

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Localização e Classificação de Falhas em Sistemas de Distribuição com a Presença
de Geração Distribuída Baseado em Sistemas Imunológicos Artificiais**

Dabit Gustavo Sonoda

Itajubá, agosto de 2015

Texto do dorso da capa dura da versão definitiva de ser impresso longitudinalmente e legível do alto para o pé do dorso, de forma a possibilitar a leitura quando o trabalho está no sentido horizontal, com a face voltada para cima.

Dissertação de Mestrado	Dabit Gustavo Sonoda	2015
--------------------------------	-----------------------------	-------------

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Dabit Gustavo Sonoda

**Localização e Classificação de Falhas em Sistemas de Distribuição com a Presença
de Geração Distribuída Através de Sistemas Imunológicos Artificiais**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Antônio Carlos Zambroni de Souza

Co-orientador: Paulo Márcio da Silveira

Agosto de 2015

Itajubá

(Ficha catalográfica)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Dabit Gustavo Sonoda

**Localização e Classificação de Faltas em Sistemas de Distribuição com a Presença
de Geração Distribuída Através de Sistemas Imunológicos Artificiais**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 10 de agosto de 2015, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza (Orientador)

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira

Prof. Dr. Paulo Ribeiro

Dr. Rui Jovita Godinho Correa da Silva

Itajubá

2015

“Não há linguagem mais universal e mais simples, mais livre de erros e de obscuridades, isto é, mais digna de expressar as relações invariáveis das coisas naturais [...] [A matemática] parece ser uma faculdade da mente humana destinada a suplementar a brevidade da vida e a imperfeição dos sentidos.”

Joseph Fourier, *Teoria Analítica do calor*, Discurso preliminar (1822)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Martinho Minoru Sonoda e minha mãe, Sueli Ferreira Sonoda, responsáveis por todo o apoio incondicional durante toda a minha existência, não teria conseguido sem eles.

À minha esposa, Natália Tikasue Depieri Sonoda, principal motivadora e eterna companheira, pelos vários momentos de compreensão por conta de minha ausência.

Aos meus mestres, em especial ao professor Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza que, mesmo diante de tantos percalços, soube me conduzir da melhor maneira possível, um verdadeiro líder.

Ao engenheiro Dr. Rui Jovita Godinho Correa da Silva, principal responsável pela decisão em trilhar esse caminho, meus sinceros agradecimentos.

Aos meus amigos, em especial ao Ms. Daniel Motter, pelas várias conversas de cunho técnico, sua ajuda foi essencial.

A todos os funcionários da Universidade Federal de Itajubá, responsáveis por manter, mesmo que indiretamente, um ambiente propício para o desenvolvimento científico do país.

À CAPES, pelo apoio financeiro durante os dois anos em que essa ajuda foi fundamental para o amadurecimento do trabalho e aquisição de conhecimento.

RESUMO

Sabe-se que uma das atuais tendências do setor de energia é o uso de unidades de geração distribuída, conectadas diretamente ao sistema de distribuição. Um dos efeitos dessa nova topologia é a sua influência em métodos e técnicas de análise que foram projetados baseados em sistemas convencionais. Um exemplo são os métodos de localização de faltas, que podem ter sua eficiência prejudicada em função da inclusão de novas fontes de geração não convencionais. Tendo em vista que a localização de faltas caracteriza-se como uma etapa de suma importância para se manter os índices de confiabilidade dentro de margens aceitáveis, este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia destinada a localização e classificação de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo aplicável tanto a sistemas convencionais quanto a aqueles onde estão presentes os geradores distribuídos. Para tanto, a metodologia foi desenvolvida baseando-se no conceito de Sistema Imunológico Artificial. Essa técnica computacional, relativamente recente, é utilizada para a solução de problemas complexos, e apresenta-se como de grande potencial para cumprir os objetivos dessa dissertação. A metodologia, avaliada considerando vários casos de falta, apresenta um desempenho satisfatório para um amplo espectro de cenários, sendo capaz de estimar o local de falta, bem como o seu tipo e valor de resistência de maneira eficiente.

ABSTRACT

It is known that one of the current trends in the energy industry is the use of distributed generation units, directly connected to the distribution system. One effect of this new topology is its influence on methods and analysis techniques that were designed based on conventional systems. An example are the methods of fault location, which may have hindered their efficiency due to the inclusion of new sources of non-conventional generation. Considering that the fault location is characterized as a step of paramount importance to keep the reliability indices within acceptable margins, this paper aims to present a methodology to fault location and classification in distribution power systems and applies both conventional systems as those where the distributed generators are present. Therefore, the methodology was developed based on the concept of Artificial Immune System. This computational technique, relatively recent, is used to solve complex problems, and presents itself as a great potential to meet the objectives of this dissertation. The methodology evaluated considering various cases of failure, presents a satisfactory performance for a wide range of scenarios, being able to estimate the fault location as well as its type and value of resistance efficiently.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	NOVOS DESAFIOS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	12
1.2.	JUSTIFICATIVAS	13
1.3.	OBJETIVOS	15
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2.	FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	17
2.1.	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	17
2.2.	MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	19
2.2.1.	Métodos baseados em impedância ou frequência fundamental	20
2.2.2.	Métodos de componentes de alta frequência ou ondas viajantes...	23
2.2.3.	Métodos baseados em conhecimento.....	25
2.3.	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM A PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	27
2.3.1.	Modelo tradicional da indústria de energia elétrica	27
2.3.2.	Novo conceito geração-demanda em sistemas de potencia	29
2.3.3.	Geração distribuída	29
2.4.	MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO CONSIDERANDO GERADORES DISTRIBUÍDOS	31
3.	SISTEMAS IMUNOLÓGICOS	32
3.1.	SISTEMAS IMUNOLÓGICOS NATURAIS	32
3.1.1.	Seleção Negativa.....	33
3.1.2.	Rede Imunológica	34
3.1.3.	Seleção Clonal.....	35
3.2.	SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS	37

4.	MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS BASEADO EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS.....	39
4.1.	APRESENTAÇÃO GERAL.....	39
4.2.	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	40
5.	MODELO DE SIMULAÇÃO.....	50
5.1.	SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO IEEE34	50
5.2.	IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	53
5.2.1.	Premissas.....	53
5.2.2.	Validação do modelo de simulação	55
5.3.	INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO MODELO	56
6.	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	60
6.1.	FUNCIONAMENTO DO MÉTODO.....	60
6.1.1.	Simulação de falta.....	60
6.1.2.	Aplicação de método de localização e classificação de faltas	61
6.2.	RESULTADOS	69
6.2.1.	Avaliação de robustez	69
6.2.2.	Avaliação da influência do local da falta	74
7.	CONCLUSÕES	76
7.1.	CONCLUSÕES GERAIS.....	76
7.2.	LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	77
	REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

O capítulo introdutório inicia-se com uma abordagem sobre a atual tendência de mudança da indústria de energia elétrica e os novos desafios que esse novo paradigma trás aos engenheiros. Também serão tratadas as justificativas e objetivos que o presente trabalho pretende alcançar. Por fim, apresenta-se como o trabalho será estruturado.

1.1. NOVOS DESAFIOS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

No modelo atual do sistema elétrico, todos os elementos que envolvem o processo de utilização da energia elétrica seguem características bem definidas. Nesse contexto, a geração normalmente encontra-se próxima das fontes primárias (foz de grandes bacias, próximas a minas de carvão, etc.) e longe dos centros de carga. A eletricidade é entregue aos consumidores através de extensos sistemas de transmissão e distribuição, compreendendo redes de alta, média e baixa tensão. Nesse modelo, a potência é escoada de maneira radial, sendo transmitida unidirecionalmente, desde o sistema de geração até os consumidores finais.

Dessa forma, todos os sistemas que constituem cada uma dessas etapas (geração, transmissão e distribuição) são projetados para operar segundo essa filosofia, ou seja, operam baseados na premissa de que o fluxo de potência é transmitido em uma única direção. Além disso, tais sistemas devem ser sempre mantidos segundo critérios de confiabilidade e sustentabilidade no fornecimento.

Com o crescimento natural da demanda e o progressivo esgotamento das fontes primárias de energia próximas aos centros de carga, o atendimento à demanda torna-se cada vez mais oneroso, uma vez que os complexos de geração tornam-se cada vez mais distantes, implicando na construção de extensos sistemas de transmissão.

Em vista desse panorama de demanda crescente e escassez de novas fontes convencionais, a indústria de energia elétrica encontra-se diante de um novo paradigma na relação carga-demanda. Objetivando sempre a entrega da energia ao menor custo, uma alternativa que se mostra atrativa é a de aproximar a geração da carga, eliminando

ou minimizando os investimentos operacionais e em transmissão que seriam necessários no modelo convencional de geração.

É nesse contexto que está inserida a geração distribuída (GD), caracterizada por unidades com pequenos blocos de geração, podendo estar localizados muitas vezes na própria rede de distribuição de energia elétrica. Assim como em outras partes do mundo onde a taxa de crescimento desse tipo de geração reforça a tendência futura, no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), já possui, desde 2008, procedimentos que permitem o acesso de micro e minicentrals geradoras ao sistema de distribuição [1].

Embora apresente uma gama de benefícios, sistemas com a presença de geração distribuída tem como efeito principal a alteração da característica unidirecional da corrente, acarretando em novos desafios operacionais. Além dos sistemas de proteção e equipamentos, projetados baseados na filosofia unidirecional, técnicas de controle e identificação também são drasticamente afetadas quando a geração distribuída é inserida ao sistema.

É nesse contexto que o presente trabalho se insere, procurando apresentar uma metodologia para a localização e classificação de faltas em sistemas de distribuição, mesmo com a existência de unidades de geração distribuída conectadas ao sistema de distribuição. Busca-se assim, um método robusto, que seja imune às diferentes características de topologia e configuração da rede, permitindo um diagnóstico confiável e rápido, minimizando os prejuízos decorrentes de interrupções causadas por faltas no sistema de distribuição.

1.2. JUSTIFICATIVAS

As redes de distribuição de energia são, em geral, constituídas por alimentadores aéreos, ou seja, cabos não isolados, instalados em postes, estando ao lado de ruas, avenidas, vegetação e residências. Em função dessa topologia, a quantidade de defeitos ou acidentes que resultam em faltas ao sistema é maior que em sistemas de transmissão [2]. Quando essas faltas ocorrem, o sistema de proteção atua de tal forma à elimina-las, buscando-se a interrupção na menor porção da rede possível, ou seja, retira-se o alimentador ou, quando possível, apenas parte dele. Em seguida, as equipes de

manutenção das concessionárias partem para localizar e reparar a falta ocorrida e, somente após esse procedimento é possível o reestabelecimento do sistema.

Dada a característica predominantemente radial dos sistemas de distribuição, uma única falta ocorrida poderá ter como consequência a interrupção no fornecimento de um grande número de consumidores, após a atuação do sistema de proteção. Nesse caso, o tempo e a frequência em que tais consumidores ficaram sem energia são contabilizados ao longo do mês e a partir desses valores são calculados os índices de confiabilidade adotados pela agência reguladora, podendo-se ter como resultado penalidades às concessionárias [3].

Diante disso, torna-se fundamental a correta estimativa do local onde a falta ocorreu, permitindo que o deslocamento das equipes de manutenção seja feito da maneira mais rápida possível, minimizando assim os possíveis custos operacionais. Atualmente, diversas técnicas são empregadas para realizar a estimativa do local de falta, e podem ser classificadas em três grupos: métodos baseados em frequência fundamental (impedância), métodos de altas frequências (ondas viajantes) e métodos baseados em conhecimento (redes neurais, sistemas híbridos, etc.). Dentre esses, o mais utilizado é o de frequência fundamental, baseado no cálculo da impedância de sequência positiva, a partir dos sinais de corrente e tensão, coletados normalmente na saída do alimentador [4].

No entanto, é importante notar que a precisão de tais métodos sofre influência direta de três fatores principais: condições desbalanceadas, resistência de falta e a existência de múltiplas fontes de geração na rede. Quando tais métodos são aplicados a sistemas com uma ou mais dessas características, podem se mostrar ineficientes ou até mesmo inutilizáveis, dependendo do grau que se apresentam [5].

Dessa forma, faz-se necessário um método que seja capaz apresentar resultados satisfatórios, mantendo-se a sua precisão, mesmo que o sistema apresente condições de desbalanço, com diferentes resistências de faltas e ainda que contemple a existência de múltiplas fontes alimentando a rede de distribuição. É nesse contexto em que o presente trabalho se insere, considerando a tendência atual da indústria de energia elétrica, onde a possibilidade de conexão de unidades de geração diretamente a rede de distribuição já é uma realidade, propor um método que permita a estimativa do local e a classificação

da falta de maneira confiável e robusta, permitindo que os índices de confiabilidade se mantenham elevados.

1.3. OBJETIVOS

Busca-se com o presente trabalho suprir as limitações encontradas nos métodos de localização de faltas comumente utilizados, que não contemplam ou se mostram imprecisos em redes de distribuição com a presença de geração distribuída.

Objetiva-se o desenvolvimento de um método que seja adequado para a localização e classificação de faltas, considerando a possibilidade de existência de unidades de geração conectadas ao sistema de distribuição, além do alimentador principal. Ou seja, a ferramenta deverá ser robusta de tal forma que apresente resultados satisfatórios considerando estes dois cenários (com ou sem a geração distribuída).

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Como forma de cumprir o objetivo proposto, inicialmente o trabalho aborda, no Capítulo 2, aspectos relacionados ao sistema de distribuição, apresentação dos métodos mais comuns utilizados em localização de faltas em sistemas de distribuição e a influência causada pela inclusão de geração distribuída em redes de distribuição.

A apresentação dos Sistemas Imunológicos Artificiais, metodologia utilizada por trás da ferramenta proposta, é feita no Capítulo 3, com uma descrição de seus fundamentos e potencialidades. Alguns trabalhos que utilizam esse conceito também são apresentados.

O método de localização de faltas em sistemas de distribuição com a presença de geração distribuída é apresentado no Capítulo 4. Nesse ponto, será detalhado o funcionamento e características do método proposto.

Já no Capítulo 5 é apresentado o modelo de simulação utilizado no desenvolvimento e validação do método. Também é tratado a inclusão da geração

distribuída ao modelo, completando assim o desenvolvimento da ferramenta de simulação.

Os resultados e simulações são concentrados no Capítulo 6, onde a ferramenta desenvolvida no presente trabalho poderá ser avaliada.

Finalmente, o Capítulo 7 concentra todo o conhecimento e considerações que foram resultados do trabalho, analisando-se também, as limitações e avaliando as perspectivas para trabalhos futuros, dentro da mesma linha do que foi desenvolvido.

2. FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Serão apresentados os conceitos e características de sistemas de distribuição, especificamente no que diz respeito à ocorrência de faltas. Serão analisados os principais métodos de localização comumente utilizados. Os problemas decorrentes de um novo paradigma para a relação carga-geração são abordados ao final do capítulo.

2.1. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Sistema de distribuição de energia elétrica é o nome dado ao conjunto de equipamentos responsáveis pela entrega de energia elétrica aos consumidores finais, operando com tensões que podem chegar a algumas dezenas de quilovolts. Comparativamente aos sistemas de geração e transmissão, pode ser entendido como sendo o que se localiza geograficamente mais próximo à carga. Nesse caso, a energia é entregue aos consumidores através de linhas de distribuição, também chamados de alimentadores. Geralmente essas linhas são trifásicas, radiais, com tensões entre 10kV e 23kV. No entanto, é comum que o alimentador principal apresente ramificações e subramificações, a fim de atender a cargas mais distantes, podendo ser caracterizadas por linhas trifásicas, bifásicas ou monofásicas. Tal característica, somada ao caráter desequilibrado das cargas, confere um alto nível de complexidade a esses sistemas. Além disso, em diversos pontos do alimentador estão alocados transformadores, responsáveis pela redução do nível de tensão para os consumidores alimentados em baixa tensão, usualmente 220V ou 380V.

A Figura 1 apresenta um sistema de distribuição usual onde é possível observar a topologia encontrada neste tipo de sistema. Neste caso, nota-se a presença de linhas monofásicas, bifásicas e trifásicas, aéreas e subterrâneas. Também existem elementos responsáveis pelo controle do sistema como transformadores reguladores de tensão, seccionadoras, transformadores abaixadores monofásicos e trifásicos.

Como apresentado anteriormente, os sistemas de distribuição estão sujeitos a perturbações oriundas de causas não controláveis. Assim, quando uma falta ocasiona uma interrupção no fornecimento de energia, torna-se fundamental a utilização de



Figura 1 – Exemplo de sistema de distribuição comum.
Fonte: Kersting (2011)

metodologias que minimizam o tempo de interrupção. Dada a grande dimensão dos sistemas de distribuição, a principal ferramenta utilizada nesses casos é a estimação do local de falta. Dessa forma, antes do deslocamento da equipe de manutenção, a informação do provável local onde o defeito está inserido reduz consideravelmente a indisponibilidade do sistema, ficando esse tempo sujeito praticamente à agilidade da equipe em executar o serviço e reestabelecer o sistema.

A seguir, serão apresentadas as principais técnicas utilizadas para a localização de faltas em sistemas de distribuição, cada qual com sua particularidade, vantagens e desvantagens.

2.2. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O principais objetivos das concessionárias de energia é o suprimento de eletricidade com qualidade e confiabilidade, de maneira a manter a satisfação dos consumidores e o atendimento à legislação vigente. Nesse aspecto, um dos maiores desafios enfrentados está relacionado à ocorrência de faltas no sistema de distribuição. Uma vez que tais eventos não podem ser completamente eliminados por se tratar de fatores com causas incontrolláveis (condição adversa de tempo, falha de equipamentos, contatos de animais, erros humanos, etc.) a única possibilidade é a minimização dos seus impactos.

As faltas podem ocorrer em qualquer local da rede de distribuição e podem fazer com que o suprimento de eletricidade seja interrompido. Para quantificar esse fenômeno, os agentes regulatórios trabalham com os indicadores de frequência de ocorrência (FIC) e da duração (DIC) das interrupções. Uma vez que as faltas não podem ser evitadas, a sua rápida e correta localização torna-se um ponto crucial para a redução do FIC e DIC.

No passado, a localização de faltas era realizada através de abordagens convencionais onde, uma vez recebida a reclamação do consumidor, uma equipe era deslocada para localizar o local de falta no alimentador suspeito e proceder com a posterior eliminação da mesma. Devido ao elevado tempo dispensado para tal

procedimento, diversos métodos para a localização de faltas foram desenvolvidos objetivando a diminuição do tempo desse processo.

Os métodos atuais de localização de faltas podem ser implementados de três maneiras:

- Dispositivo *stand-alone*: o localizador de faltas possui um *hardware* e um *software* exclusivo para a execução dessa tarefa;
- Em um relé numérico de proteção: nesse caso, tem-se o localizador como uma sub-função do relé de proteção;
- Como algoritmo independente: um algoritmo é executado em um equipamento externo (por exemplo, um computador) utiliza-se apenas das medições de outros equipamentos (relés, registradores digitais, etc.).

Um grande número de métodos de detecção de faltas utilizados em sistemas de distribuição foram desenvolvidos e diversos outros encontram-se em estudo atualmente. De uma maneira geral, tais métodos podem ser divididos nas seguintes categorias:

- Métodos baseados em impedância e outros métodos de frequência fundamental;
- Métodos de componentes de alta frequência e de ondas viajantes;
- Métodos baseados em conhecimento.

Cada um dos métodos acima citados possuem suas características próprias, sendo que, seus benefícios e limitações devem ser avaliados sob a luz da aplicação a que se destina e os objetivos a serem alcançados.

A seguir serão apresentados os principais métodos de detecção de faltas em sistemas de distribuição, apontando as suas vantagens e desvantagens.

2.2.1. Métodos baseados em impedância ou frequência fundamental

Nesse método, em geral são utilizadas as medidas de tensão e corrente, monitorados na subestação. A partir desses dados, é possível determinar a impedância vista da subestação até o ponto de falta e, com as informações dos cabos dos alimentadores, determinar a distância da falta.

O método de [7] apresenta uma técnica de localização aplicada a linhas de transmissão curtas, contendo cargas laterais e intermediárias, representadas por uma impedância agregada à frente da falta. Esse método baseia-se na determinação da impedância tanto da fonte quanto da carga, utilizando-se as medidas pré e durante-falta, da tensão e da corrente. Apesar de não explicitar, o método utiliza a teoria de componentes simétricas, o que pode ser uma fonte de erros em sistemas com linhas de distribuição (assimétricas), além de não considerar o efeito capacitivo. O método também não trata da existência de múltiplas soluções, encontradas nos casos em que o sistema de distribuição é relativamente ramificado, ou seja, a resposta poderia representar dois ou mais pontos do sistema que, visto da subestação, teriam a mesma impedância.

Já em [8], um método semelhante é apresentado, tendo um caráter mais prático, pois considera a sua aplicação em dispositivos comerciais, baseando-se nas medidas de tensão e corrente originadas de *Digital Fault Recorders*. Nesse caso, fica evidente a dependência do método com a exatidão dos instrumentos de medição utilizados. Além disso, o método é dependente dos parâmetros exatos dos cabos utilizados no sistema.

Assim como os anteriores, o método de [9] baseia-se na estimação de faltas utilizando as medidas de tensão e corrente. Ele é considerado um dos mais precisos métodos baseados em impedância. Embora trate de situações em que o sistema possui ramificações, seu equacionamento é feito considerando linhas que não consideram o efeito capacitivo. Dessa forma, embora funcione bem em alguns sistemas, não se mostra preciso para todos os casos.

A Tabela 1 resume as características dos métodos baseados em impedância apresentados.

Tabela 1 - Requisitos dos métodos baseados em impedância.

	Método de localização		
	[7]	[8]	[9]
Requisitos de dados			
• Dados da subestação (arranjo)	X	X	X
• Dados do alimentador (impedâncias)	X	X	X
• Sinais de tensão (medidas)	X	X	X
○ Pré falta	X	X	X
○ Durante a falta	X	X	X
○ Pós falta	-	-	-
• Sinais de corrente (medidas)	X	X	X
○ Pré falta	X	X	X
○ Durante a falta	X	X	X
○ Pós falta	-	-	-
• Componentes simétricas	X	X	X
• Componente fasorial	-	-	-
• Domínio do tempo	-	-	-
• Componentes de alta frequência	-	-	-
Requisitos de topologia e modelagem			
• Modelo da linha	Curta	Curta	Longa
• Modelo de carga	Z=constante	Z=constante	Z = f(V)
• Não-homogeneidade	-	X	X
• Ramificações	-	-	X
• Transformadores	-	X	X
• Comunicação	-	-	-

De uma maneira geral, a precisão dos métodos baseados em impedância é dependente da precisão dos parâmetros e da característica da linha e do valor da carga. Além disso, fatores como rede desbalanceada, sistemas malhados e resistência de falta também influenciam em seu desempenho. O caso com múltiplos pontos possíveis de falta é, de maneira geral, tratado monitorando-se a atuação dos dispositivos de proteção.

Para sistemas que não dispõem de monitoramento on-line, essa questão de múltiplas faltas possíveis se mostra insolúvel.

Em suma, os métodos apresentam como vantagem principal o baixo custo de implementação, pois só utilizam a informação dos medidores da subestação, tais como IEDs (em sistemas radiais). Em contrapartida, como desvantagens, pode-se citar a dificuldade no tratamento de múltiplos pontos de falta (em sistemas malhados) e a sua eficiência atrelada a características e parâmetros da linha, da carga, do desbalanceamento e da resistência de falta.

2.2.2. *Métodos de componentes de alta frequência ou ondas viajantes*

A técnica de ondas viajantes baseia-se no conceito de transmissão e reflexão de ondas e consiste basicamente no cálculo do tempo que uma onda gerada leva para percorrer o percurso subestação - ponto de falta - subestação.

A técnica apresentada por [10] baseia-se na componente transitória de alta frequência da tensão. O tempo desse sinal viajante é utilizado para o cálculo da distância em que a falta ocorreu. Embora seja totalmente imune ao tipo, resistência e ângulo de falta, a precisão do método está diretamente relacionada com a taxa de amostragem do equipamento de medição. Além disso, o método também não contempla a existência de ramificações, ou seja, não consegue tratar a existência de múltiplas soluções.

Utilizando-se dos sinais transitórios das correntes e tensões durante a falta, o método apresentado por [11] levanta a possibilidade de utilização de técnicas de localização de sistemas de transmissão em sistemas de distribuição. O método, embora considere a existência de ramificações na rede, necessita de mais estudos para validação de sua confiabilidade.

A proposta de [12] é a utilização de transformadas *Wavelet* para a localização de faltas em sistemas de distribuição com cargas distribuídas. No trabalho, foram consideradas cargas distribuídas ao longo de um alimentador principal. Embora tenha se mostrado viável para o caso teste abordado, o método é dependente de parâmetros da rede e da instalação de equipamentos adicionais na subestação como GPS e *Digital Fault Recorders*. Além disso, o sistema apresentado é bastante simplista, não garantindo a sua funcionalidade em sistemas mais complexos.

Um resumo dos requisitos dos métodos de alta frequência apresentados são indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos dos métodos baseados em alta frequência.

	Método de localização		
	[10]	[11]	[12]
Requisitos de dados			
• Dados da subestação (arranjo)	X	X	X
• Dados do alimentador (impedâncias)	-	-	X
• Sinais de tensão (medidas)	X	X	X
○ Pré falta	-	-	-
○ Durante a falta	X	X	X
○ Pós falta	-	-	-
• Sinais de corrente (medidas)	-	X	-
○ Pré falta	-	-	-
○ Durante a falta	-	X	-
○ Pós falta	-	-	-
• Componentes simétricas	-	-	-
• Componente fasorial	-	-	-
• Domínio do tempo	X	X	X
• Componentes de alta frequência	X	X	X
Requisitos de topologia e modelagem			
• Modelo da linha	Longa	Longa	Longa
• Modelo de carga	Z=constante	Z=constante	Z=constante
• Não-homogeneidade	-	-	-
• Ramificações	-	X	-
• Transformadores	X	X	X
• Comunicação	-	-	X

Embora os métodos de alta frequência possuam a vantagem de serem imunes as características de falta (tipo, resistência e ângulo), possuem uma limitação inerente quando aplicados a sistemas de distribuição: incapacidade de manter a eficiência diante

da existência de vários ramos, além do alimentador principal. Além disso, para aplicação desse tipo de técnica, se faz necessário a utilização de equipamentos com alta taxa de amostragem, o que pode acarretar em custos adicionais para a operação, já que os dispositivos comumente utilizados não contemplam essa características, necessitando serem substituídos. E como última consideração, tais técnicas não consideram a característica encontrada em alguns sistemas de distribuição que é a existência de cabos com diferentes constituições.

2.2.3. Métodos baseados em conhecimento

Os métodos baseados em conhecimento muitas vezes são utilizados como complemento aos dois métodos já citados. Seu grande apelo é a possibilidade de reconhecimento de padrões de funções não lineares, contornando algumas das limitações encontradas nos demais métodos. Além disso, algumas técnicas baseadas em conhecimento apresentam baixo custo computacional, podendo ser aplicadas em mesmo em sistemas em tempo real na subestação.

Em [13], a utilização de transformadas *Wavelets* junto a redes *Neuro-Fuzzy* adaptativas para a classificação de padrões em sinais de corrente apresentou resultados satisfatórios. O grande apelo da técnica desenvolvida no trabalho é a dispensa da necessidade da modelagem elétrica da rede, o que caracteriza um baixo custo computacional. No entanto, existe a necessidade de treinamento da rede para cada novo sistema de distribuição.

Através de técnicas de autovalores e redes neurais artificiais, [14] apresenta uma metodologia de localização capaz de classificar e localizar faltas em sistemas de distribuição. Utilizando os autovalores das correntes, resultantes de uma transformação $\alpha\beta\theta$ (*Clarke-Concordia*), como entradas da rede neural artificial, a ferramenta é capaz de estimar a distancia em que a falta ocorreu. O sistema utilizado no trabalho, no entanto, é bastante simplista, não possibilitando a comprovação de sua eficiência para sistemas mais realistas.

O trabalho de [15] propõe a utilização de algoritmos de aprendizagem para análise de multivariáveis como forma de estimação de faltas. São utilizadas as medições dos sinais de tensão e corrente pré e durante a falta. Além disso, a técnica necessita das informações de configuração do sistema, parâmetros de linhas e dados dos

equipamentos de medição instalados na subestação. A performance média apresentada foi de 83% de acerto na zona de falta.

Uma comparação dos requisitos relacionados aos três métodos baseados em conhecimento é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Requisitos dos métodos baseados em conhecimento.

	Método de localização		
	[13]	[14]	[15]
Requisitos de dados			
• Dados da subestação (arranjo)	X	X	X
• Dados do alimentador (impedâncias)	-	-	-
• Sinais de tensão (medidas)	-	-	X
○ Pré falta	-	-	X
○ Durante a falta	-	-	X
○ Pós falta	-	-	-
• Sinais de corrente (medidas)	X	X	X
○ Pré falta	X	X	X
○ Durante a falta	X	X	X
○ Pós falta	X	-	-
• Componentes simétricas	-	-	-
• Componente fasorial	-	-	X
• Domínio do tempo	X	X	-
• Componentes de alta frequência	-	-	-
Requisitos de topologia e modelagem			
• Modelo da linha	Longa	Curta	Longa
• Modelo de carga	$Z = f(V)$	$Z = \text{constante}$	$Z = f(V)$
• Não-homogeneidade	X	-	X
• Ramificações	X	-	X
• Transformadores	X	X	X
• Comunicação	-	-	-

A tendência atual se concentra no desenvolvimento de novas técnicas relacionadas ao método baseado em conhecimento. Uma vez que as limitações

encontradas nos métodos de frequência fundamental ou alta frequência são detectadas, torna-se conveniente a utilização de ferramentas que possibilitem o tratamento desses dados já existentes, buscando-se melhorar a eficiência e garantir a robustez na localização e classificação de faltas. Em suma, os métodos baseados em conhecimento ampliam a abrangência dos demais métodos, permitindo uma maior aplicabilidade a sistemas mais complexos.

O método proposto no presente trabalho irá prosseguir por esse caminho, utilizando as técnicas baseadas em conhecimento, tendo como entradas sinais de tensão obtidos tradicionalmente para métodos baseados em frequência fundamental. No entanto, pretende-se aplica-lo a um sistema de distribuição relativamente complexo, onde as variáveis de influencia poderão ser consideradas, permitindo uma validação mais consistente do método.

2.3. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM A PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.3.1. *Modelo tradicional da indústria de energia elétrica*

Até os dias atuais, a grande maioria dos sistemas de potência operam gerando o fornecendo a eletricidade baseando-se nas seguintes considerações [16, 17]:

- Geração em grandes plantas de produção, geralmente localizadas próximas a fontes primárias de energia e distante dos centros de carga;
- A energia é entregue aos consumidores através de sistemas de distribuição com características passivas, envolvendo redes de alta, média e baixa tensão;
- As redes de distribuição são projetadas para operarem radialmente. O fluxo de potência é unidirecional, ocorrendo das tensões mais elevadas para as mais baixas, ao longo dos alimentadores;
- Nesse processo, existem basicamente três níveis (cada um representando um sistema diferente) até que a energia seja entregue ao consumidor final.

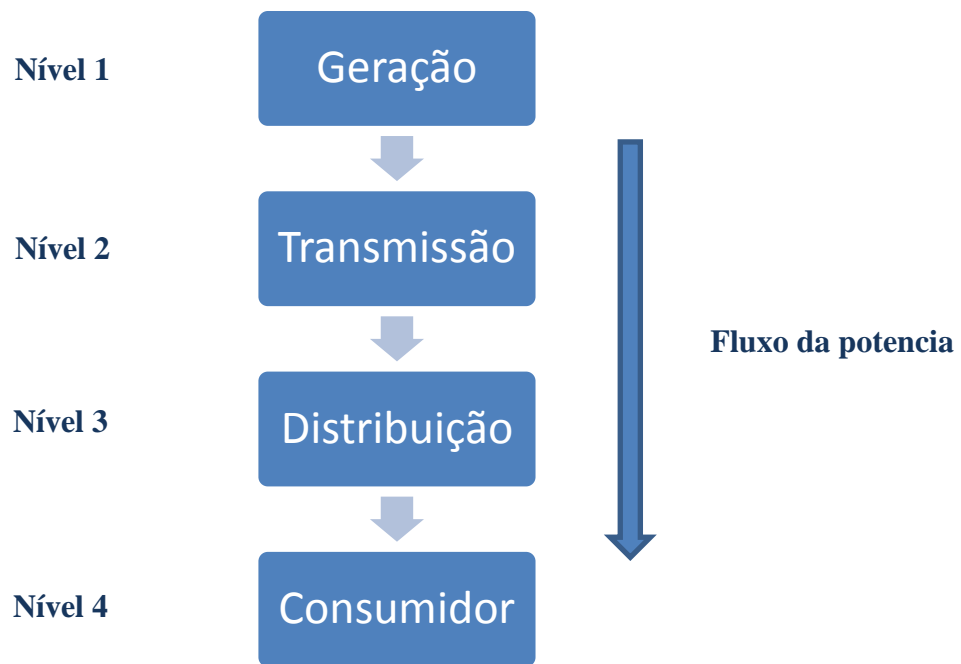


Figura 2 - Conceito tradicional da indústria de energia elétrica.

Nesse contexto, grandes plantas de produção constituem o primeiro nível, estando muitas vezes distantes dos consumidores finais. O segundo nível tem como característica a transmissão de grandes blocos de energia através de longas linhas de transmissão, compreendendo ainda equipamentos como transformadores, mecanismos de controle de tensão, sistemas de proteção, entre outros. Já no terceiro nível, estabelece-se o ponto de ligação do sistema base com os consumidores finais. Uma vez que está sujeito à inúmeros fatores incontroláveis, esse último apresenta grande importância para o sistema de potencia já que a sua confiabilidade está diretamente ligada à qualidade de energia entregue ao consumidor final.

Para atendimento ao crescimento natural da carga, sistemas tradicionais incrementam o primeiro nível dessa cadeia, tendo como reflexo secundário a necessidade de expansão também do sistema de transmissão e distribuição.

No entanto, o esgotamento das fontes primárias somado aos onerosos custos e elevados períodos de construção relacionados aos grandes empreendimentos para incremento de novos blocos de geração convencional tem levado a busca por alternativas para lidar com o problema de crescimento da demanda. É nesse contexto que surgem novos conceitos em sistemas de potencia.

2.3.2. Novo conceito geração-demanda em sistemas de potencia

Atualmente, a evolução tecnológica, políticas ambientais mais rigorosas e a abertura de mercados de energia para fontes não convencionais de geração, promovem novas condições para o setor de geração de energia [17]. Nessa nova concepção, o incremento de geração não se limita somente ao primeiro nível da cadeia. Nesse novo paradigma, a demanda não é suprida apenas pela geração centralizada, característica do modelo tradicional, mas também a partir da chamada geração distribuída.

A Figura 3 apresenta a topologia resultante dessa abordagem.

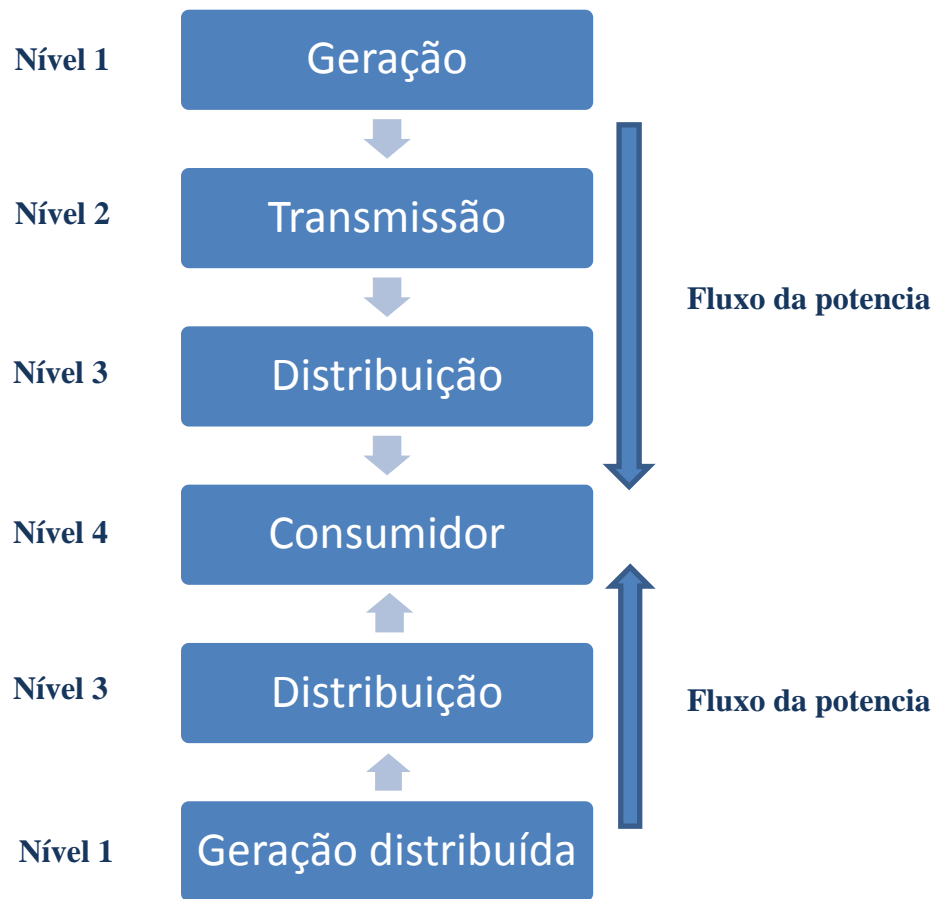


Figura 3 - Novo conceito da indústria de energia elétrica.

2.3.3. Geração distribuída

O crescente número de geradores conectados em níveis de baixa e média tensão em sistemas de distribuição aponta para a nova tendência na relação geração-demanda.

Tais geradores são consideravelmente menores do que os tradicionais, utilizados em grandes unidades de geração (usinas nucleares, usinas hidrelétricas, grandes centrais termelétricas, etc.).

Um panorama geral, listando as principais vantagens e desvantagens relacionadas à geração distribuída, é apresentada a seguir [18]:

- Vantagens:
 - Diminuição das perdas. Com a característica de geradores dispersos alimentando cargas locais, as perdas resistivas associadas podem ser diminuídas;
 - Melhora no perfil de tensão. A alocação de geradores ao longo dos alimentadores, principalmente nos predominantemente radiais, podem contribuir para um perfil de tensão mais uniforme;
 - Melhora na estabilidade de tensão. A partir do conhecimento das barras críticas do sistema de distribuição e com a alocação de geradores distribuídos nesses locais, é possível aumentar a estabilidade de tensão;
 - Aumento da confiabilidade. Alguns sistemas de distribuição possuem conjuntos de equipamentos e sistemas que possibilitam uma maior tolerância à falha, justamente por apresentarem suprimento de geração para o caso de contingências.
- Desvantagens:
 - A utilização de conversores de potência para a conexão de geradores distribuídos podem ser fontes de harmônicas para o sistema;
 - Em casos de falha ou insuficiência no controle da unidade de geração distribuída, pode-se provocar desbalanço ou flutuações de tensão prejudiciais ao sistema de distribuição;
 - Dependendo do nível de penetração e da natureza do gerador, a geração distribuída poderá aumentar o nível de perdas;
 - A potência de curto circuito da rede de distribuição é alterada com a inclusão da geração distribuída. Além disso, a coordenação das proteções poderá ser afetada, dependendo das características da unidade de geração (como as proteções foram projetadas considerando uma corrente de falta unidirecional e a presença de geradores pode aumentar ou diminuir essas correntes, em alguns casos, as proteções podem ser afetadas).

2.4. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO CONSIDERANDO GERADORES DISTRIBUÍDOS

Com o aumento da penetração de geração distribuída, o sistema de distribuição aumenta em complexidade, tendo como efeito, a influência nas técnicas e metodologias de controle, operação e proteção, utilizadas no sistema tradicional. Assim, diversos trabalhos vem sendo conduzidos, como por exemplo, nas áreas de proteção, controle de tensão e planejamento, com o objetivo de contornar os novos desafios oriundos da GD.

O trabalho desenvolvido por [19] apresenta um método de localização de faltas considerando a presença de geração distribuída, utilizando variáveis de frequência fundamental. No entanto, tal ferramenta é aplicável somente quando as unidades de geração estão conectadas ao final do alimentador, tornando o método restritivo.

Através de um método baseado em Redes de Petri, [20] apresenta uma ferramenta capaz de localização de faltas em sistemas de distribuição com a presença de geradores distribuídos. Embora apresente resultados relativamente confiáveis, existe uma dependência de um grande número de sensores, o que pode torna-lo impraticável em algumas situações onde tais dispositivos não estejam disponíveis.

A utilização de redes neurais do tipo Perceptron (MPL) é proposta por [21] para a localização de faltas em sistemas com geração distribuída. O método necessita que o sistema seja dividido em zonas radiais, cada qual sendo protegida através de um disjuntor. Devido a necessidade de modificação da rede, o método pode não ser viável em várias situações onde a reconfiguração das proteções não sejam possíveis.

Seguindo essa mesma motivação e linha de pesquisa, o presente trabalho pretende apresentar uma ferramenta capaz de localizar e classificar faltas em sistemas de distribuição, considerando a presença de geradores distribuídos. A ideia, nesse caso, é permitir que os índices de confiabilidade do sistema possam ser mantidos, através da diminuição do tempo de interrupção provocados por faltas no sistema. Além disso, pretende-se que a ferramenta seja robusta o suficiente para manter a eficiência mesmo em casos de inexistência de geradores distribuídos. Por fim, espera-se que a solução final seja facilmente aplicável, de tal forma que necessite de um número reduzido de informações do sistema ou equipamentos adicionais, tornando sua utilização factível em um grande número de sistemas.

3. SISTEMAS IMUNOLÓGICOS

A introdução e definições, relacionados a teoria de Sistemas Imunológicos Artificiais é tratado no presente capítulo. Inicialmente, apresenta-se o Sistema Imunológico Natural, de onde o conceito computacional se originou. Na sequência, apresenta-se uma pesquisa bibliográfica sobre algumas áreas em que esses conceitos são comumente utilizados, apontando a oportunidade de utiliza-los como ferramenta de localização e classificação de faltas em sistemas de distribuição.

3.1. SISTEMAS IMUNOLÓGICOS NATURAIS

Todos os organismos vivos apresentam algum tipo de mecanismo de defesa contra ataques externos. O surgimento dos vertebrados, a partir do processo evolutivo, levou também ao desenvolvimento do sistema imunológico desse subfilo.

O sistema imunológico dos vertebrados é composto por uma variedade de moléculas, células e órgãos, espalhados por todo o corpo. Nesse caso, não existe um órgão central que controla o funcionamento desse sistema de defesa. A principal tarefa do sistema imunológico consiste em examinar o organismo em busca de células defeituosas do próprio corpo (por exemplo, câncer e células tumorais) e doenças causadas por agentes externos (por exemplo, vírus e bactérias). Todo e qualquer elemento reconhecido pelo sistema imunológico é chamado de *antígeno*, podendo ser classificado como *próprio* ou *não-próprio*. O sistema de defesa deve ser capaz de distinguir esses dois tipos de elementos, por um processo chamado de *distinção próprio/não próprio*, o qual consiste, basicamente, em uma forma de reconhecimento de padrões.

Em sistemas biológicos, o reconhecimento de padrões é possível graças a presença das chamadas *moléculas receptoras*, presentes na superfície das células imunológicas. Os dois dos maiores grupos de células imunológicas são conhecidos como *linfócitos-B* e *linfócitos-T*, os quais são bastante similares, diferenciando-se em como realizam o reconhecimento de *antígenos*. Os *linfócitos-B* são capazes de reconhecerem *antígenos* de maneira livre (por exemplo, na corrente sanguínea),

enquanto os *linfócitos-T* necessitam de uma célula receptora para realizar o reconhecimento. Para ambos os casos, a detecção de um *antígeno* ocorre quando a ligação entre os receptores das *células de defesa* e o *antígeno* caracteriza determinada afinidade. Ou seja, quando a afinidade entre tais elementos é igual ou maior que um valor limite, o reconhecimento do *antígeno* pela *célula de defesa* é ativado e, uma vez detectada a existência do agente externo, o mesmo pode ser então combatido.

No entanto, os receptores utilizados por ambas as células possuem a característica comum de serem gerados a partir de processos aleatórios [25]. Como não há, no organismo, a presença de *células imunológicas* para todos os tipos de *antígenos*, as características de resposta do sistema estão condicionadas a um processo de seleção, que consiste basicamente em mecanismos de clonagem, maturação e análise de afinidade das células de defesa, onde, após determinado número de gerações, a resposta do sistema imunológico começa a se mostrar satisfatória.

Embora o sistema imunológico funcione a partir dos elementos já apresentados, não existe apenas um mecanismo pelo qual o processo imunológico é executado. Basicamente, isso é feito a partir de três mecanismos diferentes, conhecidos como: Seleção Negativa, Rede Imunológica e Seleção Clonal [25]. Tais processos serão descritos a seguir.

3.1.1. Seleção Negativa

Os *linfócitos-T*, podem ser mantidos no Timo, órgão linfático responsável pela maturação desses elementos. Em função de uma barreira eficiente, esse órgão não permite a presença de *antígenos não-próprios* em seu interior. No entanto, os *antígenos próprios* presentes no timo, somado ao processo de maturação produzem, em determinado momento, *linfócitos-T* capazes de reconhecer os antígenos próprios do Timo. Nesse momento, esses *linfócitos-T* são eliminados do Timo, e liberados na corrente sanguínea em um processo chamado de Seleção positiva. Ocorre que, tais *linfócitos-T* eliminados, são tolerantes a qualquer outro elemento do tipo *próprio*, pois possuem a capacidade de reconhecer somente os antígenos presentes no Timo. No entanto, tais elementos se mostram promissores para a detecção dos *antígenos não-próprios*, representando o objetivo final do mecanismo [26].

Da perspectiva de processamento de informação, a seleção negativa apresenta uma alternativa a paradigma, no qual o reconhecimento de padrões ocorre através do armazenamento da informação de um conjunto complemento (*não-próprio*) a partir da identificação de um conjunto *próprio*. Para uma ilustração mais inteligível, considere o algoritmo de seleção negativa apresentado na Figura 4.

- Geração aleatória de C elementos candidatos;
- Comparação de cada elemento de C com os elementos de P. Se o elemento p_i em P for reconhecido pelo elemento c_i em C, então descarta-se o elemento c_i . Caso contrário, armazena-se o elemento c_i como m_i , no conjunto M de elementos detectores.

O resultado desse processo consiste em um conjunto M, capaz de reconhecer indivíduos *não-próprios*.

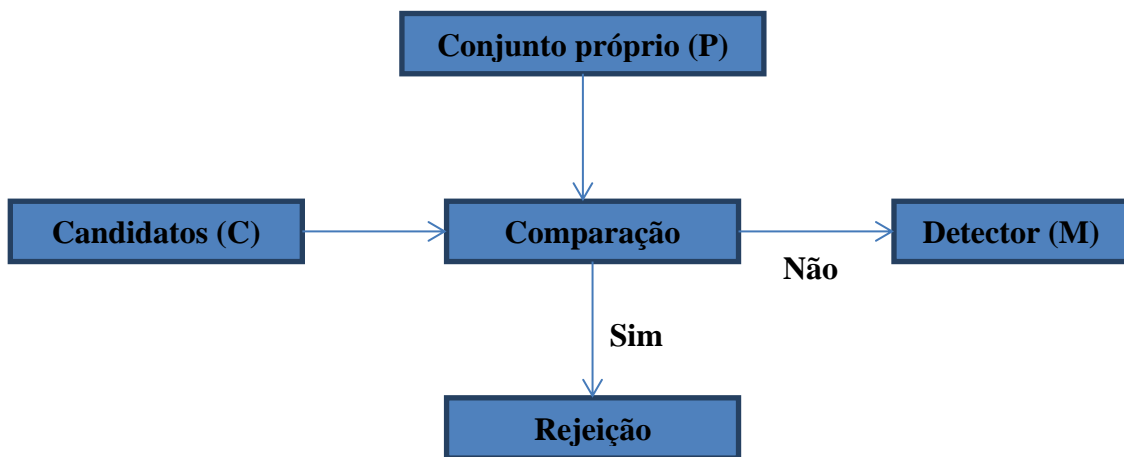


Figura 4 - Mecanismo de Seleção Negativa.

3.1.2. Rede Imunológica

A Rede Imunológica propõe que um sistema imune possui um comportamento dinâmico, mesmo sem a presença de estímulos externos [27]. Nesse caso, as células e moléculas do sistema imunológico são capazes de reconhecerem umas as outras, conferindo ao sistema um comportamento próprio, sendo independente de quaisquer estímulos. Embora muitos imunologistas refutem tal teoria, seu aspecto computacional

se mostra bastante relevante, e já se provou como uma poderosa ferramenta aplicada a sistemas computacionais.

Para ilustrar melhor o mecanismo de Rede Imunológica, considere a Figura 5. Suponha que, nesse caso, o anticorpo Ab_1 é capaz de reconhecer o antígeno Ag . Considere então que o mesmo Ab_1 é capaz de reconhecer também o Idiótopo i_2 , de outro anticorpo Ab_2 . Ou seja, Ab_1 é capaz de reconhecer tanto Ag quanto Ab_2 . Tem-se, nesse caso, que i_2 é uma imagem interna de Ag . Ainda, o reconhecimento de um receptor anticorpo por outro leva ao efeito de supressão enquanto que o reconhecimento de um antígeno por um anticorpo resulta em um efeito ativador, levando a proliferação dessa célula de defesa. Em suma, o efeito desse mecanismo é melhorar a capacidade de reconhecimento de agentes externos, através de eliminação ou supressão de redundâncias na rede, ou seja, das várias moléculas presentes no corpo, o sistema imunológico só será ativado quando antígenos forem detectados.

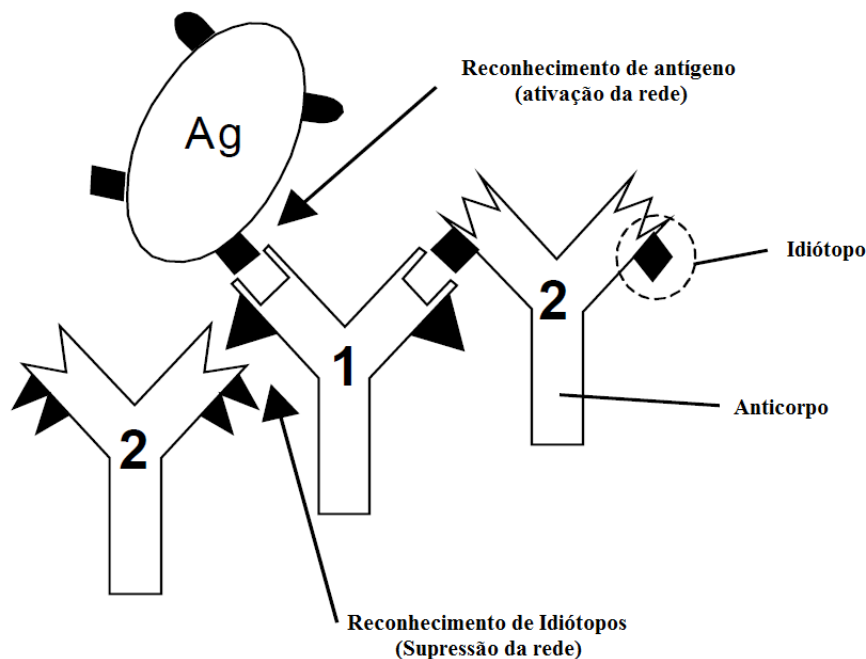


Figura 5 - Mecanismo de Rede Imunológica.
Fonte: Castro (2003)

3.1.3. Seleção Clonal

Como complemento do mecanismo de Seleção Negativa, a Seleção Clonal consiste em uma teoria utilizada para explicar como o sistema imunológico responde

quando *antígenos não-próprios* são reconhecidos pelos *linfócitos-B* [28]. A Figura 6 ilustra os conceitos de seleção, maturação e afinidade, utilizados nesse mecanismo.

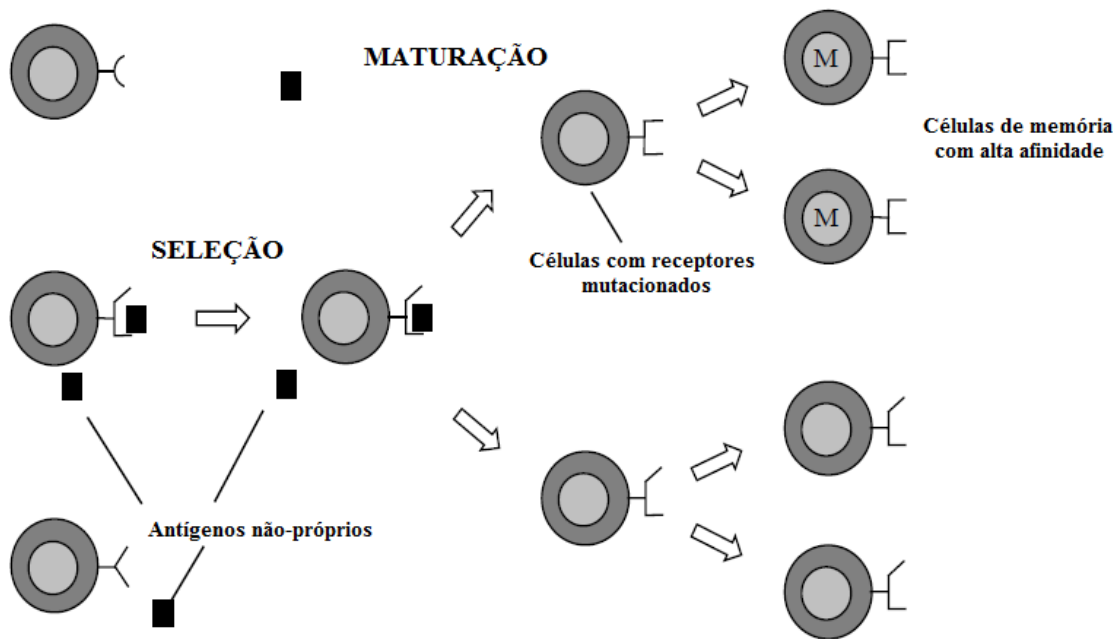


Figura 6 - Mecanismo de Seleção Clonal.
Fonte: Castro (2003)

Nesse processo, tem-se inicialmente um conjunto aleatório de *anticorpos*, cada qual com características particulares de receptores. Somente determinados *anticorpos* (mais aptos) possuem receptores capazes de identificar os *antígenos não-próprios*, classificado através de um processo de seleção. Após essa etapa, esses elementos mais aptos, sofrem um processo de clonagem, gerando células imunológicas idênticas. Em seguida, através de um processo de maturação, pequenas modificações são realizadas nos receptores dos indivíduos clonados, tendo como resultado o aumento na sensibilidade de detecção dos *antígenos não-próprios* presentes no ambiente. A sensibilidade nesse caso recebe o nome de afinidade, sendo que, quanto maior for seu valor, maior será a proliferação desse tipo de célula, conduzindo o sistema a uma maior eficiência, através do processo de Seleção Clonal.

Do ponto de vista computacional, o mecanismo de Seleção Clonal sucinta as seguintes considerações:

- Os responsáveis pela proliferação das células são os próprios *antígenos*. A taxa de proliferação de cada célula imunológica é proporcional à sua respectiva

afinidade em reconhecer dado *antígeno*: quanto maior a afinidade, maior o número de células geradas e vice-versa;

- Do ponto de vista oposto, a taxa de mutação sofrida por cada célula é inversamente proporcional à sua afinidade em reconhecer o *antígeno*: quanto maior for a afinidade, menor será a mutação imposta à célula e vice-versa.

Essas duas características tem como resultado prático a aceleração na busca da solução geral (quando a afinidade é relativamente baixa) e um ajuste fino, quando uma solução específica está próxima (quando a afinidade atinge um nível elevado). O método desenvolvido no presente trabalho baseia-se nesse mecanismo.

3.2. SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) podem ser definidos como um sistema computacional abstrato ou metamórfico, desenvolvido baseado em ideias, teorias e componentes extraídos de sistemas imunológicos naturais. A maioria desses sistemas artificiais são utilizados para a obtenção de soluções de problemas computacionais ou de engenharia complexos tais como reconhecimento de padrões, métodos de eliminação e otimização [29].

A utilização de técnicas computacionais baseadas em SIA pode ser encontrada em diversos trabalhos. Existem exemplos de aplicações como Mineração de Dados, Segurança Computacional, Otimização, Automação, Bioinformática, Processamento de Textos, Reconhecimento de Padrões, Clusterização e Problemas de Classificação [30].

Um algoritmo de supervisão, baseado em SIA é apresentado por [31]. A ferramenta é utilizada para o sensoriamento de imagens, com o objetivo de classificar imagens de satélite de maneira automática. O resultado encontrado no trabalho apresentou um desempenho superior aos métodos tradicionais de classificação.

Já [32], utiliza um algoritmo destinado a solução do problema de despacho hidrotérmico de curto prazo. Mesmo com as características não lineares encontradas nessa problemática, a técnica foi capaz de, eficientemente, encontrar uma solução global com um baixo custo computacional.

A partir de um algoritmo de Seleção Clonal, o trabalho desenvolvido por [33] apresenta uma nova abordagem para a estimação de componentes harmônicos em Sistemas Elétricos. O método foi testado computacionalmente e comparado com as técnicas tradicionais, baseadas em Transformada Discreta de Fourier, resultando em ganhos consideráveis. O método se mostrou ainda bastante robusto, uma vez que o baixo erro inerente ao processo se manteve constante para uma ampla faixa de condições.

Embora a quantidade de trabalhos baseados em sistemas imunológicos artificiais seja considerável, na pesquisa realizada, não foi encontrada qualquer referência de utilização dessa técnica computacional em sistemas de distribuição, especificamente para ser utilizado em localização e classificação de faltas. Esse é um dos principais fatores motivadores do presente trabalho, pois, como já apresentado, a teoria de Sistemas Imunológicos mostra-se com um grande potencial.

4. MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS BASEADO EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Serão apresentadas, neste capítulo, a descrição de funcionamento e características do método para localização e classificação de faltas proposto. Inicialmente, serão descritas as variáveis de entrada e saída que caracterizam a ferramenta. Posteriormente, o método será descrito de maneira minuciosa, sendo apresentadas, passo a passo, todas as etapas que o compõe.

4.1. APRESENTAÇÃO GERAL

No presente trabalho, um sistema imunológico artificial será implementado para a localização e classificação de faltas em sistema de distribuição. O resultado contemplará também a presença de geradores distribuídos conectados ao sistema. A Figura 7 mostra o funcionamento geral da ferramenta proposta.

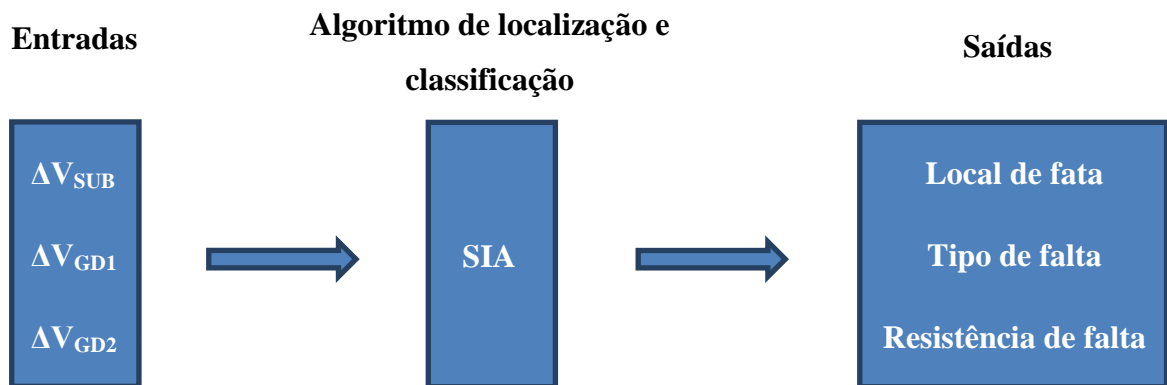


Figura 7 - Funcionamento da ferramenta proposta.

As entradas são caracterizadas por três variáveis, sendo a variação da tensão nas três fases, provocada pela falta, observada em três pontos do sistema: no barramento da subestação, no barramento de conexão do gerador 1 e no barramento de conexão do gerador 2. Nesse caso, se faz necessário que o sistema seja capaz de armazenar a tensão imediatamente antes e durante a falta. A variação é a diferença desses dois valores.

Tais dados alimentam o algoritmo baseado em sistema imunológico artificial. O processamento do algoritmo desenvolvido pode ser feito em qualquer dispositivo capaz de reproduzir um fluxo de potência, com um desempenho mediano. O funcionamento do algoritmo será descrito adiante.

Por fim, as saídas apresentam como resultados a estimativa do local, do tipo e da resistência de falta (falta puramente resistiva).

4.2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Como visto, o sistema imunológico artificial é alimentado por três entradas, advindas de medidores localizados em três pontos do sistema de distribuição. A partir dessas variáveis, o algoritmo é executado, tendo como resultado o local onde a falta ocorreu, bem como a classificação do tipo de falta e sua resistência.

A Figura 8 apresenta um fluxograma que descreve o funcionamento do algoritmo. O detalhamento de cada etapa é descrito na sequência.

1) Ocorrência de falta

Nessa primeira etapa, o sistema de distribuição é monitorado, de modo que, caso uma falta ocorra, sejam adquiridas as tensões em três pontos do sistema: barramento da subestação e os barramentos de conexão dos geradores 1 e 2.

Nesse caso, adota-se o pressuposto de que a detecção da falta é conhecida no momento em que a mesma ocorreu. Isso pode ser feito, por exemplo, monitorando-se as correntes do sistema, utilizando-se dos sinais de trip dos relés de sobrecorrente, etc. Além disso, assume-se que exista um sistema de comunicação de tal forma que as tensões adquiridas estejam sincronizadas e que os dados possam ser centralizados na subestação (local onde o algoritmo seria executado).

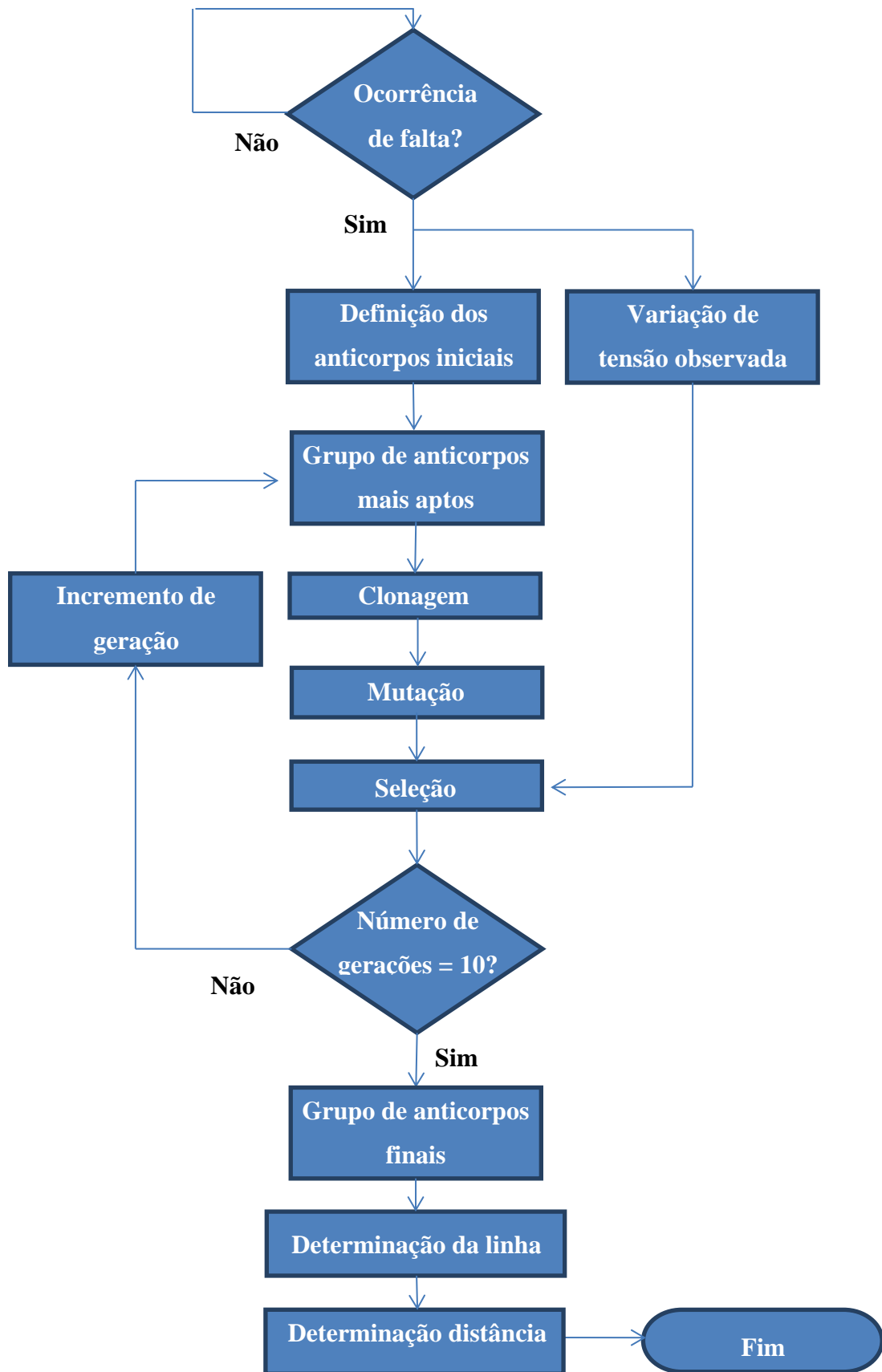


Figura 8 - Método de localiza o e classifica o de faltas baseado em sistemas imunológicos artificiais.

2) Variação de tensão observada

Nesse ponto, são armazenadas as variações de tensão observadas nos três pontos do sistema de distribuição, já descritos. A Figura 9 apresenta os pontos de medição de tensão.

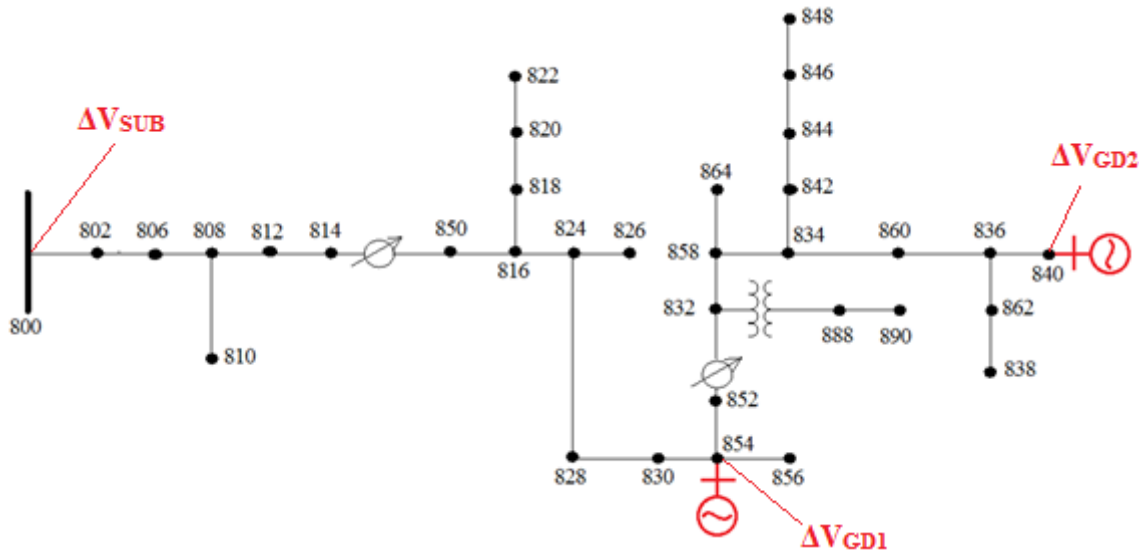


Figura 9 - Locais de monitoramento das tensões.

Essas variáveis são caracterizadas como segue:

$$\Delta V_{SUB} = V_{SUB,antes} - V_{SUB,durante}$$

$$\Delta V_{GD1} = V_{GD1,antes} - V_{GD1,durante}$$

$$\Delta V_{GD2} = V_{GD2,antes} - V_{GD2,durante}$$

As variações são constituídas pelas variações das três fases para cada um dos três pontos e são as variáveis de entrada do algoritmo baseado em sistema imunológico artificial (9 entradas). Tais dados serão utilizados na etapa de Seleção, que será descrito adiante.

3) Definição dos anticorpos iniciais

A etapa de definição dos anticorpos iniciais consiste na escolha dos três vetores iniciais (determinados de maneira heurística), que caracterizam os primeiros anticorpos. Os anticorpos possuem o seguinte formato:

$$\text{Anticorpo}_1 = [\text{barra}_1 \text{ tipo}_1 \text{ resist}_1]$$

$$\text{Anticorpo}_2 = [\text{barra}_2 \text{ tipo}_2 \text{ resist}_2]$$

$$\text{Anticorpo}_3 = [\text{barra}_3 \text{ tipo}_3 \text{ resist}_3]$$

A primeira posição do vetor representa a barra que o referido vetor irá representar. As segundas e terceiras posições indicam o tipo e o valor da resistência de falta. Foi utilizada a função *randi*, do software *Matlab*, criando valores randômicos, que possuem as seguintes faixas possíveis:

Tabela 4 - Características do vetor anticorpo.

Característica	Faixa	Descrição
barra	1 ~ 34	Representa a quantidade de nós do sistema
tipo	1 ~ 11	Representa a quantidade de tipos de falta
resist	1 ~ 15	Representa o valor da resistência de falta

Como forma de facilitar a implementação do Sistema Imunológico Artificial, foi utilizada uma numeração mais conveniente para a representação dos nós do sistema.

A Tabela 5 mostra a correlação entre a numeração utilizada e a numeração presente do documento do IEEE34.

Tabela 5 - Equivalência entre a numeração dos nós.

Numeração IEEE34	Numeração utilizada
826	14
800	1
802	2
806	3
810	5
808	4
812	6
814	7
850	8
822	12
820	11

818	10
816	9
824	13
828	15
856	18
890	22
888	21
864	24
838	33
862	32
840	34
836	31
848	29
846	28
844	27
842	26
860	30
834	25
858	23
832	20
852	19
854	17
830	16

Os tipos de faltas contemplados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Correspondência dos tipos de falta.

Tipo de falta	Correspondência
A-T	1
B-T	2
C-T	3
AB	4
AC	5

BC	6
AB-T	7
AC-T	8
BC-T	9
ABC	10
ABC-T	11

Tem-se então, cada um desses três vetores representando uma condição de falta do sistema. Tais anticorpos serão posteriormente avaliados, na etapa Seleção.

4) Grupo de anticorpos mais aptos

O grupo de anticorpos mais aptos representam os três anticorpos que apresentam o melhor desempenho evolutivo dentre todos os outros avaliados.

Inicialmente, os anticorpos mais aptos são os próprios anticorpos iniciais, pois a população inicial é de apenas três indivíduos.

Posteriormente, após o primeiro processo de clonagem e mutação, os anticorpos mais aptos serão caracterizados na etapa Seleção, onde serão selecionados os três anticorpos mais aptos, dentro de uma população de 18 indivíduos, cada qual com características distintas.

5) Clonagem

No processo de clonagem, são feitas cinco cópias de cada um dos anticorpos mais aptos. Ao final dessa etapa, tem-se uma população de 18 indivíduos (15 clones + 3 anticorpos mais aptos originais). Tal etapa é exemplificada a seguir:

$$[\text{Anticorpo mais apto}_n] \xrightarrow{\text{CLONAGEM}} \begin{cases} [barra_{n,1} \quad tipo_{n,1} \quad resist_{n,1}] \\ [barra_{n,2} \quad tipo_{n,2} \quad resist_{n,2}] \\ [barra_{n,3} \quad tipo_{n,3} \quad resist_{n,3}] \\ [barra_{n,4} \quad tipo_{n,4} \quad resist_{n,4}] \\ [barra_{n,5} \quad tipo_{n,5} \quad resist_{n,5}] \end{cases}$$

Cada um dos três vetores mais aptos ($n=1,2,3$) terá cinco clones idênticos.

6) Mutação

Nessa etapa, cada um dos clones criados anteriormente sofre um processo de Mutação que consiste na modificação, para cada um dos anticorpos clones, de uma única característica. Introduce-se, dessa maneira, a variação genética aos clones, mantendo, no entanto, a ligação genética com o anticorpo original, já que as outras duas características do anticorpo mutacionado serão mantidas.

Tal processo é exemplificado a seguir, onde os clones do anticorpo [1 1 5], sofrem um processo de Mutação:

$$\begin{array}{ccc} [1 \ 1 \ 5] & & [1 \ \mathbf{2} \ 5] \\ [1 \ 1 \ 5] & \xrightarrow{\quad} & [1 \ 1 \ \mathbf{10}] \\ [1 \ 1 \ 5] & \text{MUTAÇÃO} & [7 \ 1 \ 5] \\ [1 \ 1 \ 5] & & [1 \ \mathbf{3} \ 5] \\ [1 \ 1 \ 5] & & [1 \ 1 \ \mathbf{15}] \end{array}$$

Nota-se que o processo de Mutação altera somente uma característica do vetor (elemento em negrito). Tanto a seleção da característica a ser maturada quanto o valor da característica é feito randomicamente, através da função *randi* do *Matlab*.

O processo é executado para todos os 15 clones gerados na etapa anterior. Como resultado, tem-se a criação de uma população de 15 anticorpos maturados, descendentes de três anticorpos pais originais.

7) Seleção

No processo de Seleção, é feita uma avaliação de toda a população de anticorpos (18 anticorpos), tendo como resultado a seleção dos 3 indivíduos mais aptos.

A avaliação, para cada anticorpo, é feita comparando-se a variação de tensão obtida pela simulação com a variação de tensão real, observada no sistema de distribuição. A Figura 10 exemplifica esse processo.

Nesse caso, um anticorpo hipotético, com as características *barra*, *tipo* e *resist*, é avaliado. Então, o sistema é simulado considerando uma falta na respectiva *barra*, com uma falta *tipo* com uma resistência de falta *resist*. Como o sistema é simulado também em condição normal (sem falta), tem-se como resultado a variação da tensão observada no barramento da subestação, e nos barramentos de conexão das duas unidades de

geração. Com isso, é possível realizar uma comparação dessa variação simulada, com a variação observada no sistema real. Tem-se como produto dessa comparação, um erro que está atrelado ao referido anticorpo e será utilizado para classifica-lo dentro de toda a população. Anticorpos com os menores erros são os mais próximos do local, do tipo e da resistência de falta real.

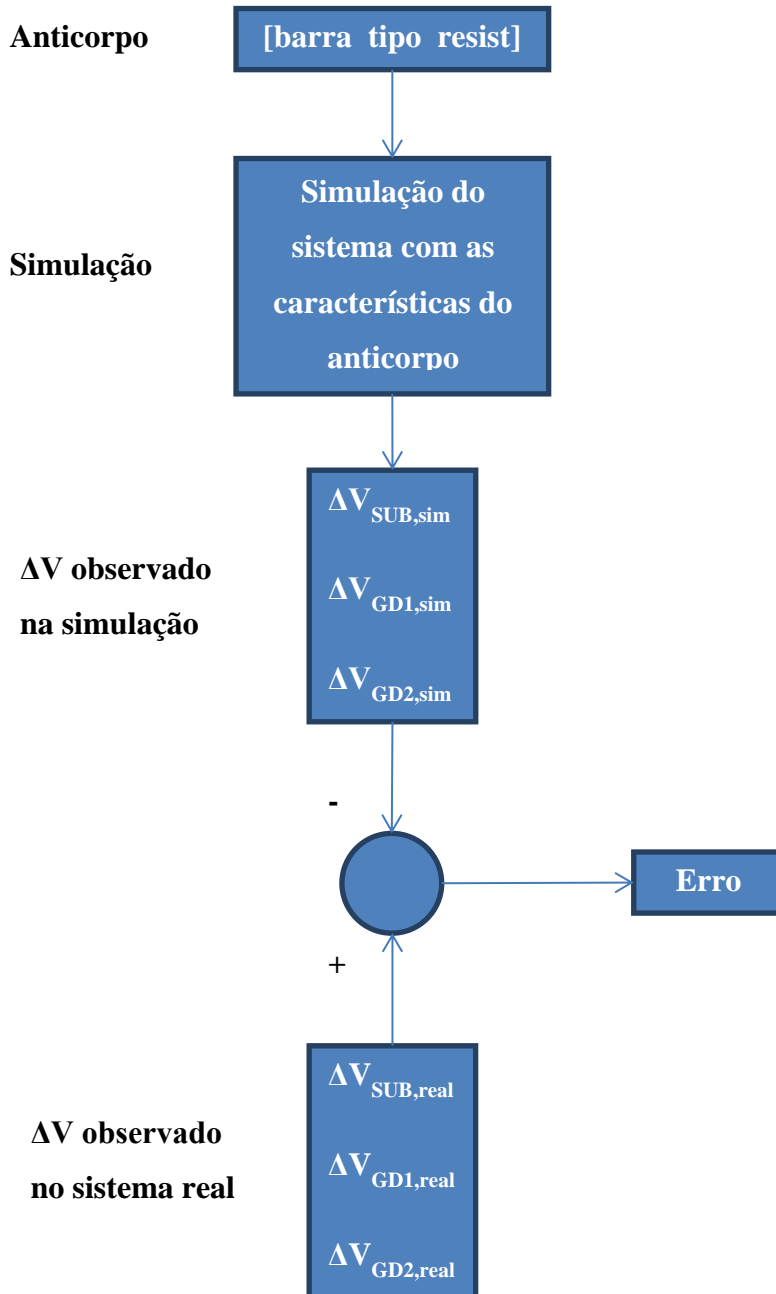


Figura 10 - Método de Seleção dos Anticorpos.

A função de erro é calculada da seguinte forma:

$$Erro = \max \left\{ \sum_{k=1}^3 (\Delta V_{SUB,real}^k - \Delta V_{SUB,sim}^k), \sum_{k=1}^3 (\Delta V_{GD1,real}^k - \Delta V_{GD1,sim}^k), \sum_{k=1}^3 (\Delta V_{GD2,real}^k - \Delta V_{GD2,sim}^k) \right\}$$

Onde k representa o modulo de tensão para cada uma das três fases.

8) Número de gerações

Essa etapa representa o critério de parada do algoritmo. Optou-se por utilizar um número máximo de gerações para determinar a convergência do método. Ou seja, ao final da 10ª geração, tem-se como resultado os três anticorpos mais aptos. Esse valor foi definido empiricamente, tendo sido o que apresentou um resultado satisfatório com um relativamente baixo custo computacional.

9) Grupo de anticorpos finais

O grupo de anticorpos finais é composto por três elementos, evolutivamente com os melhores resultados, frutos do processo de clonagem, Mutação e seleção a que foram submetidos.

Desses três anticorpos, o primeiro e mais evoluído (com menor Erro), indicará sempre a barra (ou nó) que se encontra mais próximo do local de falta, bem como a classificação do tipo e resistência de falta ocorrida.

Na maioria das vezes, o segundo anticorpo mais evoluído indicará um segundo nó, que, junto com o nó do primeiro anticorpo, indicará a linha (ou seção) onde a falta ocorreu.

Em alguns casos, com a informação do segundo anticorpo não é possível identificar a linha onde a falta ocorreu. Isso ocorre principalmente quando a falta acontece próximo à ramificações. Nesse caso, é necessário executar o próximo passo, que é a Determinação da linha.

10) Determinação da linha

Essa etapa é executada sempre que houver uma informação inconclusiva para a determinação da linha onde a falta ocorreu.

Para exemplificar esse processo, considere a Figura 11.

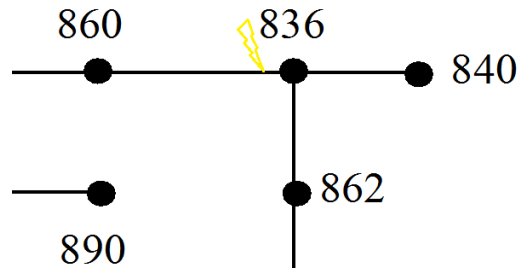


Figura 11 - Método de determinação da linha em falta.

Suponhamos que o algoritmo mais apto dos três finais foi capaz de classificar a barra 836 como a mais próxima ao local de falta, além do tipo e resistência de falta. Tal resultado está correto. No entanto, o segundo mais apto não foi capaz de identificar a barra 860, sendo inconclusiva a informação da linha em falta. Nesse caso, o algoritmo faz a avaliação de três novos pontos ligeiramente distantes da barra 836. Ou seja, simulam-se três pontos de falta nas linhas 860-836, 836-840 e 836-862. A distância das três faltas simuladas em relação a barra 836 equivale a 50% da impedância da menor linha. A informação do menor dos três erros indicará a direção da falta, ou seja, apontará, a partir da barra 836, a linha onde a falta ocorreu.

11) Determinação da distância

Nessa etapa, é executado um processo iterativo. A partir da informação da linha em falta, a mesma é dividida em segmentos com distâncias iguais, onde as faltas são então simuladas, gerando também os seus respectivos erros. Nesse caso, será utilizado como critério de parada, um valor de erro mínimo, a partir do qual o algoritmo se encerra. A precisão será tão maior, quanto maior for a discretização da linha.

5. MODELO DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo, será apresentado sistema de distribuição IEEE34 e sua implementação em um ambiente de simulação. O objetivo aqui é definir uma ferramenta que possibilite a avaliação do método proposto. A inclusão de geradores distribuídos também é tratado, ao final do capítulo.

5.1. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO IEEE34

Como forma de avaliar a eficiência da metodologia de localização e classificação de faltas em sistemas de distribuição, bem como analisar a influência que a geração distribuída tem sobre a técnica proposta, será utilizado o sistema de distribuição IEEE34. A Figura 12 apresenta a topologia desse sistema.

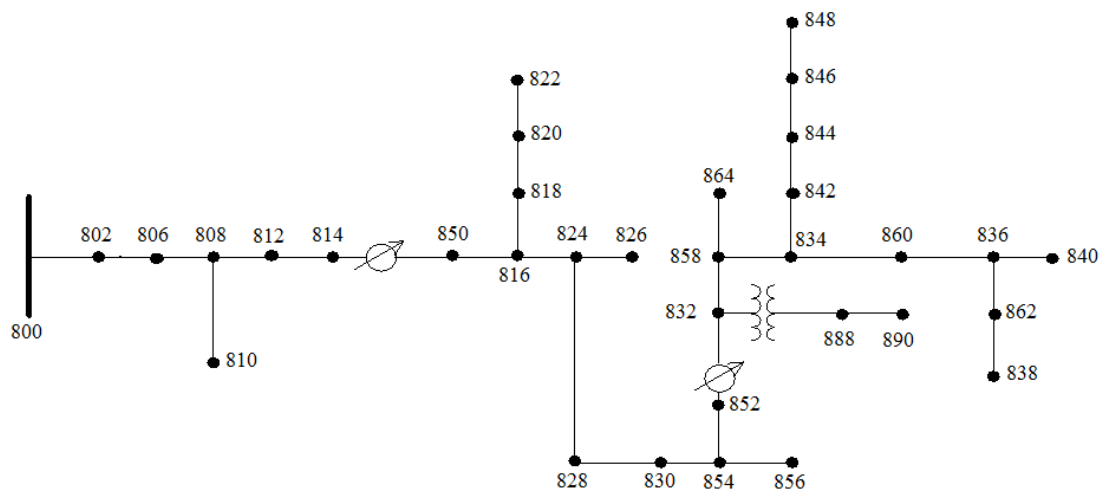


Figura 12 - Sistema de distribuição IEEE34.
Fonte: IEEE (2010)

Nesse modelo, um sistema de transmissão ou subtransmissão é conectado ao lado de alta do transformador da subestação, localizado na barra 800 (fonte de potência convencional). No presente trabalho, o sistema alimentador é representado como uma fonte de tensão ideal com sua impedância equivalente. Os equipamentos e características do sistema são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 7 - Dados dos transformadores do sistema IEEE34.

DADOS DOS TRANSFORMADORES					
Local	Potência (kVA)	Primário (kV)	Secundário (kV)	R (%)	X (%)
Subestação (800)	2500	69 – D	24,9 – Yg	1	8
XFM-1 (832-888)	500	24,9 – Yg	4,16 - Yg	1,9	4,08

Tabela 8 - Dados dos reguladores do sistema de distribuição IEEE34.

DADOS DOS REGULADORES						
	Regulador 1			Regulador 2		
Linha	814 - 850			852 - 832		
Local	814			852		
Fases	A-B-C			A-B-C		
Conexão	Trifásico - Yg			Trifásico - Yg		
Parâmetros do compensador	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
R (%)	2,7	2,7	2,7	2,5	2,5	2,5
X (%)	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5

Tabela 9 - Dados das cargas pontuais do sistema de distribuição IEEE34.

DADOS DAS CARGAS PONTUAIS							
Nó	Modelo de carga	Fase A		Fase B		Fase C	
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

Nessa caso, as cargas podem estar conectadas em estrela (Y) ou em delta (D), além de poderem ser de potência constante (PQ), corrente constante (I) ou impedância constante (Z).

Tabela 10 -Dados das cargas distribuídas do sistema de distribuição IEEE34.

DADOS DAS CARGAS DISTRIBUÍDAS								
Linha	Modelo de carga	Fase A		Fase B		Fase C		
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr	
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0
Total			262	133	240	120	220	114

Tabela 11 - Dados dos bancos de capacitores do sistema de distribuição IEEE34.

DADOS DOS BANCOS DE CAPACITORES			
Nó	Fase A	Fase B	Fase C
	kVAr	kVAr	kVAr
844	100	100	100
848	150	150	150
Total	250	250	250

Como pode ser observado, o sistema em questão apresenta um amplo espectro de abrangência, possuindo linhas monofásicas e trifásicas, transformadores, reguladores, bancos de capacitores e uma variedade de cargas distribuídas (ao longo da linha de distribuição) e pontuais (localizadas somente nas extremidades das linhas), conferindo ao sistema um ambiente com características de desequilíbrio, buscando se aproximar do que é encontrado em sistemas de distribuição reais.

5.2. IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO

O ambiente de simulação foi criado utilizando o software *Matlab*, através do *toolbox SimPowerSystem* (SPS). Tal ambiente possui vários modelos de elementos de sistemas elétricos (modelos de linhas, transformadores, geradores, mecanismos para aplicação de faltas, etc.) além de uma gama de ferramentas para aquisição, tratamento e análise dos dados.

5.2.1. Premissas

Para a implementação do ambiente de simulação, alguns pressupostos foram adotados, de modo a conciliar as limitações e potencialidades do software considerando os requisitos de desempenho e fidelidade mínimos, necessários ao trabalho. A seguir, são apresentadas as considerações para o desenvolvimento da ferramenta de simulação.

- Linhas: modelo de linha média (circuito π). Impedância concentrada e admitância dividida em duas partes iguais, localizadas nos extremos da linha;
- Cargas pontuais: concentrada no respectivo nó, podendo estar com conexão em delta ou estrela. Cargas representadas como impedância constante e potência

constante. As cargas de corrente constante foram representadas como potência constante;

- Cargas distribuídas: divididas em duas partes de valores iguais, inseridas nos extremos da respectiva linha de transmissão. Todas representadas como impedância constante;
- Bancos de capacitores: modelo de carga de impedância constante, inseridas no respectivo nó e injetando potência reativa ao sistema;
- Sistema de transmissão ou subtransmissão alimentador: representado como uma fonte trifásica ideal, atrás de uma impedância;
- Transformador da subestação: Impedância refletida no lado de alta, sendo considerada na impedância do sistema alimentador. Foram utilizados três transformadores monofásicos com tap variável;
- Transformador da linha 832-888: utilizado um transformador trifásico com tap variável, com a impedância refletida ao secundário;
- Reguladores: para sua representação, foram utilizados três transformadores monofásicos com tap variável, relação 1:1, impedância refletida ao secundário;

Embora o modelo de simulação permita a análise dinâmica do sistema, o foco do presente trabalho são as condições pré e durante a falta em regime permanente. Dessa forma, as considerações adotadas são consideradas razoáveis, tendo em vista que, nesses casos, o que se mostra fundamental e com maior possibilidade influência nos resultados finais são os valores de impedâncias e tensões do sistema.

Além disso, tendo em vista que o foco se concentra em uma metodologia de localização e classificação de faltas, o trabalho não aborda o processamento de sinais, assumindo que os fasores de tensão e corrente estão considerados disponíveis após três ciclos.

Como parâmetros de simulação, tem-se:

- Tempo de simulação: 0,05 s;
- Método de resolução: Dormand-Prince de 4ª ordem*;
- Tempo de amostragem: 5^{-6} s;

* Método idêntico ao Runge-Kutta de 4ª ordem com passo variável. Também conhecido como ode45, o método Dormand-Prince é uma ferramenta utilizada para a solução de equações diferenciais no ambiente Matlab.

5.2.2. Validação do modelo de simulação

Para a validação do modelo, foi feita uma comparação entre os resultados encontrados das tensões com a ferramenta de simulação e com documento do IEEE34, que apresenta os resultados de um fluxo de potência padrão. A Tabela 12 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 12 - Comparação dos resultados de fluxo de potência para validação do modelo de simulação.

Barra	IEEE34 (padrão)	SimPowerSystem	Erro (%)
800	1,05	1,0500	0,0000
802	1,0475	1,0473	0,0191
806	1,0457	1,0455	0,0191
810	-	-	-
808	1,0136	1,0118	0,1776
812	0,9763	0,9727	0,3687
814	0,9467	0,9416	0,5387
850	1,0176	1,0122	0,5266
822	0,9895	1,0025	1,3171
820	0,9926	1,0035	1,1012
818	1,0163	1,0115	0,4715
816	1,0172	1,0118	0,5309
824	1,0082	1,0022	0,5939
828	1,0074	1,0014	0,5929
856	-	-	-
890	0,9167	0,9158	0,0959
888	0,9996	1,0072	0,7638
864	1,0336	1,0237	0,9603
838	-	-	-
862	1,0303	1,0203	0,9690
840	1,0303	1,0203	0,9713
836	1,0303	1,0203	0,9689
848	1,031	1,0210	0,9663
846	1,0309	1,0210	0,9606
844	1,0307	1,0207	0,9684

842	1,0309	1,0209	0,9670
860	1,0305	1,0205	0,9678
834	1,0309	1,0210	0,9625
858	1,0336	1,0237	0,9602
832	1,0359	1,0260	0,9524
852	0,9581	0,9492	0,9329
854	0,989	0,9820	0,7102
830	0,9894	0,9824	0,7037
		Erro máximo	1,3171

A tabela indica que os erros resultantes da comparação entre o fluxo de potência padrão IEEE34 e o modelo desenvolvido apresentam erros consideravelmente pequenos. Os únicos erros que resultaram maiores que 1% estão relacionados aos nós onde estão localizadas cargas distribuída, monofásicas, de elevado valor. Como no modelo padrão tais cargas foram modeladas como potência constante e no modelo desenvolvido, como impedância constante, o erro é justificável.

Dessa forma, mesmo considerando os pressupostos adotados para a modelagem, os resultados comparativos mostraram que o existe grande fidelidade ao modelo padrão e, dessa forma, o modelo de simulação pode ser considerado validado para os propósitos do presente trabalho.

5.3. INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO MODELO

Como forma de avaliar a influência que a eventual presença de geração distribuída pode exercer nas técnicas de localização e classificação de faltas, se faz necessário a representação dessas unidades no modelo de simulação.

Para tanto, foram inseridos duas unidades de geração de pequeno porte, localizadas nas barras 854 e 840, conforme Figura 13.

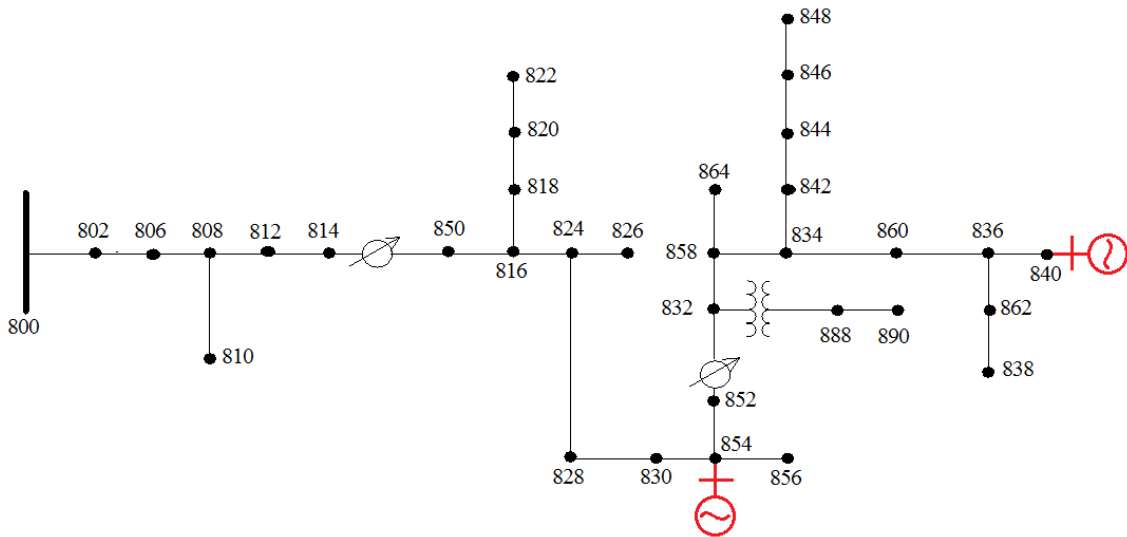


Figura 13 – Locais de inclusão de unidades de geração distribuída ao sistema IEEE34.

Os dois geradores adicionados ao sistema são idênticos e suas características são apresentadas na Tabela 13. Tais máquinas podem ser acionadas por diversas fontes primárias como biomassa, motores a combustão a diesel, microturbinas a gás, água, etc.

Tabela 13 - Características dos geradores distribuídos.

Tipo		Gerador Síncrono		
Potência		250 kVA		
Tensão		480 V		
Frequência		60 Hz		
Número de pólos		2		
Reatâncias (pu)	$X_d = 3,23$	$X_d' = 0,21$	$X_d'' = 0,15$	
	$X_q = 2,79$	$X_q'' = 0,37$	$X_l = 0,09$	
Constantes de tempo (s)	$T_{do}' = 1,7$	$T_{do}'' = 0,008$	$T_{qo}'' = 0,004$	
Constante de inércia		1s		
Resistência de estator (pu)		0,017		

Os geradores são conectados em baixa tensão (0,480 kV), sendo necessária a inclusão de transformadores elevadores para a conexão ao sistema de distribuição (24,9 kV). Para tanto, foram utilizados dois transformadores idênticos para as duas unidades e suas características são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Transformadores das unidades de geração distribuída.

DADOS DOS TRANSFORMADORES DA UNIDADES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA					
Local	Potência (kVA)	Primário (kV)	Secundário (kV)	R (%)	X (%)
GD1-854	300	24,9 – Yg	0,480 – Yg	2,5	3,01
GD2-840	300	24,9 – Yg	0,480 – Yg	2,5	3,01

A carga total nominal do sistema IEEE34 é de 1769 kW, somando-se ainda o montante de 273 kW de perdas. No caso em que existe somente a subestação como fonte de alimentação, tem-se uma geração de 2042 kW. Para a análise do sistema com a presença de geradores distribuídos, foram adicionadas mais duas fontes de geração, cada uma com uma potência de 250 kW, conferindo um total de 500 kW em unidades de geração distribuída. A Tabela 15 apresenta um resumo das condições de carga e geração para os casos com a presença da geração distribuída e original.

Tabela 15 - Sistema IEEE34 original e IEEE34 com a presença de geração distribuída.

CARACTERÍSTICA CARGA-GERAÇÃO DO SISTEMA		
	IEEE34 (kW)	IEEE34 + GD (kW)
Geração alimentador subestação	2043	1533
GD 854	0	250
GD 840	0	250
Cargas Y	921	921
Cargas Δ	848	848
Perdas	273	263

O impacto da geração distribuída nos perfis de tensão do sistema, em operação normal, considerando sistemas de distribuição com tensão de 11kV, predominantemente radiais, começa a ser significativo a partir de uma penetração de 25% [23]. A partir desse valor, a operação do sistema em relação a controle de tensão começa a ser afetada.

Como o foco do trabalho é a análise da influência da geração distribuída em métodos de localização e classificação de faltas, ou seja, com o sistema sob condições

de distúrbios, faz-se necessário que o índice de penetração seja tal que não ocorram influências significativas quando o sistema encontra-se em condições normais de operação. Sendo assim, optou-se pela inserção de um montante de geração adicional de 500 kW, resultando em um índice de penetração de 24,48 %, garantindo, dessa forma, que em operação normal, o sistema com e sem a presença de geração distribuída tenham um comportamento semelhante.

E por fim, considerando que, normalmente, unidades de geração distribuída não participam do controle de frequência do sistema, seu comportamento se assemelha a fontes do tipo potência constante [24]. Dessa forma, as novas unidades de geração foram introduzidas ao modelo como fontes de potência constante, ou seja, gerando o montante de potência ativa especificada de maneira contínua.

6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os resultados encontrados a partir da aplicação da ferramenta proposta para a localização e classificação de faltas. Como forma de ilustrar de uma forma mais clara o funcionamento do método, será apresentado, a partir de um exemplo, a descrição pormenorizada de cada uma das etapas. Na sequência, será apresentado como a metodologia desenvolvida responde, considerando diversos casos de falta, aplicados ao sistema de distribuição adotado.

6.1. FUNCIONAMENTO DO MÉTODO

Como forma de ilustrar o funcionamento detalhado do método, será apresentado um exemplo, descrevendo um passo a passo compreendendo todas as etapas do algoritmo. Inicialmente, será simulada uma falta no sistema, de forma a obter as variáveis de entrada da ferramenta. Após isso, o método será executado.

6.1.1. Simulação de falta

Considere uma falta aplicada em uma linha do sistema de distribuição, conforme características indicadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Característica de falta.

Linha	Distância	Tipo de falta	Resistência de falta
828-830 (IEEE34)	50% a partir de 828	A-T	5 Ω

A Figura 14 ajuda a ilustrar o ponto de falta no sistema de distribuição. No sistema em questão, já encontram-se presentes dois geradores distribuídos. No entanto, o funcionamento para o caso do sistema original é idêntico ao que será apresentado.

2) Variação de tensão observada

$$\Delta V_{SUB} = [0,728 \quad 0,096 \quad 0,103]$$

$$\Delta V_{GD1} = [1,002 \quad 0,067 \quad 0,086]$$

$$\Delta V_{GD2} = [0,953 \quad 0,063 \quad 0,089]$$

3) Definição dos anticorpos iniciais

O algoritmo gera, aleatoriamente, um grupo inicial de três anticorpos.

$$Anticorpo_1 = [barra_1 \quad tipo_1 \quad resist_1] = [6 \quad 9 \quad 5]$$

$$Anticorpo_2 = [barra_2 \quad tipo_2 \quad resist_2] = [18 \quad 2 \quad 10]$$

$$Anticorpo_3 = [barra_3 \quad tipo_3 \quad resist_3] = [9 \quad 8 \quad 15]$$

4) Grupo de anticorpos mais aptos

A função dessa etapa é a de caracterizar os 3 indivíduos mais aptos dentro de toda a população da geração, que são avaliados no processo de Seleção (descrita adiante). Como no início do algoritmo, a população é de apenas 3 indivíduos, o grupo de indivíduos mais aptos é justamente os 3 anticorpos gerados.

$$Grupo \ de \ anticorpos \ mais \ aptos = \left\{ \begin{array}{l} [6 \quad 9 \quad 5] \\ [18 \quad 2 \quad 10] \\ [9 \quad 8 \quad 15] \end{array} \right\}$$

Quando a população estiver com o número de indivíduos completo, o processo de Seleção irá avaliar os 3 anticorpos com o melhor desempenho e o grupo de anticorpos mais aptos será atualizado.

5) Clonagem

Nesta etapa, os três anticorpos mais aptos são utilizados para realizar o processo de clonagem. Para cada anticorpo original, serão geradas cinco cópias idênticas. Ao final dessa etapa, a população terá o tamanho de 18 indivíduos (os 3 anticorpos iniciais somados aos 15 novos clones).

No exemplo em questão, serão geradas cinco cópias originadas de cada um dos seguintes anticorpos:

$$\text{Anticorpo}_1 = [6 \ 9 \ 5] \rightarrow 5 \times [6 \ 9 \ 5]$$

$$\text{Anticorpo}_2 = [18 \ 2 \ 10] \rightarrow 5 \times [18 \ 2 \ 10]$$

$$\text{Anticorpo}_3 = [9 \ 8 \ 15] \rightarrow 5 \times [9 \ 8 \ 15]$$

6) Mutação

Agora, todos os anticorpos clones são submetidos ao processo de Mutação, que consiste na alteração de uma de suas características. Tanto a escolha da característica a ser modificada quanto o seu valor são feitos de maneira aleatória. Assim como ocorre em Sistemas Imunológicos Naturais, esse mecanismo é responsável por possibilitar a evolução dos indivíduos, a partir da variação de suas características.

A Tabela 18 apresenta toda a população da geração atual, compreendendo os anticorpos mais aptos e os clones submetidos ao processo de mutação.

Tabela 18 - Descrição da população de anticorpos da primeira geração.

Anticorpos mais aptos	Clones	Clones mutacionados
[6 9 5]	[6 9 5]	[6 9 10]
	[6 9 5]	[8 9 5]
	[6 9 5]	[6 2 5]
	[6 9 5]	[6 9 15]
	[6 9 5]	[6 3 5]
[18 2 10]	[18 2 10]	[18 2 5]
	[18 2 10]	[5 2 10]
	[18 2 10]	[30 2 10]
	[18 2 10]	[18 7 10]
	[18 2 10]	[18 4 10]
[9 8 15]	[9 8 15]	[9 5 15]
	[9 8 15]	[7 8 15]
	[9 8 15]	[15 8 15]
	[9 8 15]	[31 8 15]
	[9 8 15]	[9 8 10]

7) Seleção

Com toda a população da primeira geração já completa, o algoritmo inicia a avaliação de cada anticorpo. A metodologia, nessa etapa, consiste em executar a simulação do sistema de distribuição com a partir das configurações de cada elemento. Por exemplo, carregando as informações do anticorpo [8 9 5], significa que a simulação será realizada com uma falta na barra 8 (850 pela numeração IEEE34), do tipo 9 (BC-T, conforme Tabela 6) e resistência de 5 Ω. Um dos resultados da simulação, consiste na medida da variação de tensão provocada pela falta, conforme características impostas pelo anticorpo [8 9 5]. Essa variação provocada pela falta simulada é comparada com a variação provocada pela falta real (na prática, essa variação seria adquirida no sistema real). Conforme Figura 10, um Erro será gerado dessa comparação e no presente exemplo equivale à:

$$Erro\ Anticorpo_{[8\ 9\ 5]} = [2,0751] (pu)$$

Aplicando o mesmo procedimento para toda a população de anticorpos resulta nos valores da Tabela 19.

Tabela 19 - Erros associados à população de anticorpos da primeira geração.

Descrição	Anticorpo	Erro associado (pu)
Anticorpos mais aptos	[6 9 5]	2,0095
	[18 2 10]	1,6377
	[9 8 15]	1,0618
Clones mutacionados	[6 9 10]	1,9829
	[8 9 5]	2,0751
	[6 2 5]	1,7292
	[6 9 15]	1,9617
	[6 3 5]	1,6069
	[18 2 5]	1,6544
	[5 2 10]	1,7427
	[30 2 10]	1,5894
	[18 7 10]	1,0518
	[18 4 10]	0,9384
[9 5 15]	0,8150	

[7 8 15]	1,0658
[15 8 15]	1,0241
[31 8 15]	0,8811
[9 8 10]	1,1063

Comparando-se então os erros relacionados a cada um dos anticorpos, pode-se finalmente seleccionar os 3 indivíduos com o melhor desempenho, resultando em um novo grupo de anticorpos mais aptos. Dessa forma:

$$\textit{Grupo de anticorpos mais aptos} = \left\{ \begin{array}{l} [9 \ 5 \ 15] \\ [31 \ 8 \ 15] \\ [18 \ 4 \ 10] \end{array} \right\}$$

8) Número de gerações

As etapas de 3 até 6 correspondem à uma geração no SIA desenvolvido. Ao final da etapa 6, incrementa-se a geração e realiza-se todo o processo (3 até 6) novamente. O algoritmo foi implementado para ser executado até o número de 10 gerações.

9) Grupo de anticorpos finais

Ao final da criação e análise da 10^a geração, tem-se como resultado o grupo de anticorpos finais, que representam o 3 elementos com o melhor desempenho, fruto de todo o processo evolutivo. No exemplo proposto, tal grupo de anticorpos e seus respectivos, correspondem a:

$$\textit{Grupo de anticorpos finais} = \left\{ \begin{array}{l} [15 \ 1 \ 5] \\ [16 \ 1 \ 5] \\ [13 \ 1 \ 5] \end{array} \right\}$$

$$\textit{Erro do grupo de anticorpos finais} = \left\{ \begin{array}{l} [0,0159 \ pu] \\ [0,0167 \ pu] \\ [0,0171 \ pu] \end{array} \right\}$$

A Figura 15 apresenta o caminho evolutivo dos dois melhores anticorpos, relacionados ao grupo de anticorpos finais.

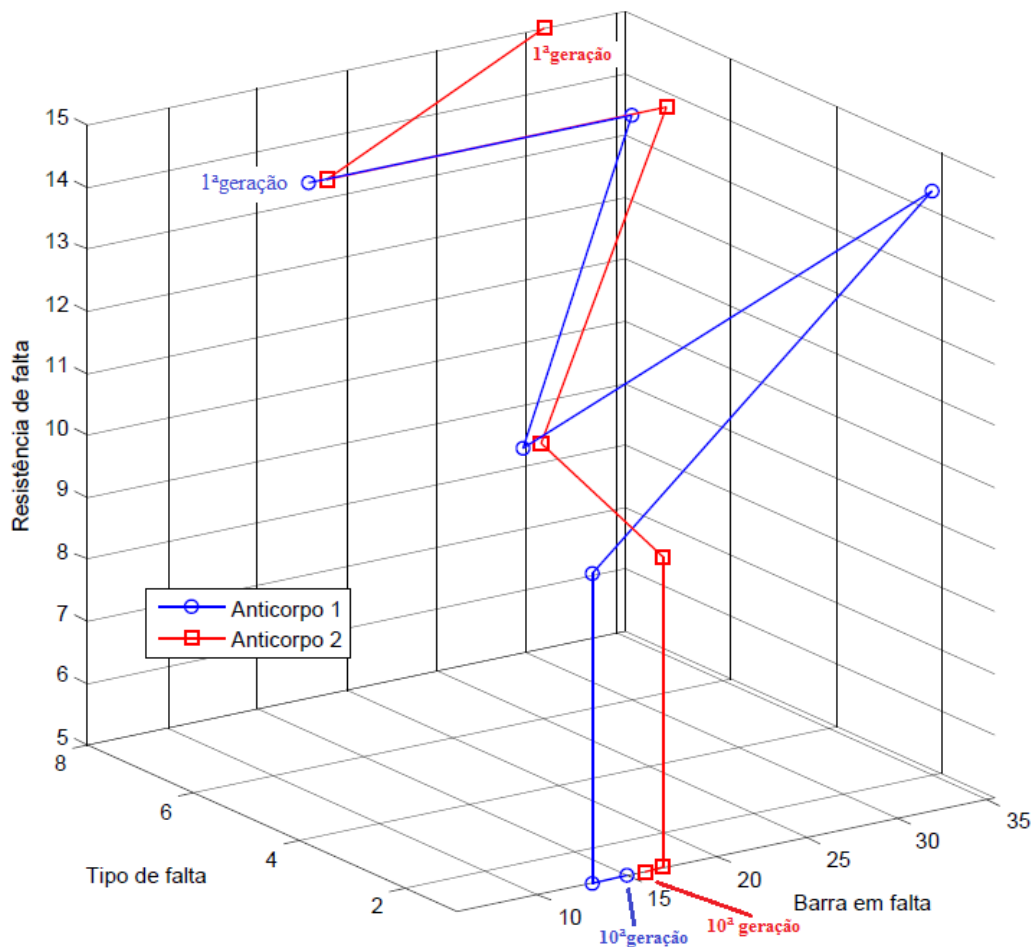


Figura 15 – Caminho evolutivo dos dois melhores anticorpos do grupo final.

A partir da análise do anticorpo que apresenta o menor dos erros, dentre os três finais (Anticorpo 1, da Figura 15), pode-se concluir que:

- Primeira característica: 15 (barra 828). A falta encontra-se em uma linha onde uma de suas extremidades é a barra 828;
- Segunda característica: 1 (falta A-T). A falta é do tipo monofásica, fase A;
- Terceira característica: 5. A resistência de falta tem valor igual a 5 Ω .

Ou seja, o método foi capaz de identificar uma das extremidades da linha em falta, além das características de tipo e resistência. É interessante ressaltar que esse anticorpo (o mais apto no grupo final) sempre apresentara a informação conclusiva sobre o tipo e a resistência de falta, indicando também uma das extremidades da linha que está em falta.

Observe que o segundo anticorpo com melhor desempenho (Anticorpo 2), apresenta a mesma classificação de falta (1 e 5 Ω), e ainda indica a barra 16 (barra 830)

como a outra extremidade da linha em falta. Ou seja, nesse caso, já teríamos a informação da linha onde a falta ocorreu (linha 15-16, ou 828-830).

No entanto, em algumas situações o segundo elemento mais apto pode não apresentar a informação sobre qual é a outra extremidade da linha em falta. Isso acontece, por exemplo, quando os três anticorpos finais indicam a mesma barra, diferenciando-se pelos outros dois parâmetros (tipo e resistência). Nesse caso, é necessário executar uma função para indicar, a partir da extremidade informada pelo anticorpo mais apto do grupo final, em qual direção está a outra extremidade da linha em falta. Tal procedimento é descrito a seguir.

10) Determinação da linha

Continuando no exemplo, considere o anticorpo mais apto do grupo final, sendo representado por:

$$\text{Anticorpo mais apto do grupo final} = [15 \ 1 \ 5]$$

Sabe-se que uma das extremidades é a barra 15 (828). Também é sabido, a partir dos dados do sistema de distribuição, que à essa barra estão ligadas duas linhas: 824-828 e 828-830, conforme Figura 16.

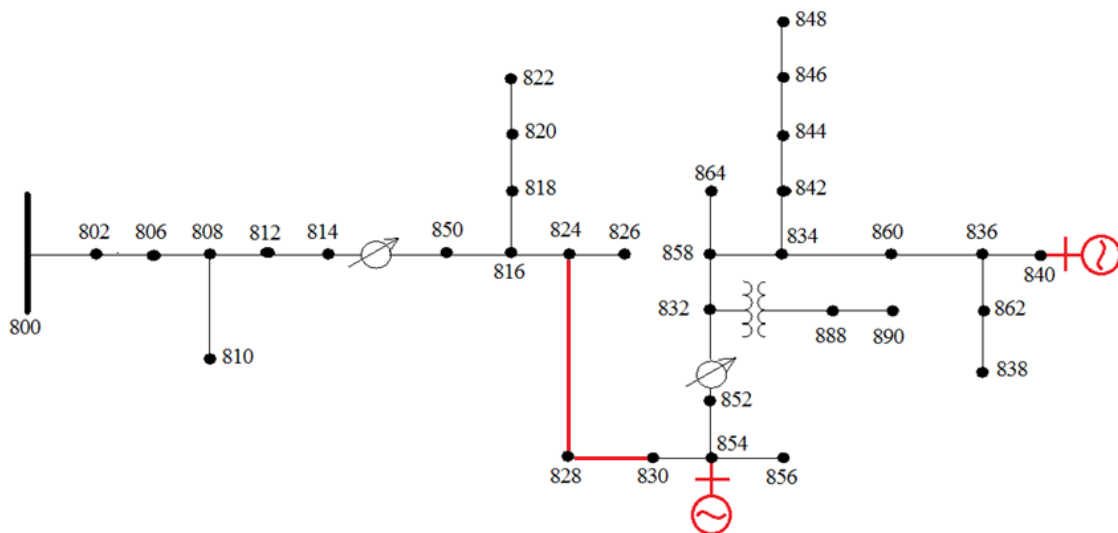


Figura 16 - Linhas ligadas à barra 828 (destacadas em vermelho).

Neste caso, serão realizadas mais duas simulações de falta, em dois pontos ligeiramente distantes da barra 828, um no sentido da barra 824 e outro no sentido da barra 830. A distância de aplicação da falta utiliza como parâmetro, 50% da impedância

da menor das linhas em análise. Com isso, garante-se que as duas faltas serão aplicadas à mesma distância elétrica a partir da barra 828. No presente problema, a linha 824-828 apresenta um comprimento total de 256 metros. A falta será aplicada então à 128 metros da barra 828, em ambas as direções. Executando as duas simulações, tem-se como resultado os seguintes valores de erros:

$$Erro_{50\% 824-828} = 0,01537$$

$$Erro_{50\% 828-830} = 0,01406$$

Como esperado, a informação apresenta um erro menor para a falta aplicada no sentido da linha 828-830. Neste ponto, já é sabido a linha onde se localiza a falta.

11) Determinação da distância

Finalmente, como última etapa da ferramenta, será determinado o local da linha (já conhecida), onde a falta se encontra. Para tanto, serão executadas as últimas simulações de falta, no sentido da barra 828 para a barra 830, de 10 em 10%. A discretização, neste caso, é arbitrária, sendo mais precisa quanto maior o número de simulações. O critério de parada utilizado é um limite de erro, estipulado em 0,003 pu.

Os resultados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Erros dos pontos de falta ao longo da linha em falta.

Distância a partir da barra 828 (% da linha)	Erro (pu)
10	0,01171
20	0,00873
30	0,00582
40	0,00297

Como pode ser observado, o último ponto analisado (40%) apresenta um erro abaixo da tolerância especificada e, dessa forma, o algoritmo pode ser finalizado. Lembrando que no exemplo proposto, a falta ocorreu a 50% da linha e, neste caso, a ferramenta não indica exatamente o ponto de falta. No entanto, a precisão poderá ser ampliada convenientemente caso seja necessário. Um aumento de precisão pode ser necessária em casos de sistemas que apresentem linhas com grande extensão, como alimentadores rurais.

Sendo assim, o resultado final da ferramenta é apresentado:

Tabela 21 - Apresentação do resultado final para o problema exemplo.

Parâmetro	Resultado
Linha em falta	828-830 (15-16)
Distância	40 % da linha a partir da barra 828
Tipo de falta	Monofásica, fase A
Resistência de falta	5 Ω

Com o presente exemplo, foi possível verificar detalhadamente o funcionamento de cada uma das etapas do método proposto. Com o entendimento sobre a ferramenta concluído, o sub-capítulo seguinte irá apresentar um compilado de vários resultados, contemplando diferentes condições (local, tipo e resistência de falta), que, por motivos de conveniência, não exibirá os detalhes como no caso exemplo.

6.2. RESULTADOS

A apresentação dos resultados foi organizada em duas partes. A primeira destina-se a avaliar a robustez do método em relação a sua capacidade de execução tanto no sistema original quanto com a presença de geração distribuída. Nessa parte, chamada de Robustez do sistema, serão avaliados um conjunto de faltas aplicadas à três linhas do sistema.

Já na segunda parte, serão avaliadas condições unitárias (um único tipo de falta), aplicados em vários locais no sistema. Em função da topologia do sistema de distribuição em questão, sabe-se que o efeito da falta pode variar em função do local onde a falta é aplicada. Dessa forma, busca-se com essa segunda parte, analisar a influência do sistema na resposta da ferramenta de localização e classificação.

6.2.1. Avaliação de robustez

A Figura 17 indica os pontos do sistema onde o conjunto de faltas foi aplicado com o objetivo de avaliar a resposta do método de localização e classificação proposto.

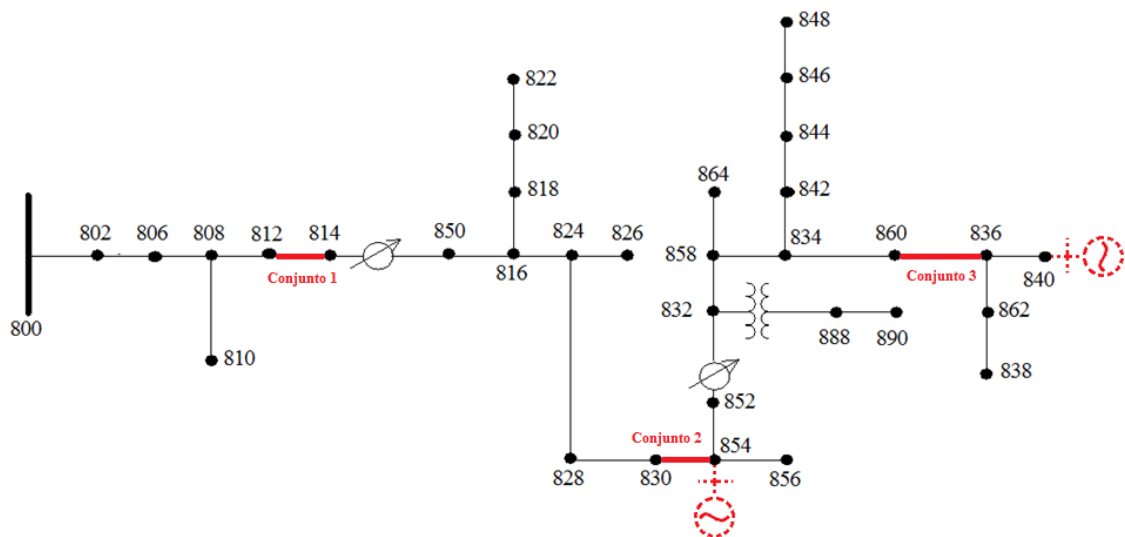


Figura 17 - Conjunto de faltas para avaliação de robustez do método.

Para cada um dos conjuntos apresentado, foram aplicadas faltas com diferentes características (distância, tipo e resistência). Os geradores estão tracejados pois o método foi aplicada com o sistema na configuração original e com a inclusão de geradores distribuídos. Os resultados são apresentados a seguir.

1) Conjunto 1

Para o conjunto 1, foram simuladas cinco condições de falta, todas referentes à linha 812-814, com as características descritas na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros de simulação de falta do Conjunto 1.

	Linha em falta	Tipo de falta	Distância de falta (%)	Resistência de falta (Ω)
1	812-814	C-T	50	10
2	812-814	AB	95	15
3	812-814	ABC-T	75	5
4	812-814	AC-T	5	15
5	812-814	ABC	25	5

Com base nas variações de tensão observadas nas simulações de falta acima, a ferramenta de localização e classificação e faltas foi aplicada. Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Aplicação de método de localização e classificação ao Conjunto 1.

		Linhas prováveis	Linha final	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)
Sistema sem GD	1	812-814, 816- 818	812-814	40	C-T	10
	2	812-814	812-814	90	AB	15
	3	812-814, 814- 850	812-814	70	ABC-T	5
	4	812-814	812-814	10	AC-T	15
	5	808-812, 812- 814	812-814	20	ABC	5
Sistema com GD	1	812-814, 850- 816	812-814	40	C-T	10
	2	812-814	812-814	90	AB	15
	3	812-814, 814- 850	812-814	70	ABC-T	5
	4	812-814	812-814	10	AC-T	15
	5	808-812, 812- 814	812-814	20	ABC	5

Os resultados do primeiro conjunto de faltas apresentaram um resultado satisfatório, sendo capaz de estimar o local e classificar a falta tanto para o sistema original quanto para o sistema com a presença de geração distribuída. Nota-se que, neste caso, a presença de geradores distribuídos no sistema, não exerce influência no método.

2) Conjunto 2

As características de falta, referentes à linha 830-854, são apresentadas na Tabela 24 Tabela 22.

Tabela 24 - Parâmetros de simulação de falta do Conjunto 2.

	Linha em falta	Tipo de falta	Distância de falta (%)	Resistência de falta (Ω)
1	830-854	ABC	50	5
2	830-854	A-T	50	10
3	830-854	BC	25	15
4	830-854	AB-T	5	10
5	830-854	ABC-T	95	5

Semelhante ao caso anterior, a aplicação do método proposto resulta nos seguintes resultados:

Tabela 25 - Aplicação de método de localização e classificação ao Conjunto 2.

		Linhas prováveis	Linha final	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)
Sistema sem GD	1	830-854	830-854	40	ABC	5
	2	830-854	830-854	40	A-T	10
	3	830-854	830-854	20	BC	15
	4	830-854	830-854	10	AB-T	10
	5	830-854	830-854	90	ABC-T	5
Sistema com GD	1	830-854	830-854	40	ABC	5
	2	830-854	830-854	40	A-T	10
	3	830-854	830-854	20	BC	15
	4	830-854	830-854	10	AB-T	10
	5	830-854	830-854	90	ABC-T	5

Mais uma vez, os resultados mostram a eficácia da ferramenta em localizar e classificar as faltas. Verifica-se ainda que, para os casos analisados nesse conjunto, os dois anticorpos mais aptos do conjunto final foram capazes de indicar de maneira direta a linha onde a falta está inserida.

3) Conjunto 3

A Tabela 26 apresenta as características de falta, relacionadas às simulação na linha 860-836.

Tabela 26 - Parâmetros de simulação de falta do Conjunto 3.

	Linha em falta	Tipo de falta	Distância de falta (%)	Resistência de falta (Ω)
1	860-836	ABC-T	50	5
2	860-836	A-T	5	10
3	860-836	BC	95	15
4	860-836	AC-T	75	5
5	860-836	ABC	25	10

Com a aplicação da ferramenta, têm-se os resultados indicados na Tabela 27.

Tabela 27 - Aplicação de método de localização e classificação ao Conjunto 3.

	Linhas prováveis	Linha final	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)
Sistema sem GD	1 860-836, 836-840, 836-862	860-836	40	ABC-T	5
	2 834-842	834-842	-	A-T	10
	3 860-836	860-836	90	BC	15
	4 860-836	860-836	70	AC-T	5
	5 860-836, 834-860	860-836	20	ABC	10
Sistema com GD	1 860-836, 836-840, 836-862	860-836	40	ABC-T	5
	2 860-836	860-836	10	A-T	10
	3 860-836, 836-862, 836-840	860-836	90	BC	15
	4 860-836, 836-862, 836-840	860-836	70	AC-T	5
	5 860-836	860-836	20	ABC	10

Analisando os resultados, nota-se que em um dos casos, para a condição do sistema sem GD, a ferramenta não foi capaz de identificar a correta linha em falta quando o algoritmo foi executado pela primeira vez. No entanto, com uma nova execução, a partir das mesmas informações de entrada, ele foi capaz de determinar a linha de maneira correta. Isso aconteceu somente neste caso, sendo a causa provável o número de gerações utilizadas. Em algumas situações, o processo evolutivo pode se dar tal que, a barra mais próxima ao local de falta não é incluída no processo. Como última observação, nota-se que, mesmo sem indicar a linha exata, o método apresentou a região onde a falta ocorreu além de ter conseguido definir o tipo de falta e sua resistência.

Já no caso com a presença de geração distribuída, não houve qualquer situação que tenha ocorrido algo semelhante.

6.2.2. Avaliação da influência do local da falta

Como forma de avaliar a influência do local de falta na resposta da metodologia proposta, foram realizadas 8 simulações de falta no sistema de distribuição e analisado os resultados encontrados.

A Tabela 28 apresenta as características de todas as 8 condições de falta utilizados.

Tabela 28- Características de falta utilizadas para avaliar a influência do sistema.

	Linha em falta	Tipo de falta	Distância de falta (%)	Resistência de falta (Ω)
1	806-808	C-T	25	5
2	820-822	A-T	50	10
3	824-828	BC	95	15
4	844-846	AC-T	75	5
5	862-838	B-T	25	10
6	832-858	ABC	50	15
7	834-860	AB	5	5
8	854-852	BC-T	75	10

Aplicando-se o método aos casos apresentados acima, tem-se os seguintes resultados, compilados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados da aplicação do método para avaliação da influência do sistema.

	Linhas prováveis	Linha final	Distância de falta (%)	Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	
Sistema sem GD	1	806-808, 802-806	806-808	20	C-T	5
	2	820-822	820-822	40	A-T	10
	3	824-828, 828-830	824-828	90	BC	15
	4	844-846	844-846	70	AC-T	5
	5	836-862, 862-838	862-838	20	B-T	10
	6	832-858	832-858	40	ABC	15
	7	858-834, 834-842, 834-860	834-860	10	AB	5
	8	854-852	854-852	70	BC-T	10
Sistema com GD	1	806-808, 802-806	806-808	20	C-T	5
	2	820-822	820-822	40	A-T	10
	3	824-828	824-828	90	BC	15
	4	844-846	844-846	70	AC-T	5
	5	836-862, 862-838	862-838	20	B-T	10
	6	832-858	832-858	40	ABC	15
	7	858-834, 834-842, 834-860	834-860	10	AB	5
	8	854-852	854-852	70	BC-T	10

Diante dos resultados obtidos, é possível inferir que o método é relativamente imune ao sistema, ao menos em relação ao utilizado no presente trabalho. Nota-se, a partir dos vários pontos e condições de falta, que a ferramenta foi capaz de determinar com relativo grau de precisão, a estimativa do local onde a falta ocorreu. Além disso, é importante frisar que em todos os casos analisado, a resposta do tipo e resistência de falta esteve sempre correta.

7. CONCLUSÕES

Este capítulo final apresenta um condensado de todo o conhecimento adquirido com o desenvolvimento do presente trabalho. Neste ponto, serão apresentadas as conclusões resultantes, bem como as limitações encontradas e futuras perspectivas para novos trabalhos, seguindo a mesma linha de pesquisa do tema abordado.

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

Como forma de apresentar soluções para os novos desafios encontrados em sistemas de distribuição, o presente trabalho se propôs ao desenvolvimento de uma metodologia destinada a localização e classificação de faltas em sistemas de distribuição. Buscou-se uma ferramenta capaz de apresentar desempenho satisfatório, aplicável tanto em sistemas convencionais, como os dotados de geração distribuída, característica essa, cada vez mais presente.

Para cumprir com os objetivos, a ferramenta foi baseada no conceito computacional de Sistema Imunológico Artificial. Essa abordagem, que permite a solução de problemas complexos, foi utilizada no presente trabalho para a determinação da localização de falta, além de extrair as informações sobre o tipo e sua resistência. O método foi desenvolvido de tal forma que um número reduzido de variáveis de entrada sejam necessárias, fazendo com que sua implementação em sistemas reais seja possível com um baixo custo de investimento.

Para o desenvolvimento e avaliação da ferramenta, foi utilizado o ambiente de simulação do Software *Matlab*. O sistema de distribuição adotado foi o IEEE34, bastante abrangente por possuir várias características existente em sistemas reais, tais como rede desequilibrada, existência de linhas e cargas monofásicas e bifásicas, presença de reguladores e transformadores, etc. Trabalhou-se com o sistema original e também foram inseridas unidades de geração distribuída ao modelo.

A metodologia foi aplicada a casos contemplando um amplo espectro de condições possíveis. Dessa forma, a resposta da ferramenta desenvolvida foi analisada para vários locais de falta no sistema, além de 11 tipos de falta e diferentes valores de

resistência de falta. De maneira geral, o método se mostrou robusto, uma vez que seu desempenho foi satisfatório tanto quando aplicado ao sistema convencional quanto ao sistema com a presença de geração distribuída. E por fim, destaca-se a simplicidade do método, pois utiliza como variáveis de entrada somente as tensões em poucos pontos do sistema de distribuição.

7.2. LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Como forma de aumentar a confiabilidade da metodologia, é necessário que estudos mais detalhados sejam conduzidos, principalmente relacionados à influência da carga no método. Dessa forma, como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se que o método seja avaliado também para diferentes condições de carga do sistema. No presente trabalho, essa informação ainda é desconhecida, já que a carga, embora presente no modelo de simulação, foi considerada constante. A utilização da ferramenta em outros sistemas de distribuição também seria importante para a generalização.

Outra sugestão é analisar o comportamento do método com a utilização de novas variáveis de entrada, como por exemplo, a variação das correntes do sistema. Neste caso, pode-se utilizar essas novas variáveis adicionalmente ou de maneira isolada.

Como o trabalho considerou a aquisição das medidas assumindo a existência de medição fasorial sincronizada, mostra-se conveniente a avaliação do método sob a luz da inexistência dessa tecnologia, ou seja, avaliar o sistema quando as variáveis de tensão que alimentam o algoritmo não estão completamente sincronizadas entre si.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição”. 2012;
- [2] Al-Dabbagh, M. Al-Dabbagh, L. “Neural networks based algorithm for detecting high impedance faults on power distribution lines”. In International Joint Conference on Neural Networks, USA, 1999;
- [3] ANEEL. “Índices de compensação de continuidade – Região Sul: Copel Distribuição – DIC, FIC e DMIC”. 2012;
- [4] Lee, S. J. “An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems”. IEEE Transactions on Power Delivery, USA, v.19, n.2, p. 524-532, 2004;
- [5] Brahma, S. M. “Fault Location in Power Distribution System With Penetration of Distributed Generation”. IEEE Transactions on Power Delivery, v.26, n. 3, 2011;
- [6] Kersting, W. H. “Distribution System Modeling and Analysis”. CRC Press. USA, 2001;
- [7] D. Novosel, D. Hart, Y. Hu, and J. Myllymaki, “System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads”, US Patent number 5,839,093 , November 17, 1998;
- [8] M.M. Saha, F. Provoost and E. Rosolowski, “Fault Location method for MV Cable Network”, DPSP, Amsterdam, The Netherlands, 9-12 April 2001, pp. 323-326;
- [9] R. Das, “Determining the locations of faults in distribution systems,” Ph.D. dissertation, Univ. Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, 1998;
- [10] Z. Q. Bo, G. Weller, and M. A. Redfern, “Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals,” Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Distrib., vol. 146, no. 1, Jan. 1999;
- [11] D.W.P.Thomas, R. J. O. Carvalho, and E. T. Pereira, “Fault location in distribution systems based on traveling waves,” presented at the IEEE Bologna Power Tech Conf., Bologna, Italy, Jun. 23–26, 2003;

- [12] H. Nouri, C. Wang, and T. Davies, "An accurate fault location technique for distribution lines with tapped loads using wavelet transform," Proc. IEEE Porto Power Tech., vol. 3, pp. 1–4, Sep. 2001;
- [13] J. J. Mora, G. Carrillo, and L. Perez, "Fault location in power distribution systems using ANFIS nets and current patterns," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf. Expo. Latin America, Venezuela, 2006, pp. 1–7;
- [14] L. S. Martins, J. F. Martins, C.M. Alegria, and V. Femilo Pires, "A network distribution power system fault location based on neural eigenvalue algorithm," presented at the IEEE Bologna Power Tech Conf., Bologna, Italy, Jun. 23–26, 2003;
- [15] J. Mora-Florez, V. Barrera-Nuez, and G. Carrillo-Caicedo, "Fault location in power distribution systems using a learning algorithm for multivariable data analysis," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 3, pp. 1715–1721, Jul. 2007;
- [16] Kauhaniemi, L. K. "Impact of Distributed Generation on the Protection of Distribution Networks". Developments in Power System Protection. IEE International Conference, Finland, 2004;
- [17] Vignolo, M. R. Z. "Transmission Networks or Distribution Generation?". Montevideo, Uruguay, 2002;
- [18] Alka Yadav, and Laxmi Srivastava. "Optimal Placement of Distributed Generation: An Overview and Key Issues." on International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 8 – 10 Janeiro. 2014;
- [19] Z. Guo-fang and L. Yu-ping. "A fault location algorithm for urban distribution network with DG," Proc. of 3rd Int. Conf. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Apr. 2008;
- [20] V. Calderaro, A. Piccolo, V. Galdi, and P. Siano, "Identifying fault location in distribution systems with high distributed generation penetration" Proc. of AFRICON, Nairobi, Kenya, Sep. 2009;
- [21] S. Javadian, M. Haghifam, and N. Rezaei, "A fault location and protection scheme for distribution systems in presence of dg using mlp neural networks," Proc. of IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, Calgary, Alberta, Canada, Jul. 2009;

- [22] Delboni, L. F. N. “Alocação Ótima de Equipamentos FACTS para Melhoria do Desempenho Dinâmico via Sistemas Imunológicos Artificiais”. Tese de doutorado: Federal University of Itajubá, Brasil, 2013;
- [23] Nossal, G. J. V. “Negative Selection of Lymphocytes”, *Cell*, 76, pág. 229 - 239. (1994);
- [24] Kephart, J. O., Sorkin, G. B. & Swimmer, M. “An Immune System for Cyberspace”, *Proc. of the IEEE SMC’97*, pág. 879-884. 1997;
- [25] Ada, G. L. & Nossal, G. J. V. “The Clonal Selection Theory”, *Scientific American*, 257(2), pp. 50-57, 1987;
- [26] Castro L. N. and Timmis J. “Artificial Immune Systems: A Novel Paradigm to Pattern Recognition”. *Soft Computing Journal*, Vol. 7, 2003;
- [27] Dasgupta, D., Yu, S. & Nino, F. “Recent Advances in Artificial Immune Systems: Models and Applications”. *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 11, pág. 1574-1587, 2011;
- [28] Zhong, Y., Zhang L., Gong, J., Li, P. “A Supervised Artificial Immune Classifier for Remote-Sensing Imagery”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, pág. 3957–3966, 2007;
- [29] Swain, R. K., et al. “Short-Term Hydrothermal Scheduling Using Clonal Selection Algorithm” *Electrical Power and Energy Systems*. Vol. 33, pág. 647-656, 2011;
- [30] Holanda, L., Rabelo, E. & Barbosa, D. “Power System Harmonics Estimation Using Clonal Selection Algorithm”. *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 11, 2013;
- [31] IEEE PES. “IEEE34 Node Test Feeder”. *Distribution System Analysis Subcommittee*, 2010;
- [32] KEMA Consulting Report for the Department of Trade and Industry’s. “The Contribution to Distribution Network Fault Levels From the Connection of Distributed Generation”. UK, 2005;
- [33] Sarabia, A. F. “Impact of Distributed Generation on Distribution System”. *Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark*, 2011;