 4.1 Sintonização do algoritmo de detecção

Para obter os resultados de detecção, o dispositivo de detecção foi implementado no Simulink. A implementação está demonstrada nas figuras 18, 19, 20 e 21. Para definir qual o limiar de referência de variação para o método de corrente de sequência zero, encontra-se entre os sensores pré-allocados, o sensor mais distante do alimentador. O sensor utilizado, conforme o diagrama unifilar demonstra na Figura 15, poderia ser o disposto no nó 846 ou no nó 836, este último sendo o utilizado. Assim, como descrito por Batista et al. (2022), definiu-se heurísticamente, que a variação de referência será 5% da corrente de sequência zero do sensor definido. O sinal de corrente no sensor 836 está demonstrado na Figura 22. Então, a variação para detecção pelo método de sequência zero será de 0,0568 A.

Figura 22 – Sinal de corrente de sequência zero no sensor 836



Fonte: Autoria própria

## 4.2 Sintonização do algoritmo genético

Para definir os valores do tamanho da população, da taxa de seleção e da taxa de cruzamento, foram realizadas várias execuções do algoritmo genético, mantendo o fator de mutação fixo em 0,01%, porém, variando essas três variáveis da seguinte maneira. Variou-se o tamanho da população baseando-se no número total de sensores pré-alocados (neste caso, 25 sensores). Então, multiplicou-se este valor (25) por um fator que variou 0,5 até 10, com passos de 0,25, arredondando o resultado para o maior número inteiro e par. Já o fator de seleção teve três valores pré-definidos: 0,5, 0,65 e 0,35, definidos heurísticamente. O fator de cruzamento teve os valores pré-definidos de 0,5, 0,3 e 0,7, também definidos heurísticamente. A cada combinação de valores, realizou-se três execuções do algoritmo para se ter um comportamento mais definido.

A cada execução do algoritmo, foram registrados os indivíduos que obtiveram o melhor resultado da função objetivo em todas as gerações da execução (estes chamados de globais) e os indivíduos que obtiveram o melhor resultado na geração de parada da execução.

### 4.2.1 Fator de seleção

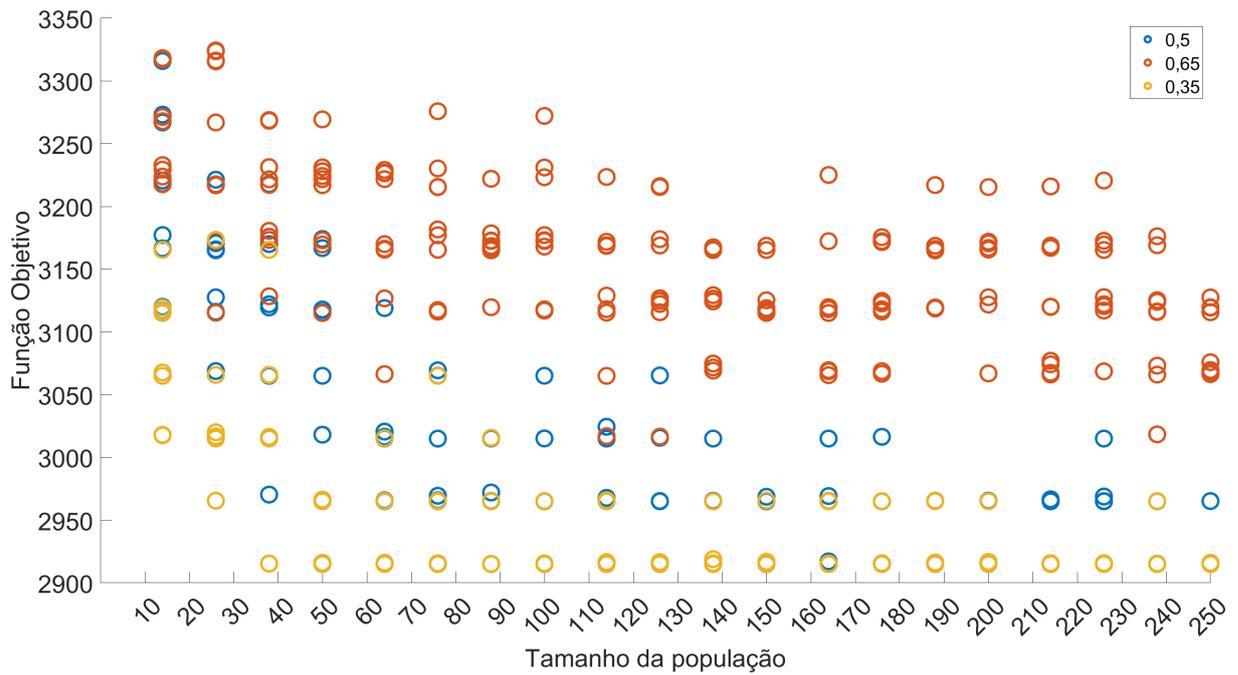
Ao iniciar a análise de parâmetros, notou-se o destaque da influência do fator de seleção para a melhoria do algoritmo. Sendo o método deste operador genético, o método de torneio, a influência do fator é: quanto maior o seu valor, maior a probabilidade de selecionar o indivíduo de pior resultado da função objetivo dos indivíduos selecionados.

O impacto do fator de seleção na melhoria do desempenho dos indivíduos está demonstrado nas figuras [Figura 23](#) e [Figura 24](#). Em ambas figuras, é notável que há três regiões bem definidas: uma superior, com maior prevalência de indivíduos vermelhos (com fator de seleção de 0,65), uma intermediária, com maior prevalência de indivíduos azuis (com fator de seleção 0,5) e, uma inferior, com maior prevalência de indivíduos amarelos (com fator de seleção 0,35).

Observando estes gráficos, entende-se que o fator de seleção tem uma forte influência na melhoria de desempenho do algoritmo quanto menor o seu valor. Isso é reforçado observando a [Figura 25](#), que demonstra que a diminuição o fator de seleção, aumenta a convergência do valor da função objetivo, tornando o comportamento do algoritmo mais estável, o que não é igualmente notado variando a taxa de cruzamento.

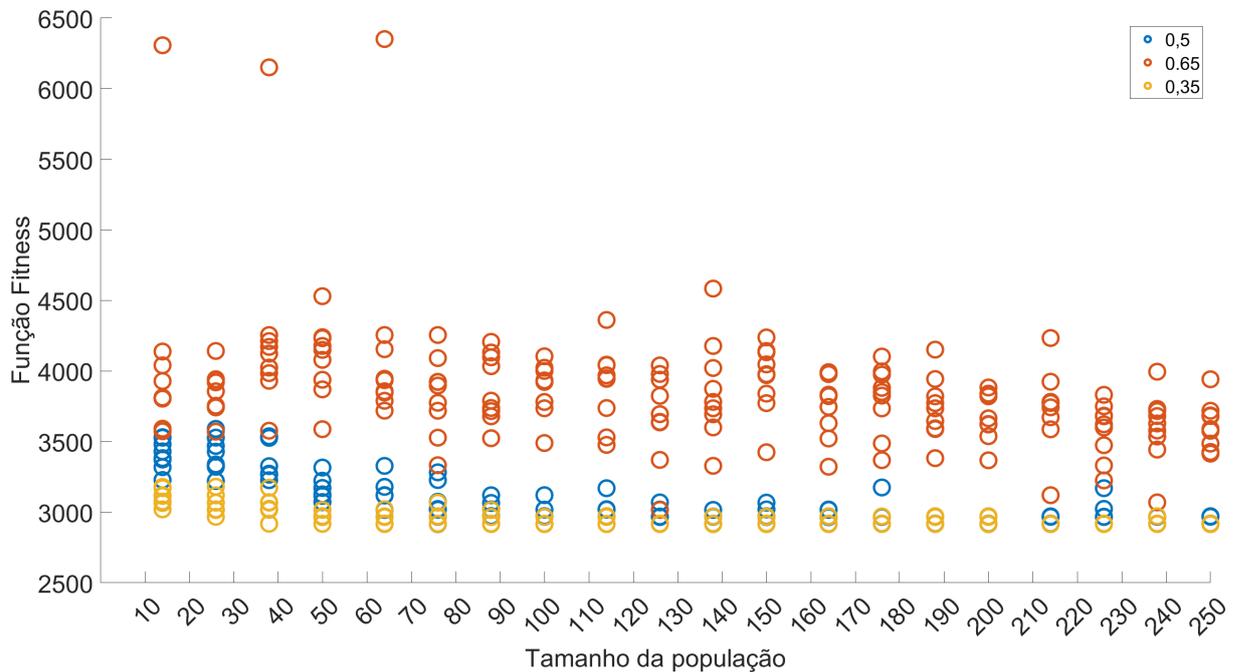
O fator de 0,35 foi então definido, tendo em vista a intenção de permitir que indivíduos com piores resultados tenham oportunidade de se reproduzir, propagando características que possam ser importantes quando combinadas com a de outros indivíduos mais bem posicionados e, aumentar assim, a procura dentro do espaço de busca, evitando a convergência prematura.

Figura 23 – Desempenho dos indivíduos em relação ao fator de seleção - Indivíduos globais



Fonte: Autoria própria

Figura 24 – Desempenho dos indivíduos em relação ao fator de seleção - Indivíduos da última geração



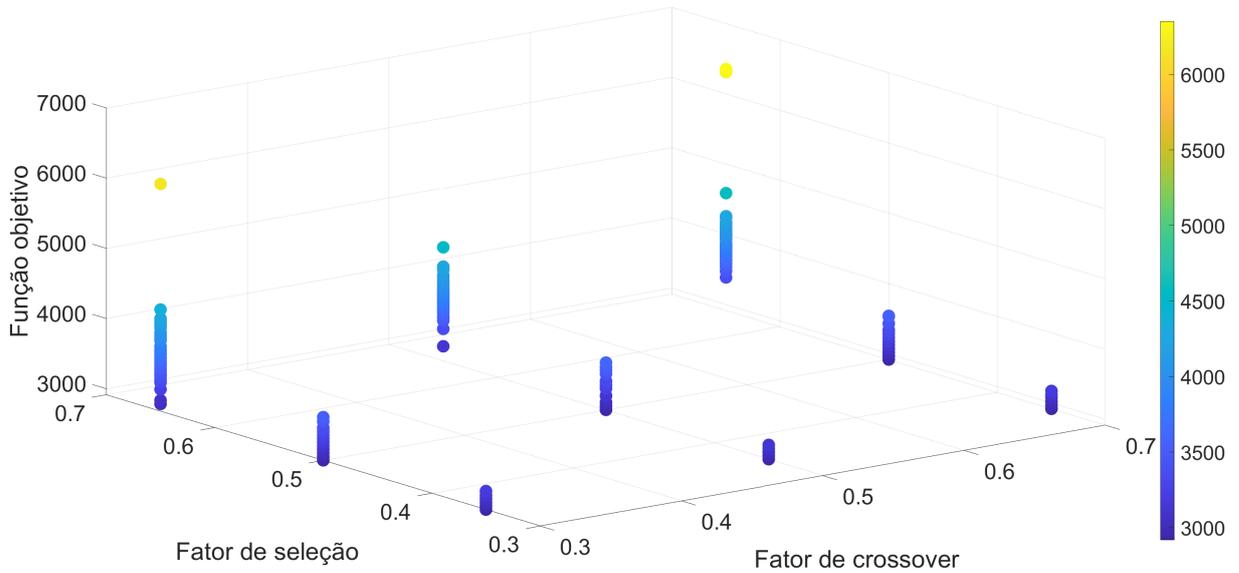
Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2 Tamanho da população

Ao determinar o valor do fator de seleção, foram destacadas todas as execuções que possuem o fator de 0,35, gerando assim, as figuras 26 e 27.

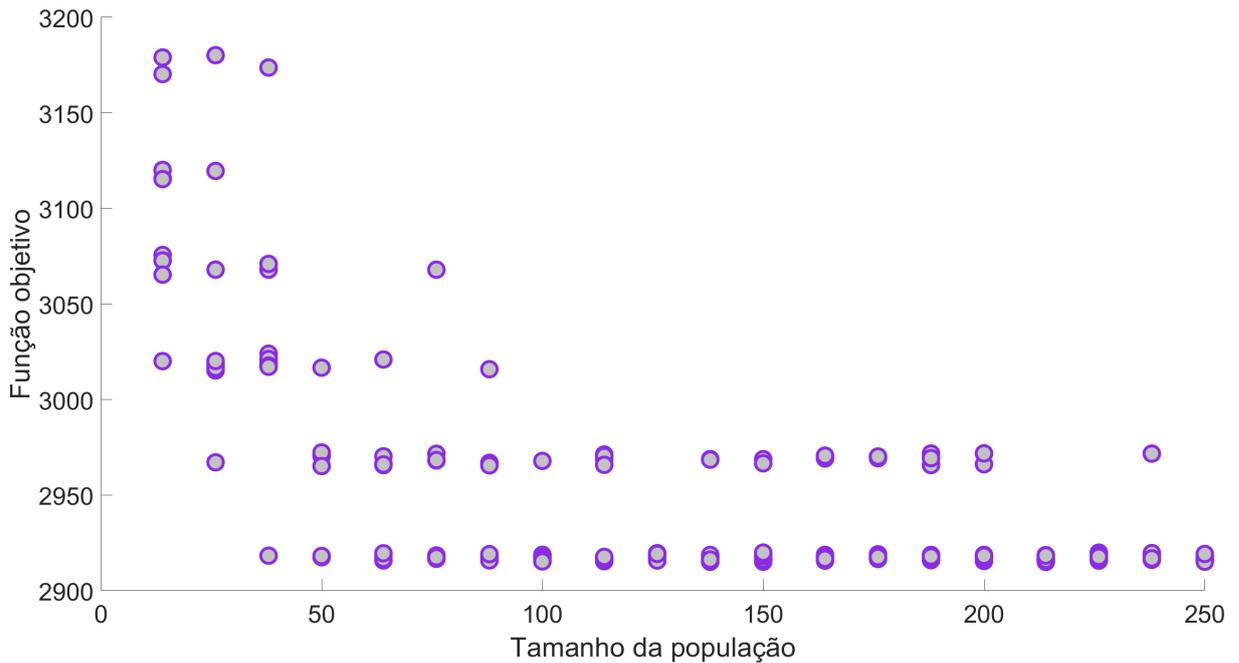
O fator de cruzamento não apresenta mudança variando suas taxas em relação à melhoria de estabilidade ou desempenho do algoritmo. Porém, o que o tamanho da

Figura 25 – Desempenho do algoritmo em relação aos fatores de seleção e cruzamento



Fonte: Autoria própria

Figura 26 – Comportamento do algoritmo em relação ao tamanho da população com fator de seleção 0,35

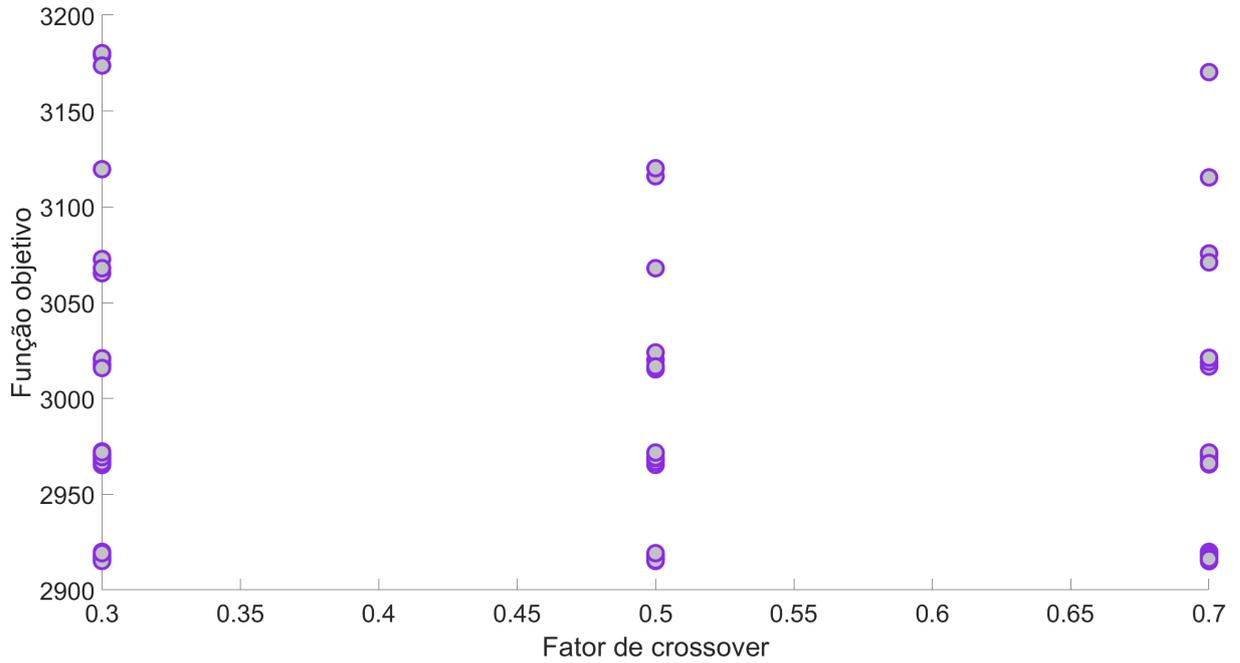


Fonte: Autoria própria

população apresenta menor dispersão quando se aumenta o tamanho da população. Esse comportamento é observado para as três taxas de cruzamento conforme demonstra a [Figura 28](#).

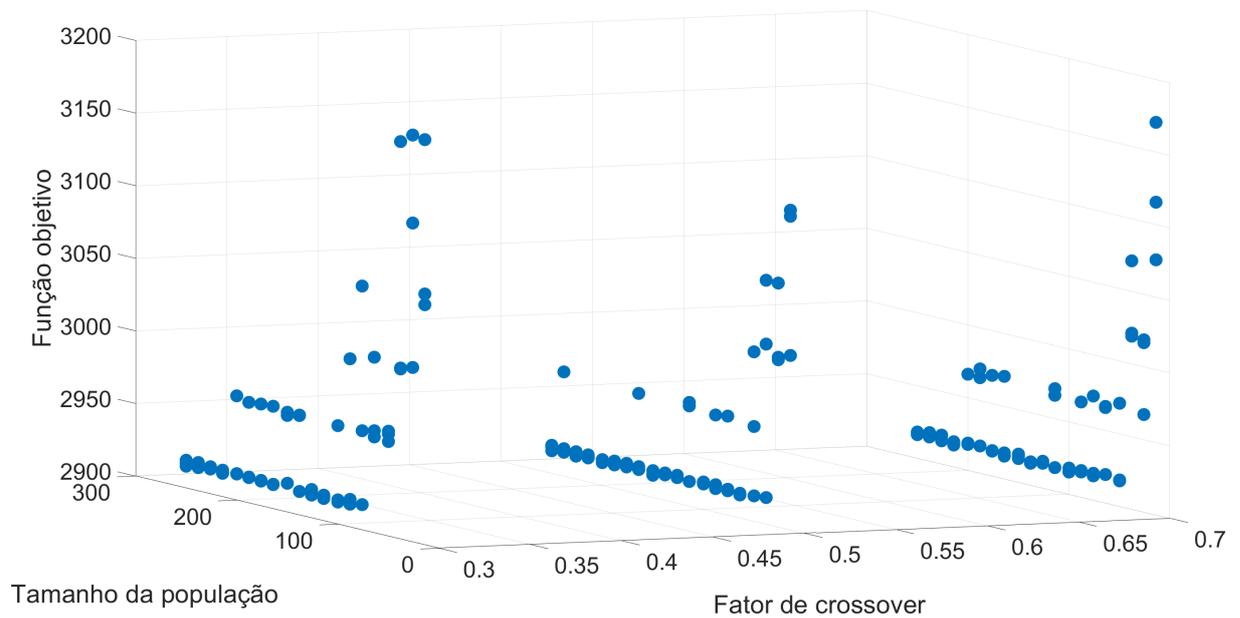
Após as análises das figuras [26](#), [27](#) e [28](#), conclui-se que ao aumentar o tamanho da população impacta positivamente no desempenho do algoritmo. Como descrito na [seção 2.1](#), cada indivíduo é uma possível solução do problema proposto, sendo assim, aumentando a população, tem-se um aumento de possibilidades de procura dentro do espaço de buscas. Porém, uma população muito grande pode impedir uma convergência e

Figura 27 – Comportamento do algoritmo em relação à taxa de cruzamento com fator de seleção 0,35



Fonte: Autoria própria

Figura 28 – Comportamento do algoritmo com fator de seleção 0,35



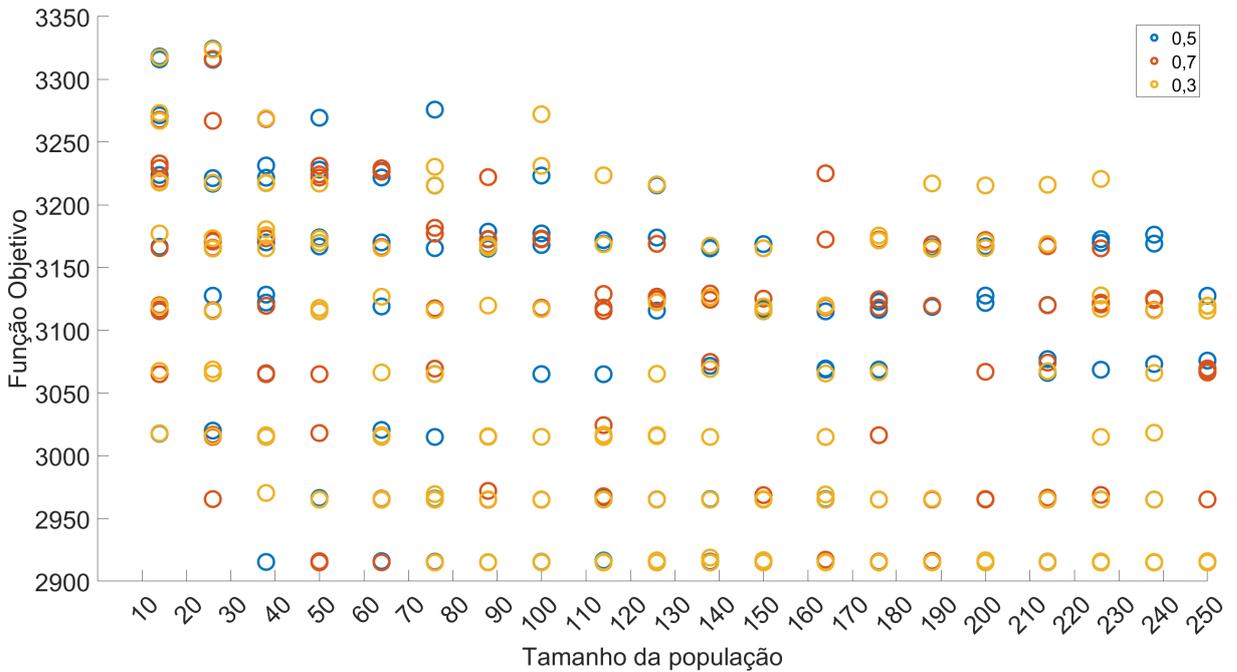
Fonte: Autoria própria

aumenta a necessidade de poder computacional. Ao se analisar este algoritmo, os tempos de execução com o maior valor de população não foi maior que três segundos, porém, como não se observa melhoria no desempenho com os tamanhos de população maiores que 100 indivíduos, foi determinado que o tamanho de população ficará em 150 indivíduos, podendo ser adaptada em caso de otimização do algoritmo.

### 4.2.3 Fator de cruzamento

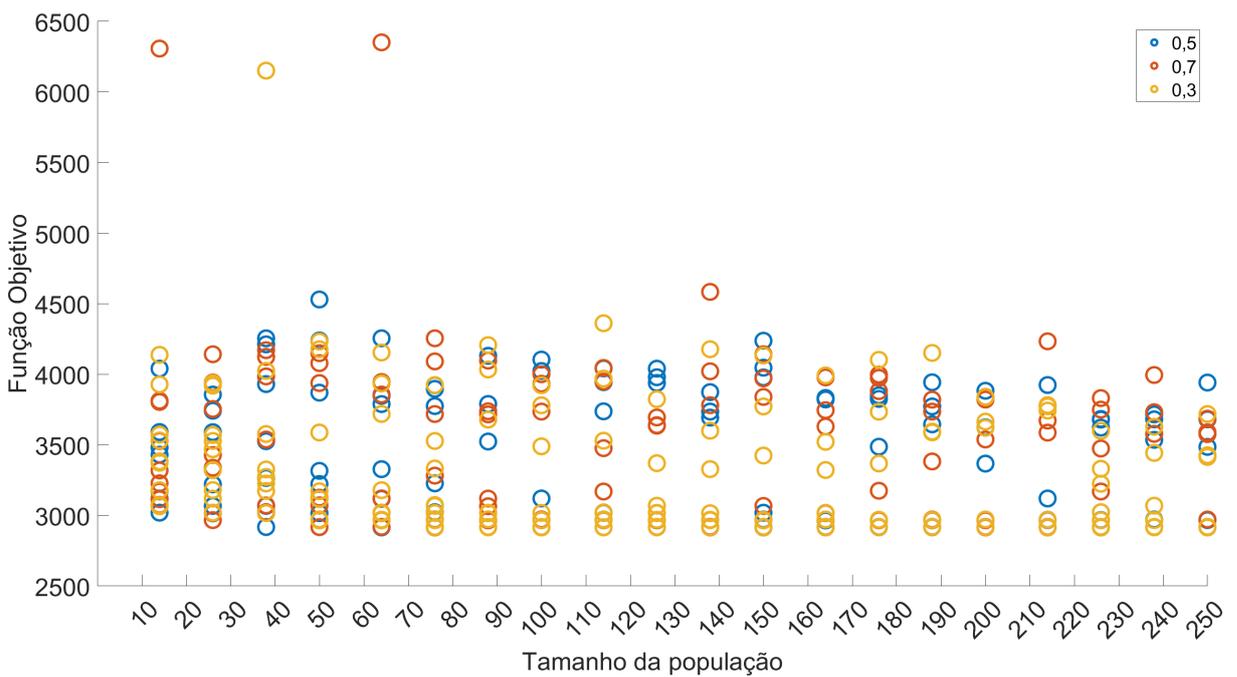
Para a determinação do fator de cruzamento, como já supracitado, foram delimitados três fatores fixos: 0,3, 0,5 e 0,7. Ao observar os gráficos nas figuras 29 e 30 não se há uma clara diferença, como observado na [subseção 4.2.1](#).

Figura 29 – Desempenho dos indivíduos em relação ao fator de cruzamento - Indivíduos globais



Fonte: Autoria própria

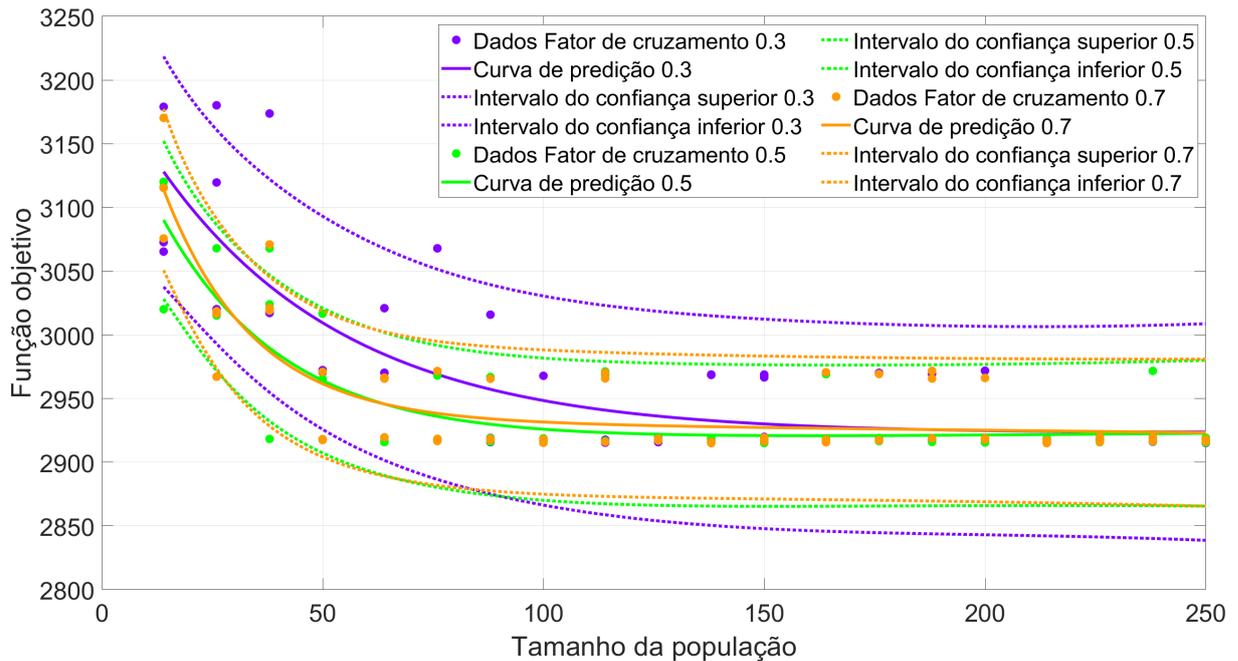
Figura 30 – Desempenho dos indivíduos em relação ao fator de cruzamento - Indivíduos da última geração



Fonte: Autoria própria

Para compreender melhor a influência dos fatores de cruzamento, foi feita uma análise regressiva dos dados para cada um dos valores. Através da [Figura 31](#), é notado que todos os fatores apresentam um comportamento exponencial na minimização da função objetivo. A diferença entre as curvas encontra-se na velocidade na qual as curvas se aproximam no valor mínimo, sendo esta velocidade diretamente proporcional ao aumento do fator.

Figura 31 – Regressão não-linear dos fatores de cruzamento



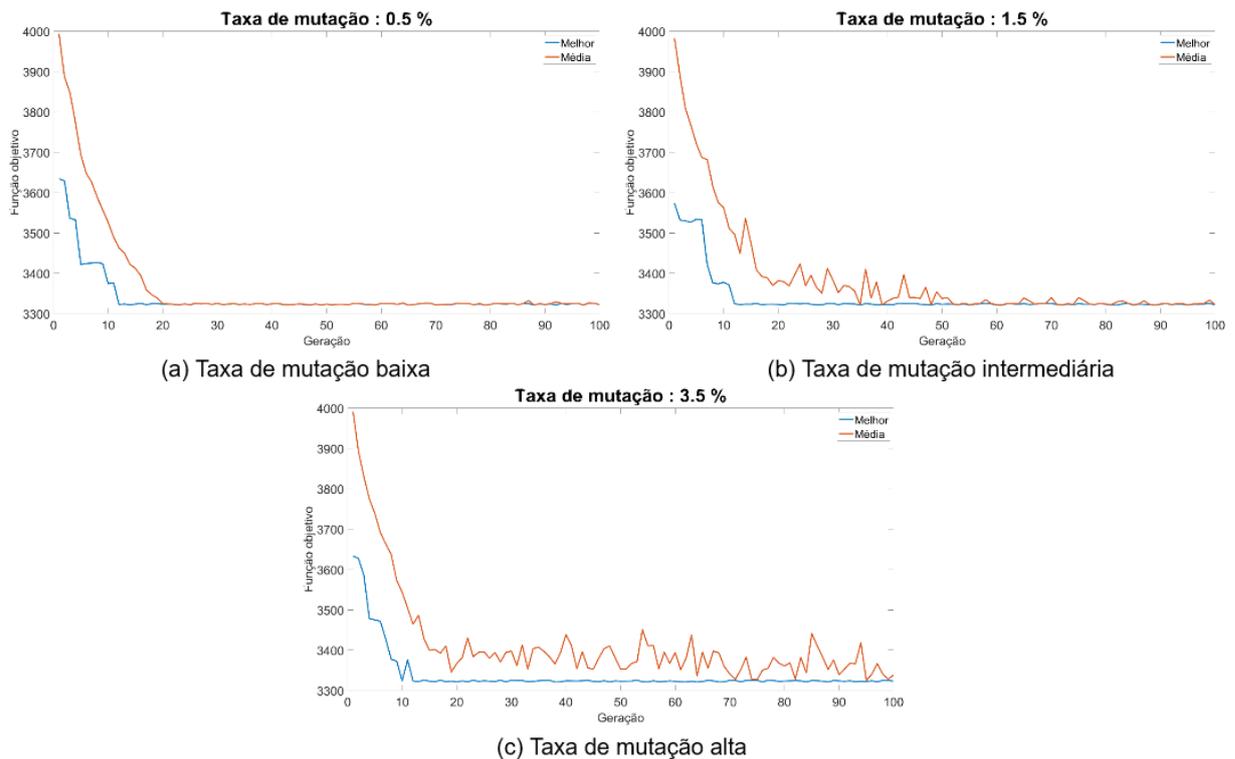
Fonte: Autoria própria

Observando o lado esquerdo do gráfico (valores de população menores que 50 indivíduos), nota-se uma pequena vantagem para o fator de seleção de 0,7 por ter uma curva mais agressiva. Mesmo que a tendência aponte que, em grandes populações, todos os fatores apresentem o mesmo comportamento, ao aumentar este fator, induz a criar um aumento da procura dentro do espaço de busca se houver indivíduos suficientemente diversos entre si na população, o que geralmente ocorre no início do algoritmo.

#### 4.2.4 Fator de mutação

O fator de mutação teve uma abordagem diferente dos outros fatores. Com os outros parâmetros definidos, a mutação variou de 0,25% até 4% com passos de 0,25%. Como o fator de mutação tem menor impacto na convergência desejada do algoritmo, sendo utilizada para influenciar a aumentar a variabilidade genética, buscou-se um fator que não interferisse diretamente na convergência, mas que perturbe o algoritmo a não convergir facilmente, mesmo com vários indivíduos iguais. Três valores estão demonstrados na [Figura 32](#).

Figura 32 – Demonstração dos fatores de mutação



Fonte: Autoria própria

Observa-se que nos casos onde o fator é maior de 3%, a perturbação na convergência impede com que a média dos resultados se equiparem por mais de duas gerações ao fitness do melhor indivíduo, impedindo a convergência completa. Já quando o valor é menor que 1%, o resultado não é perturbado, fazendo uma convergência prematura da resposta. Portanto, o fator de mutação adotado será 1,5%, visando a modificação dos indivíduos para induzir a busca, mas permitindo a convergência quase completa (maior que 90% dos indivíduos) e obtenha uma resposta assertiva.

### 4.3 Resultado da alocação de sensores

Para a execução do algoritmo genético, os valores dos parâmetros iniciais foram:

- Tamanho da população: 150 indivíduos;
- Fator de Seleção: 0,35;
- Método do operador de seleção: torneio;
- Fator de Seleção: 0,7;
- Método do operador de seleção: múltiplos pontos;
- Fator de Seleção: 1,5%;

- Método do operador de seleção: ponto Único;
- Geração de parada: 100 gerações;
- Taxa de convergência máxima: 75%.

Após sintonizar o algoritmo, foram realizadas 50 execuções do algoritmo de alocação. Considerando que não se há uma resposta definitiva, a presença de respostas divergentes é esperada e consideramos as respostas escolhidas do algoritmo como as respostas que apresentam maior frequência em um grupo de simulações. Na [Tabela 1](#) estão os resultados obtidos após as 50 simulações.

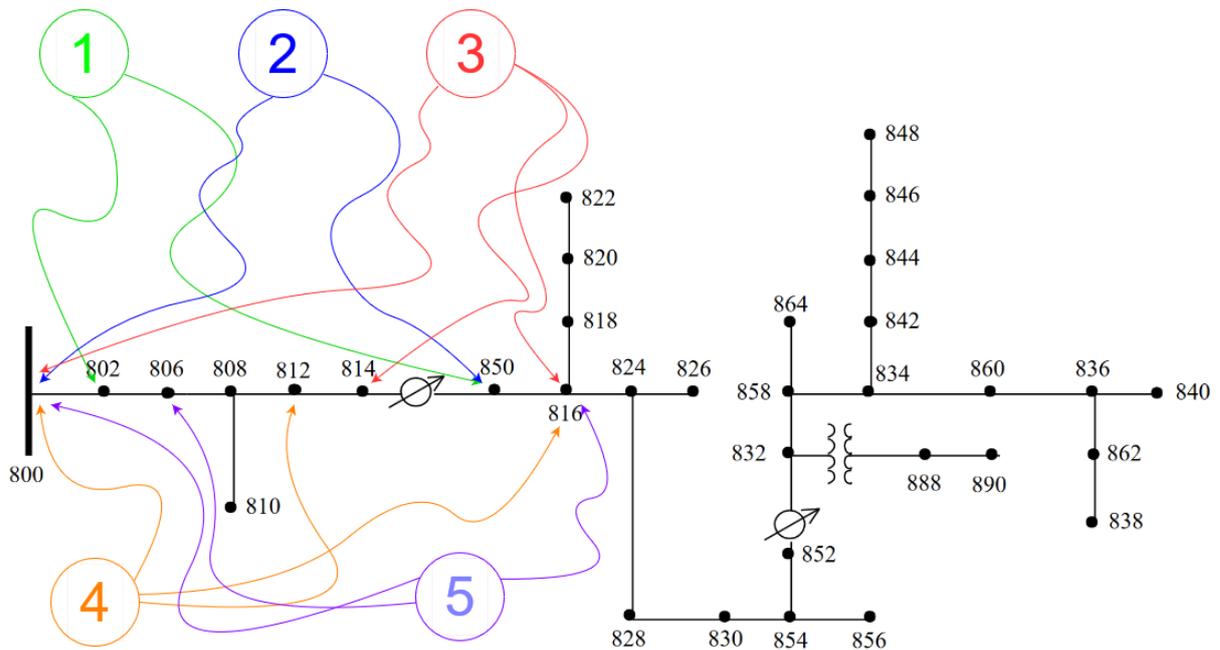
N <sup>o</sup>	Prevalência	Sensores Alocados
1	23	802, 850
2	24	800, 850
3	1	800, 814, 816
4	1	800, 812, 816
5	1	800, 806, 816

Tabela 1 – Tabela de resultados do algoritmo

Os casos 1 e 2 tem como resultado a alocação de 2 indivíduos apenas variando um dos indivíduos. Como esperado, as respostas 3, 4 e 5 são respostas no qual o algoritmo se encontrou em um máximo local, onde não foi possível evitar ou sobrepô-lo. Porém, estas respostas representam 6% das respostas totais. Como o tempo computacional de funcionamento de algoritmo é pequeno (menos de 2 minutos), pode-se realizar mais rodadas para se observar qual resposta terá maior ocorrências e assumi-lá como a resposta ideal de proteção ao sistema. Como 94% das respostas se concentram entre duas respostas, não se faz necessário mais execuções do algoritmo, pois há uma alta prevalência apenas em duas respostas próximas. Entre os dois casos apresentando, para maior proteção da rede, o caso de n.<sup>o</sup> 1 exclui a proteção da porção de rede entre o alimentador e o nó 802, sendo o caso n.<sup>o</sup> 2, o caso que apresenta uma disposição que oferece maior proteção. Na [Figura 33](#), as respostas são demonstradas de forma gráfica. Relacionando a [Tabela 1](#) com a [Figura 33](#), cada cor representa cada uma das respostas alcançadas via o algoritmo genético. As setas indicam qual foi a solução proposta em cada uma das respostas, ou seja, em quais nós devem ser alocados os sensores de modo a proteger a rede contra FAIs. Esta abordagem torna a interpretação das respostas mais visual, além de que, ajuda na compreensão de aplicação e entender quais as melhorias que podem ser realizadas e quais as limitações encontradas.

Analisando a [Figura 33](#) e [Tabela 1](#), já conseguimos destacar que as soluções n<sup>o</sup> 3,4 e 5 tem um sensor a mais que as outras duas respostas. Este comportamento é observado quando se exclui a alocação do sensor no nó 850. Uma das possíveis explicações sobre este

Figura 33 – Representação gráfica das respostas



Fonte: Autoria própria

comportamento, o regulador de tensão que se encontra entre os nós 814 e 850 que torna as FAIs que ocorrem em posições anteriores ao regulador, invisíveis aos sensores alocados pós o regulador, comportamento que não ocorre após com o regulador disposto entre os nós 852 e 832. A distância entre os reguladores e o alimentador é uma das variáveis que influenciam neste comportamento.

Outra limitação que pode-se observa são quando os indivíduos não alocam sensor no nó inicial (800). No caso n.<sup>o</sup> 1, mesmo que sua otimização em relação ao número de sensores tenha sido efetiva, se uma FAI ocorrer entre os sensores 800 e 802, mesmo que o sensor alocado no nó 802 atue, a rede faltosa continuará energizada.

Por fim, em ambiente de simulação, notou-se que em redes monofásicas com distância maiores que 1,5 quilômetros, o método de detecção utilizado neste trabalho não é capaz de enxergar a FAI, a depender da quantidade de elementos ativos na rede.

Dado estas limitações encontradas, para melhorar as respostas e tornar a ferramenta de alocação mais assertiva, desenvolver um método de validação das respostas encontradas pelo algoritmo genético, incluir na função objetivo a direcionalidade da detecção e encontrar as porções de redes que podem ficar desprotegidas a cada resposta entregue pelo AG2AS.

# Conclusão

A falta de alta impedância é um grande desafio a ser superado para os sistemas de proteções modernos. Pela sua natureza, ela se torna quase invisível para os métodos tradicionais de proteção, causando insegurança tanto na parte elétrica, como na segurança dos equipamentos, na qualidade e no fornecimento de energia, quanto na parte ambiental, podendo causar incêndios aos contatos com vegetações secas, choques elétricos e podendo resultar em perdas de vidas para animais e pessoas se encontram próximo à região onde ocorreu a FAI.

Neste trabalho, utilizou-se de dois métodos complementares para implementar um sistema de proteção completo em uma rede já estabelecida. O algoritmo de alocação, baseado no trabalho de [Batista et al. \(2022\)](#), foi implementado nas simulações da rede IEEE 34 com objetivo de se detectar FAIs em todo o comprimento da rede. Junto a ele, foi desenvolvido um algoritmo de alocação que, através de pontos pré-estabelecidos, determina-se quais pontos são necessários a instalação de sensores em conjunto com atuadores para proteger a rede com o menor número de dispositivos possíveis.

Por ser um algoritmo leve, o algoritmo do método de detecção não necessita de um microprocessador com grande capacidade computacional, diminuindo o custo de implementação e podendo ser embarcado para auxiliar os dispositivos de proteção já ativos. Deste modo, o custo do projeto diminuiu exponencialmente, como neste caso, onde se diminuiu a quantidade de possíveis sensores de 26 para de 2 a 3 sensores.

Contudo, alguns efeitos adversos foram constatados. O método de detecção utilizado tem uma grande desvantagem ao se haver manipulações de cargas na rede, podendo constatar um falso positivo e desarmando a rede ao se trocar o limiar de referência de sequência zero do sistema.

Além disso, como o algoritmo de alocação é totalmente dependente do banco de dados fornecido pelo algoritmo de detecção, caso o algoritmo de detecção falhe, o algoritmo de alocação irá fornecer uma resposta não acurada com o objetivo real. Uma melhoria de direcionalidade na função objetivo também é desejável, pois, a chave deve conseguir identificar se a falta ocorre antes ou após do sensor e será extinta quando acionada a proteção.

Finalmente, este trabalho produziu uma ferramenta importante para buscar aumento de assertividade para os algoritmos de detecção de FAIs, buscando também custo reduzido.

## Trabalhos Futuros

Através dos problemas detectados durante o desenvolvimento do trabalho, quatro sugestões foram formuladas com intuito de solucionar ou evitar as situações problemáticas encontradas. Superando e resolvendo os problemas encontrados, também foram colocadas sugestões para melhorar o trabalho.

A primeira proposta consiste em utilizar a direcionalidade da detecção para calcular a aptidão do indivíduo (função objetivo). Esta sugestão se baseia principalmente quando se analisa as respostas descritas na [Tabela 1](#). No caso n.º 1, mesmo que a falta seja detectada e o dispositivo de proteção, seja acionado, se a falta ocorrer entre os nós 800 e 802, a rede continuará energizada

A segunda proposta é definir a resposta ideal depois de “n” execuções do algoritmo. Esta sugestão faz com a resposta da melhor disposição seja definida automaticamente pelo sistema, não sendo necessária a análise estatística e de situação como foi feito nesse trabalho através da [Figura 33](#) e a [Tabela 1](#).

Duas propostas partem da mesma premissa. As propostas são: Validar a resposta do algoritmo genético fazendo simulações da rede com os sensores definidos e desenvolver uma função que mostre as partes que ficaram desprotegidas na melhor resposta entregue pelo algoritmo. Estas propostas fazendo conjunto com a segunda proposta onde, após definir a melhor resposta, o próprio algoritmo irá realizar sucessivas simulações utilizando a estrutura já desenvolvida para validar se a proteção da rede é total ou parcial. Caso seja parcial, demonstre quais os pontos desprotegidos.

# Referências

- ARAUJO, M. R. de et al. Análise de sensibilidade de diferença angular no sistema teste ieee 34 barras adaptado utilizando a teoria de grafos. In: *Anais do Congresso INDUSCON*. São Bernardo do Campo: [s.n.], 2023.
- ARIAS, J. C. G. *Identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas multiterradas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015.
- ARRAM, A.; AYOB, M. A novel multi-parent order crossover in genetic algorithm for combinatorial optimization problems. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 133, p. 267–274, 2019.
- BARCELLOS, J. C. H. d. *Algoritmos genéticos adaptativos: um estudo comparativo*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2000.
- BATISTA, E. A. et al. Detecção de faltas de alta impedância por meio de análise fasorial e correntes de sequência zero. *Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, v. 59, n. 4, p. 1224–1245, 2022.
- BISWAL, M. et al. Development of time-frequency based approach to detect high impedance fault in an inverter interfaced distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 36, n. 6, p. 3825–3833, 2021.
- BRABAZON, A.; O’NEILL, M.; MCGARRAGHY, S. *Natural computing algorithms*. [S.l.]: Springer, 2015. v. 554.
- CHAN, C. M.; BAI, H.; HE, D. Blade shape optimization of the savonius wind turbine using a genetic algorithm. *Applied energy*, Elsevier, v. 213, p. 148–157, 2018.
- CHEN, K.; HUANG, C.; HE, J. Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods. *High voltage*, Wiley Online Library, v. 1, n. 1, p. 25–33, 2016.
- COLHERINHAS, G. B. Ferramenta de otimização via algoritmos genéticos com aplicações em engenharia. 2016.
- CUI, Q.; EL-ARROUDI, K.; WENG, Y. A feature selection method for high impedance fault detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 34, n. 3, p. 1203–1215, 2019.
- DARWIN, C. A origem das espécies. *São Paulo: Hemus*, 2003.
- DARWIN, C.; WALLACE, A. R. et al. Evolution by natural selection. *Evolution by natural selection.*, Cambridge University Press, 1958.
- DORIA-GARCÍA, J. et al. High impedance fault modeling and location for transmission line. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 196, p. 107202, 2021.
- FERNANDES, S. V. et al. A symmetrical component evaluation for broken conductor fault detection. In: IEEE. *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. [S.l.], 2021. p. 1–6.

FILHO, P. A. d. C.; POPPI, R. J. Algoritmo genético em química. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 22, p. 405–411, 1999.

FURSE, C. M. et al. Fault diagnosis for electrical systems and power networks: A review. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 888–906, 2020.

G1. *Energisa alerta sobre cuidados com cabos partidos em períodos chuvosos*. 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/se/sergipe/especial-publicitario/energisa-sergipe/energia-na-comunidade/noticia/2021/04/22/energisa-alerta-sobre-cuidados-com-cabos-partidos-em-periodos-chuvosos.ghtml>>. Acesso em: 2023-09-03.

GHADERI, A.; III, H. L. G.; MOHAMMADPOUR, H. A. High impedance fault detection: A review. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 143, p. 376–388, 2017.

GOMES, D. P.; OZANSOY, C.; ULHAQ, A. High-sensitivity vegetation high-impedance fault detection based on signal's high-frequency contents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 33, n. 3, p. 1398–1407, 2018.

GONZALEZ, C. et al. Directional, high-impedance fault detection in isolated neutral distribution grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 33, n. 5, p. 2474–2483, 2018.

GURURAJAPATHY, S. S.; MOKHLIS, H.; ILLIAS, H. A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 74, p. 949–958, 2017.

KATOCH, S.; CHAUHAN, S. S.; KUMAR, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, Springer, v. 80, p. 8091–8126, 2021.

LIMA, É. M. et al. High impedance fault detection method based on the short-time fourier transform. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Wiley Online Library, v. 12, n. 11, p. 2577–2584, 2018.

MIRJALILI, S. et al. Genetic algorithm: Theory, literature review, and application in image reconstruction. *Nature-Inspired Optimizers: Theories, Literature Reviews and Applications*, Springer, p. 69–85, 2020.

MISHRA, M.; PANIGRAHI, R. R. Taxonomy of high impedance fault detection algorithm. *Measurement*, Elsevier, v. 148, p. 106955, 2019.

MWAKABUTA, N.; SEKAR, A. Comparative study of the IEEE 34 node test feeder under practical simplifications. In: IEEE. *2007 39th North American power symposium*. [S.l.], 2007. p. 484–491.

NAKAGOMI, R. M. *Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, L. G. de et al. Analysis of typical plc pulses for sensing high-impedance faults based on time-domain reflectometry. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 135, p. 107168, 2022.

- OZANSOY, C. Performance analysis of skewness methods for asymmetry detection in high impedance faults. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 35, n. 6, p. 4952–4955, 2020.
- PRASAD, A.; EDWARD, J. B.; RAVI, K. A review on fault classification methodologies in power transmission systems: Part—i. *Journal of electrical systems and information technology*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 48–60, 2018.
- SANTOS, W. et al. Considerações sobre diferentes maneiras de modelagem de faltas de alta impedância. In: *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. [S.l.: s.n.], 2012.
- SANTOS, W. C. d. et al. Uma revisão de modelos clássicos de faltas de alta impedância para efeito de melhoramento. Universidade Federal de Campina Grande, 2011.
- SANTOS, W. C. d. et al. Identificação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- SARWAR, M. et al. High impedance fault detection and isolation in power distribution networks using support vector machines. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, Elsevier, v. 32, n. 8, p. 524–535, 2020.
- SILVA, P. R. da. Técnica alternativa para detecção de faltas de alta impedância. Universidade Federal de Minas Gerais, 1992.
- SILVA, S. et al. High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 154, p. 474–483, 2018.
- SILVEIRA, R. S.; BARONE, D. A. C. Jogos educativos computadorizados utilizando a abordagem de algoritmos genéticos. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática. Curso de Pós-Graduação em Ciências da Computação*, 1998.
- SOUZA, H. C. S. de et al. Optimization of current sensor allocation for high impedance fault detection based on genetic algorithm. In: *Anais do COBEP/SPEC*. Florianópolis: [s.n.], 2023. p. 53.
- THERON, J. J.; PAL, A.; VARGHESE, A. Tutorial on high impedance fault detection. In: IEEE. *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2018. p. 1–23.
- TORQUATO, M. F. *Proposta de implementação paralela de algoritmo genético em fpga*. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2017.
- VEERASAMY, V. et al. Lstm recurrent neural network classifier for high impedance fault detection in solar pv integrated power system. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 32672–32687, 2021.
- WESTER, C. G. High impedance fault detection on distribution systems. In: IEEE. *1998 rural electric power conference presented at 42nd annual conference*. [S.l.], 1998. p. c5–1.
- ZAMANAN, N.; SYKULSKI, J. The evolution of high impedance fault modeling. In: IEEE. *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.], 2014. p. 77–81.

---

ZHOU, D. et al. Review on diagnosis techniques for intermittent faults in dynamic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 67, n. 3, p. 2337–2347, 2019.