

Fault Classification in Power Distribution Systems using Multiresolution Analysis and a Fuzzy-ARTMAP Neural Network

H. R. S. Bernardes, M. S. Tonelli-Neto, and C. R. Minussi

Abstract—This paper presents a tool for the detection and classification of short-circuits in electric power distribution systems, which is based on the combined use of multi-resolution analysis and Fuzzy-ARTMAP neural network. The multiresolution analysis allows the identification of singularities in the waveforms and the ART family network guarantees to the classifier the ability to continuously learn without losing the previously acquired knowledge. The entire diagnosis procedure is performed in a single step, reducing the computational effort. The efficiency of the system is verified by a direct accuracy analysis, and by a comparison between the Fuzzy-ARTMAP and the Euclidean-ARTMAP. Results show that the system is efficient and robust, being able to detect and classify 100% of the electrical faults considering the test that were performed.

Index Terms— Fault Detection, Fault Classification, Intelligent Systems, Multiresolution Analysis, Fuzzy-ARTMAP, Electric Distribution System.

I. INTRODUÇÃO

Por causa de suas características construtivas, majoritariamente formadas por linhas aéreas de condutores nus, os alimentadores de distribuição estão vulneráveis às contingências decorrentes de contatos acidentais de animais e da vegetação com componentes energizados, queimadas e intempéries [1], que podem causar a interrupção no fornecimento de energia elétrica. A agilidade e a precisão no processo de restauração da normalidade do sistema elétrico são fundamentais para garantir a confiabilidade do sistema [2]. Os investimentos em novas técnicas, tecnologias e filosofias de diagnóstico e prognóstico de faltas vêm sendo intensificados no intuito de minimizar a atuação dos operadores de subestações, tornando o processo de diagnóstico mais ágil e preciso [3]. Vários pesquisadores apontam técnicas com desempenho notoriamente satisfatórios, as quais são baseadas em diversificados conceitos para a extração das características do sinal, *e.g.*, análise de ondas viajantes, análise multirresolução, sistemas de inferência *fuzzy* e entropia do

sinal. A associação destas técnicas com os sistemas inteligentes, *e.g.*, *support vector machine*, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos e sistemas imunológicos artificiais, permite determinar o estado operativo do sistema com o uso da classificação de padrões. Sendo assim, tem-se uma poderosa ferramenta que auxilia os operadores e as equipes de manutenção na tomada de decisão.

Em [4], Zamboni *et al.* propõem um método automatizado de detecção, classificação e de localização em tempo real de falhas e transitórios eletromagnéticos em sistemas de distribuição de energia elétrica. O processamento dos sinais de corrente e tensão é realizado aplicando a técnica de decomposição em componentes ortogonais. O processo de detecção e de classificação da falta é realizado por redes neurais artificiais do tipo *multilayer perceptron*. A técnica proposta conta ainda com um sistema supervisorio desenvolvido na plataforma LabView que permite tanto a identificação dos distúrbios quanto o arquivamento das formas de onda. A metodologia demonstrou-se robusta e com resultados satisfatórios.

Decanini *et al.* apresentam em [1] uma estratégia para a detecção e classificação automática de faltas de curtos-circuitos no sistema de distribuição estruturada em estatística descritiva e análise das formas de onda. As características dos sinais de tensão e de corrente são extraídas empregando a transformada *wavelet* discreta, a análise multirresolução e o conceito de energia. Os índices comportamentais obtidos compõem os vetores de entrada para um conjunto de três redes neurais artificiais *Fuzzy-ARTMAP* paralelas entre si. A tomada de decisão quanto ao tipo de falta dá-se via uso da teoria da evidência de Dempster-Shafer. A metodologia proposta para o diagnóstico automático de curtos-circuitos apresentou robustez e eficácia detectando 100% das faltas apresentadas. O módulo classificador demonstrou excelente desempenho.

Henriques *et al.* desenvolveram em [5] um sistema para gestão de falhas transitórias em sistemas de distribuição de energia elétrica. O escopo do projeto contempla a aquisição dos sinais de tensão e de corrente nas três fases nos instantes pré-, em- e pós-falta. Os valores RMS das grandezas são computados a cada meio ciclo. Posteriormente, é calculado o valor relativo de cada meio ciclo em relação ao valor do primeiro meio ciclo das grandezas. São utilizadas duas redes neurais, uma para a classificação e outra para a localização da falta, sendo utilizado o algoritmo *backpropagation* no

H. R. S. Bernardes, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Presidente Epitácio, São Paulo, Brasil, haislan@ifsp.edu.br.

M. S. Tonelli-Neto, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, maurotonelli@gmail.com.

C. R. Minussi, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, carlos.minussi@unesp.br.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

processo de aprendizagem. O sistema reconheceu e localizou 100% das falhas apresentadas.

Em [6], Oliveira *et al.* exibem um esquema de proteção para a classificação de faltas baseado na combinação das informações dos ângulos de corrente com redes neurais. No estudo é proposta uma solução para discriminar defeitos do tipo em derivação (*shunt*), do tipo série e simultâneas (*shunt-série*), com cabo caído ao solo pelo lado da fonte e pelo lado da carga. A técnica associa o fator de sequência negativa aos ângulos das correntes de defeito. O módulo classificador de faltas utiliza redes *feedforward* alimentadas pelos módulos das tensões e das correntes de fase, e pelo fator de sequência negativa. São utilizadas três redes neurais: a primeira é responsável por identificar os defeitos *shunt*, a segunda identifica os defeitos do tipo série e a terceira atua na identificação dos defeitos simultâneos. Os resultados demonstraram que a identificação dos defeitos ocorreu de forma bastante eficiente.

Com o objetivo de auxiliar operadores das usinas de geração de energia elétrica, em [7], Moreto *et al.* apresentam uma metodologia para o diagnóstico automático de perturbações usando o sistema de inferência *fuzzy*. O sistema *fuzzy* é alimentando com os valores médios das componentes de sequência positiva para corrente e tensão referentes aos segmentos pré-transitório, transitório e pós-transitório. O conjunto de regras de inferência é elaborado com base no conhecimento dos engenheiros responsáveis pela análise oscilográfica. O método foi avaliado em duas etapas: na primeira são utilizados dados reais extraídos dos registradores digitais de perturbação enquanto que a segunda etapa é realizada com dados provenientes, majoritariamente, dos processos de simulação realizados no ambiente do software Simulink. Os resultados apresentados pelo sistema proposto foram satisfatórios para o diagnóstico e a classificação dos eventos.

Em [8] é proposto uma abordagem de aprendizado de máquina semi-supervisionada, baseada no cotreinamento de dois classificadores para a classificação de faltas, considerando os *microgrids*. A extração das características do sinal, é realizada com o uso da transformada *wavelet* discreta, enquanto que um algoritmo de busca harmônica é utilizado para identificar os melhores parâmetros. O desempenho do método proposto foi examinado em sistemas teste de transmissão e de distribuição em um ambiente de simulação, e usando um hardware experimental. Os resultados mostraram que a abordagem proposta fornece flexibilidade e alta precisão.

Neste contexto, fatores como o desenvolvimento socioeconômico, o constante avanço tecnológico, a crescente demanda por qualidade nos produtos e serviços, a necessidade de agilidade e minimização de recursos no processo de reestruturação, e a proteção do sistema frente às faltas evidenciam a necessidade do desenvolvimento de tecnologias de fácil implementação e operação simplificada.

Evidencia-se, também, a necessidade de que o sistema seja capaz de diagnosticar faltas com baixa quantidade de informações visto que a maior parte dos sistemas de

distribuição de energia elétrica ainda não é aparelhada de forma a compor um smart grid. Assim, a utilização de pontos mínimos de medição reduz os custos de investimentos em infraestrutura para aquisição, processamento e transmissão de dados entre várias unidades remotas de medição.

II. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema inteligente capaz de diagnosticar curtos-circuitos em um sistema de distribuição de média tensão com topologia radial, de forma rápida e eficaz utilizando uma quantidade reduzida de informações. A metodologia proposta permite a detecção e a identificação das fases envolvidas na falta, a um baixo custo computacional. O sistema proposto combina a transformada *wavelet*, a análise multirresolução e a rede neural *Fuzzy-ARTMAP*, proporcionando flexibilidade, robustez e precisão do resultado final. O modelo consiste na análise das oscilografias de corrente coletadas nos terminais do barramento de saída da subestação de distribuição.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Ambiente de Desenvolvimento

O módulo para a detecção e para a classificação de faltas de curto-circuito foi modelado no software Matlab R2019, versão estudante. O sistema teste foi modelado no aplicativo ATPDraw, que é um pré-processador gráfico para a versão ATP do EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*). O hardware utilizado foi um desktop Intel® Core™ I7-2600 3,40 GHz e 8 Gb RAM, equipado com o Sistema Operacional Windows 7.

B. Estrutura da Metodologia Proposta

Conforme apresentado na Fig. 1, o método proposto neste estudo pode ser dividido nos seguintes módulos:

- Módulo de aquisição de dados;
- Módulo de pré-processamento;
- Módulo de diagnóstico de faltas.

O método proposto necessita de uma pequena quantidade de informações para que a tarefa de detecção e classificação seja realizada, obtendo, assim, resultados satisfatórios a um baixo custo computacional.

C. Módulo de Aquisição de Dados

No intuito de reduzir o empenho de recursos financeiros usando uma baixa quantidade de informações, utiliza-se apenas um ponto de medição no barramento de saída da subestação de distribuição. De maneira geral, as concessionárias possuem as oscilografias de tensão e de corrente na saída da subestação. Logo, basta a instalação de um software no centro de controle e operação da subestação. Assim, as correntes elétricas das três fases (Ia, Ib e Ic) são monitoradas constantemente. Os sinais são amostrados a uma frequência 15,4 kHz, *i.e.*, 256 amostras por ciclo, por um intervalo de três ciclos. A amostragem subsequente é realizada com passo de meio ciclo.

Para a caracterização de curtos-circuitos, diversos autores

utilizam as oscilografias de corrente visto que os sinais de tensão perante este tipo de falta apresentam-se como afundamento de tensão. Entretanto, não necessariamente um afundamento de tensão reflete um curto-circuito. No intuito de evitar a classificação errônea da falta, i.e., induzir o sistema classificador a diagnosticar um afundamento de tensão como um curto-circuito, adota-se apenas os dados de corrente.

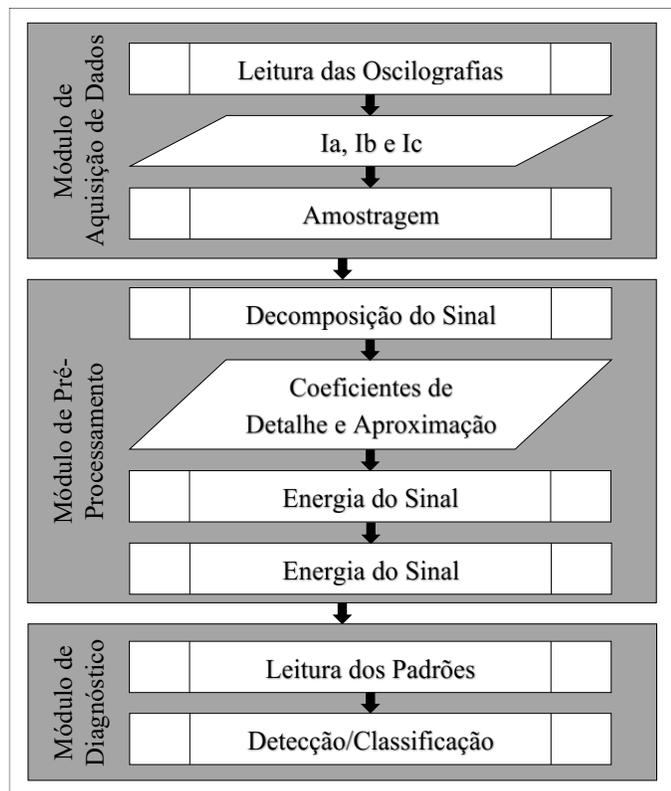


Fig. 1. Estrutura da metodologia proposta.

Embora seja conveniente empregar dados reais para esta tarefa, as concessionárias e os centros de pesquisa não possuem um banco de dados abrangente de formas de onda do sistema de distribuição de energia elétrica operando com curtos-circuitos. Além disso, sistemas teste vêm sendo modelados amplamente e tais simulações usadas para avaliar métodos focados no diagnóstico de falhas (detecção e classificação). Por esse motivo, é utilizado um sistema de teste para fornecer simulações que complementam essa falta de informação, permitindo a validação da metodologia proposta.

Os ensaios elaborados com uso do software ATP previram a distribuição das faltas em pontos estratégicos do circuito alimentador. Para cada ponto de análise foram simulados todos os 11 tipos possíveis de ocorrência. Desta forma, para cada barra adotada como barra de falta (vide Fig. 3), em cada condição de carregamento do sistema, foram associadas as variações no ângulo de inserção da falta, nos elementos envolvidos e na resistência de falta para os casos de curto-circuito envolvendo a terra. Cada barra submetida à falta concede 33 configurações de curto-circuito para cada uma das oito condições de carregamento do sistema, exceto pela barra 31, que oferece apenas 11 disposições. Buscou-se explorar a

diversidade de condições que os circuitos de distribuição de energia elétrica podem ser submetidos. Desta forma, os 2200 ensaios foram realizados com variações no carregamento do sistema, na localização do curto-circuito, nos elementos envolvidos na falta, na resistência de falta e no ângulo de inserção da falta. A variação dos parâmetros é apresentada na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS PARA GERAÇÃO DAS OSCILOGRAFIAS

Parâmetro	Valores/Características
Carregamento do sistema (%)	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 120.
Localização da falta (barra n°)	02, 04, 08, 11, 13, 15, 21, 27 e 31.
Elementos envolvidos	Fase A, Fase B, Fase C e Terra(g).
Resistência de falta (Ω)	0,1; 2,0; 10; 50 e 100.
Ângulo de inserção da falta	0°, 45° e 90°.

A Fig. 2 ilustra a oscilografia de corrente para o sistema em condição normal de operação nos três ciclos iniciais enquanto que um curto-circuito bifásico é exibido a partir do quarto ciclo. A forma de onda representa o sistema com 50% do carregamento total.

Com o intuito de explorar as diversas possibilidades na ocorrência dos curtos-circuitos em relação ao carregamento do sistema, uma função modificada para a geração de valores randômicos foi usada para realizar a distribuição pseudoaleatória do carregamento total entre os ramos do sistema de distribuição. O algoritmo foi elaborado de forma a limitar o carregamento máximo de cada barra em aproximadamente 120%, visto que as filosofias de proteção estabelecidas pelas concessionárias de distribuição exigem que os relés de proteção sejam parametrizados de forma a sensibilizar com uma sobrecarga de 125% para a proteção temporizada de fase. Este critério foi adotado com o objetivo de aproximar o sistema modelado às condições reais de operação e demanda energética dos consumidores conectados ao sistema de distribuição de energia elétrica.

D. Módulo de Pré-Processamento

Determinados distúrbios apresentam grande dificuldade em sua interpretação visto que as deformações causadas no sinal pela perturbação podem ser extremamente sutis. Uma solução conveniente consiste em ampliar o sinal, como um “zoom” fotográfico, em vários níveis de resolução diferentes. Essa estratégia, intitulada de Análise Multirresolução, possibilita inspecionar as particularidades contidas no sinal em diversos níveis de detalhamento. Esta técnica permite processar apenas os detalhes relevantes para uma determinada tarefa.

A função do módulo de pré-processamento é agrupar as assinaturas advindas das formas de onda em um menor número de parâmetros. Esta etapa garante a extração e seleção das principais informações presentes nas oscilografias.

A informação obtida no processo de amostragem é submetida à análise multirresolução [9] com o uso de transformada *wavelet*. A decomposição do sinal, usando uma *wavelet* da família Daubechies com filtro de quarta ordem (*db4*) [10], fornece os coeficientes de detalhe e os coeficientes de aproximação em três níveis de resolução. A análise

multirresolução adapta a resolução de um sinal possibilitando processar apenas os detalhes relevantes para uma determinada tarefa [11].

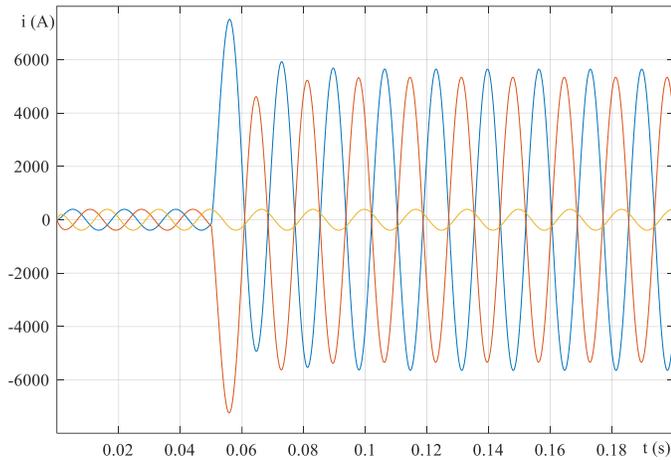


Fig. 2. Oscilografias de corrente do sistema em falta.

As funções wavelet e suas transformadas são instrumentos matemáticos que exprimem funções em diferentes níveis de resolução (escalas). Assim, na resolução menos refinada, um conjunto de dados será reproduzido como uma curva média. Conforme a escala é refinada detalhes são acrescentados ao padrão médio permitindo, então, a reconstrução precisa do sinal original. O escalonamento de uma função wavelet é equivalente à filtragem de um sinal com um banco de filtros, em que diferentes bandas de frequência do sinal são direcionadas para os respectivos filtros. Os coeficientes de detalhes são obtidos com o uso de um filtro de banda (altas frequências) que molda os detalhes da função enquanto que um filtro passa-baixa armazena as informações mais rústicas que equivalem aos coeficientes de aproximação. A junção destas duas categorias de coeficientes permite a exata reconstrução do sinal.

O uso da transformada wavelet na solução do problema em estudo é adequado por se tratar de um problema não estacionário e fornecer poucos parâmetros para fins da realização da rede neural, se comparada à transformada de Fourier. O emprego da transformada de Fourier no problema de detecção e classificação de curtos-circuitos demanda de um número significativamente superior de parâmetros, quando comparado ao uso da transformada wavelet. Esta necessidade torna o sistema mais complexo e requer maior esforço computacional. Ainda, faltas de alta impedância por apresentarem correntes de falta de baixa intensidade pode ser confundidas com a operação normal do sistema. Neste sentido, a transformada wavelet permite flexibilidade para implementações que considerem a detecção e a localização de faltas de alta impedância.

Os coeficientes de detalhe obtidos permitem detectar variações sutis na frequência fundamental do sinal em estudo. A decomposição produz 388, 197 e 102 coeficientes de detalhe para o primeiro, segundo e terceiro níveis de resolução, respectivamente. As informações gráficas da decomposição do sinal para um curto-circuito monofásico

(Ag) são apresentadas na Fig. 4.

O uso da análise multirresolução gera um número elevado de coeficientes de detalhe e de aproximação. Para agregar tais coeficientes e reduzir o custo computacional do sistema de diagnóstico, aplica-se o conceito energia sobre os coeficientes de detalhe (E_{i,N_3}^d) e de aproximação (E_{i,N_3}^a), ambos referentes ao terceiro nível de decomposição para as oscilografias de corrente ($i=I_a, I_b$ e I_c). O conceito energia é definido de acordo com (1) e (2) para os coeficientes de detalhe e aproximação, respectivamente.

$$E_{i,N_3}^d = \sum_{k=1}^{L_{N_3}^d} \left(|d_{i,N_3}^k| \right)^2 \quad (1)$$

$$E_{i,N_3}^a = \sum_{k=1}^{L_{N_3}^a} \left(|a_{i,N_3}^k| \right)^2 \quad (2)$$

sendo:

d_{i,N_3}^k o k-ésimo coeficiente de detalhe da oscilografia i no terceiro nível de decomposição; e

a_{i,N_3}^k o k-ésimo coeficiente de aproximação da oscilografia i no terceiro nível de decomposição.

O vetor E é definido como a assinatura do sinal e representa o estado operativo do sistema. Este vetor é formado pela energia dos coeficientes de detalhe e pela energia dos coeficientes de aproximação das três fases, conforme (3).

$$E = \left[E_{I_a,N_3}^d, E_{I_b,N_3}^d, E_{I_c,N_3}^d, E_{I_a,N_3}^a, E_{I_b,N_3}^a, E_{I_c,N_3}^a \right] \quad (3)$$

A última etapa na fase de pré-processamento consiste na normalização dos índices comportamentais. Esta operação adequa os valores que compõe o vetor de entrada no intervalo entre 0 e 1, e evita a proliferação de categorias.

Os índices comportamentais normalizados formam o vetor de entrada do módulo ART_A da rede *Fuzzy-ARTMAP* do módulo de diagnóstico.

$$\bar{E} = \left[\bar{E}_{I_a,N_3}^d, \bar{E}_{I_b,N_3}^d, \bar{E}_{I_c,N_3}^d, \bar{E}_{I_a,N_3}^a, \bar{E}_{I_b,N_3}^a, \bar{E}_{I_c,N_3}^a \right] \quad (4)$$

E. Módulo de Diagnóstico de Faltas

A detecção e a classificação são realizadas em um procedimento denominado de diagnóstico em etapa única. Esta técnica, associada à pequena quantidade de informação utilizada, reduz o tempo de processamento e, consequentemente, o custo computacional. Nesta fase, ao invés de utilizarem-se dois módulos separados, um para a detecção e outro para a classificação, o sistema utiliza uma rotina global unificada.

O sistema classificador é composto, fundamentalmente, por uma rede neural *Fuzzy-ARTMAP* [12]. O vetor de entrada do módulo ART_A é formado pelos índices comportamentais do sistema enquanto que os estímulos do módulo ART_B são formados pelo conjunto de vetores binários, que codificam os tipos de curtos-circuitos, ilustrados na Tabela II.

O uso da rede *Fuzzy-ARTMAP* soluciona o dilema plasticidade-estabilidade, o que garante ao sistema classificador a capacidade de aprendizado contínuo de novos padrões sem perder o conhecimento previamente adquirido. A presença dos componentes *Fuzzy-ART* cria categorias de

curtos-circuitos uma maior quantidade de configurações possibilita uma maior eficácia no diagnóstico das faltas. Por outro lado, uma das principais características de uma rede neural deve ser sua capacidade de generalização. Desta forma, conciliando a busca por resultados satisfatórios com a validação da capacidade real de generalização da rede neural, os padrões de entrada são randomizados antes de serem apresentados para o sistema classificador.

TABELA III
PARÂMETROS DA RNA FUZZY-ARTMAP

Parâmetro	Valor
Parâmetro de escolha	0,01
Taxa de aprendizagem - ARTa	0,60
Taxa de aprendizagem - ARTb	1,00
Parâmetro de vigilância - ARTa (baseline)	0,75
Parâmetro de vigilância - ARTb	1,00
Parâmetro de vigilância - interART	1,00
Parâmetro de vigilância diagnóstico - ARTa	0,10
Parâmetro de incremento	0,000101

C. Avaliação da Metodologia Proposta

A avaliação da metodologia proposta é realizada usando dois critérios: a análise direta de desempenho e a análise comparativa.

1) Análise Direta de Desempenho

O primeiro critério para a análise do desempenho da técnica aplicada avalia a quantidade de curtos-circuitos classificados corretamente ($T_{acertos}$) em relação ao número total de faltas apresentadas na etapa de diagnóstico ($T_{acertos} + T_{erros}$), conforme (5). O método proposto concentra-se na identificação das fases envolvidas no curto-circuito, *i.e.*, a constatação do envolvimento do elemento terra em faltas bifásicas ou trifásicas é desnecessária. Além de não ser uma informação relevante, curtos-circuitos com o elemento terra apresentam estatisticamente baixa frequência de ocorrência. Na Tabela IV são apresentados os resultados obtidos.

$$D_{\%} = \left(\frac{T_{acertos}}{T_{acertos} + T_{erros}} \right) \times 100 \quad (5)$$

O método proposto apresentou robustez e foi capaz de identificar todos os curtos-circuitos apresentados para o sistema de testes utilizado. A análise da Tabela IV demonstra a alta capacidade de generalização do módulo de diagnóstico mesmo com a pequena quantidade de informações oferecidas pelo sistema.

TABELA IV
DESEMPENHO DO MÉTODO PROPOSTO USANDO A RNA FUZZY-ARTMAP

Tipo de curto-circuito	Erros	Acertos	$D_{\%}$
Ag	0	48	100
Bg	0	61	100
Cg	0	52	100
AB / ABg	0	92	100
AC / ACg	0	99	100
BC / BCg	0	100	100
ABC / ABCg	0	98	100
Total	0	550	100

Número total de categorias criadas (N) = 33

Em relação ao tempo de resposta, o sistema proposto

precisou de 8,6 segundos para aprender os 1650 padrões apresentados na fase de treinamento. O tempo gasto no diagnóstico dos 550 padrões submetidos à análise foi de 0,6 segundos.

2) Análise Comparativa de Desempenho

Uma segunda análise foi realizada, em caráter comparativo. Para esta finalidade a rede *Fuzzy-ARTMAP* do módulo de diagnóstico foi substituída pela rede *Euclidean-ARTMAP* [16]. Os resultados obtidos com a substituição do tipo de rede neural são apresentados na Tabela V.

D. Análise da Sensibilidade da Rede Fuzzy-ARTMAP em Função da Variação dos Parâmetros

Uma rotina de variação de parâmetros foi desenvolvida com o intuito de analisar sensibilidade da rede *Fuzzy-ARTMAP*. O processo utiliza os parâmetros exibidos na Tabela III como referência. A partir desse padrão variações foram efetuadas no parâmetro de escolha, na taxa de aprendizagem e nos parâmetros de vigilância.

A metodologia proposta mostrou-se igualmente eficaz com a utilização das duas redes neurais. Entretanto, a topologia equipada com a rede *Fuzzy-ARTMAP* demonstrou-se significativamente mais eficiente, pois demonstrou uma maior capacidade de generalização, criando menos categorias, otimizando assim os recursos empregados.

TABELA V
DESEMPENHO DO MÉTODO PROPOSTO USANDO A RNA EUCLIDEAN-ARTMAP

Tipo de curto-circuito	Erros	Acertos	$D_{\%}$
Ag	0	48	100
Bg	0	61	100
Cg	0	52	100
AB / ABg	0	92	100
AC / ACg	0	99	100
BC / BCg	0	100	100
ABC / ABCg	0	98	100
Total	0	550	100

Número total de categorias criadas (N) = 44

1) Parâmetro de Escolha

O parâmetro de escolha controla a seqüência de busca entre os nós da camada de reconhecimento, *i.e.*, quando um padrão de entrada pertence a mais de um hiper-retângulo o parâmetro de escolha assegura que o menor dos hiper-retângulos seja o escolhido dentre os demais. Os resultados para a variação do parâmetro de escolha são apresentados na Tabela VI.

TABELA VI
SENSIBILIDADE DA REDE FUZZY-ARTMAP PARA A VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE ESCOLHA

Parâmetro de escolha	N	$D_{\%}$
0,10	33	100
0,20	33	100
0,30	33	100
0,40	33	100
0,50	33	100
0,60	33	100
0,70	33	100
0,80	33	100
0,90	33	100
0,99	33	99,82
1,00	33	99,82

O incremento isolado do parâmetro de escolha não causou nenhum efeito significativo nos resultados. Entretanto, foi possível notar que a eficácia do sistema é comprometida à medida que o valor de α se aproxima da unidade.

2) Taxa de Aprendizagem

A taxa de aprendizagem controla a velocidade de adaptação da rede, *i.e.*, quanto menor for o seu valor mais lento será o aprendizado da rede. Assim, além de diversificar a taxa de aprendizagem, a quantidade de vezes que os padrões são apresentados à rede também foi modificada. Esta abordagem é análoga ao processo de aprendizagem dos seres inteligentes, *e.g.*, quanto mais vezes a experiência é repetida maior será a absorção do conhecimento e, conseqüentemente, a capacidade de generalização com problemas similares. Na Tabela VII são apresentados os resultados para a alteração da taxa de aprendizagem.

TABELA VII
SENSIBILIDADE DA REDE FUZZY-ARTMAP PARA A VARIAÇÃO DA TAXA DE APRENDIZAGEM

Taxa de aprendizagem	i	N	$D_{\%}$
0,10	1	22	97,45
0,10	5	30	100
0,20	1	27	98,36
0,20	2	36	98,91
0,20	3	37	99,82
0,20	4	39	100
0,25	1	32	98,72
0,25	2	34	100
0,30	1	29	99,82
0,30	2	35	100
0,35	1	31	99,82
0,35	2	34	100
0,40	1	29	100

O incremento da taxa de aprendizagem apresenta uma tendência no aumento das categorias criadas. Ao passo que aumentando a quantidade de vezes que os padrões são apresentados à rede ocorre uma tendência inicial de melhoria nos resultados. No entanto, existe um limiar para o incremento desta combinação. Após este limite a eficiência tende a cair, causando uma proliferação de categorias.

3) Parâmetro de Vigilância

O parâmetro de vigilância condiciona a rede quanto à capacidade de generalização. Assim, quanto menor o valor atribuído à ρ menos categorias são criadas, o que de maneira geral amplia a capacidade de generalização. Entretanto, a escolha de forma arbitrária um valor pequeno para o parâmetro de vigilância pode causar o efeito colateral de forçar que determinados padrões sejam alocados em categorias que não os representam da forma correta. Logo, é necessário estabelecer um valor para ρ que crie o mínimo de categorias suficientes para representar todas as particularidades do sistema em estudo.

Na Tabela VIII são apresentadas as principais combinações para as variações dos parâmetros de vigilância.

Nota-se que mesmo para uma condição relaxada dos parâmetros de vigilância, *i.e.*, para um número reduzido de categorias criadas, a capacidade de generalização e, conseqüentemente, a eficácia do sistema foi altamente

satisfatória. Entretanto, para que todas as faltas apresentadas ao sistema classificador sejam corretamente identificadas, 33 categorias são necessárias.

TABELA VIII
SENSIBILIDADE DA REDE FUZZY-ARTMAP PARA A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE VIGILÂNCIA - ART_A

Parâmetro de vigilância - ART _A	Parâmetro de vigilância de diagnóstico - ART _A	N	$D_{\%}$
0,10	0,10	13	99,45
0,11	0,11	13	99,45
0,12	0,12	13	99,45
0,13	0,13	13	99,45
0,56	0,56	13	99,45
0,57	0,57	14	99,64
0,58	0,10	15	99,64
0,59	0,59	15	99,64
0,60	0,60	14	99,64
0,61	0,61	15	99,45
0,62	0,62	16	99,64
0,63	0,63	17	99,64
0,74	0,74	32	99,09
0,75	0,10	33	100

E. Resposta da Rede às Faltas Simuladas

Os dados expostos neste trabalho bem como as observações realizadas durante todo o processo de investigação demonstram que as variações nas configurações dos curtos-circuitos modelados relacionadas a localização da falta, a variação da resistência de falta, as condições de carregamento do sistema e ao ângulo de inserção da falta causam interferência desprezível no sistema de detecção e de classificação dos curtos-circuitos. Por outro lado, a presença do elemento terra (g) na falta causa significativa perturbação no processo de classificação. Para as faltas monofásicas e bifásicas este problema pode ser facilmente resolvido inserindo no vetor de índices comportamentais a componente de sequência zero.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para o diagnóstico de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica. Esta ferramenta tem proporcionado maior eficiência e agilidade no diagnóstico de falhas. A técnica utiliza a análise multirresolução associada a uma rede neural artificial Fuzzy-ARTMAP. Os índices comportamentais do sistema são obtidos com a aplicação do conceito energia sobre os coeficientes de detalhe e de aproximação. A classificação das faltas é realizada usando uma rede neural Fuzzy-ARTMAP, que torna o sistema classificador flexível. A validação do método proposto é realizada com duas abordagens: a análise direta e a análise comparativa. Na análise direta computa-se a quantidade de faltas identificadas corretamente pelo sistema classificador. Na abordagem comparativa a rede neural Fuzzy-ARTMAP é substituída pela rede Euclidean-ARTMAP e os resultados fornecidos pelas duas técnicas foram comparados. O sistema proposto demonstrou-se robusto e eficaz, sendo capaz de detectar e identificar corretamente todos os tipos de curtos-circuitos no sistema submetido às simulações. Além disso, o sistema demonstrou-se eficiente exibindo uma alta capacidade

de generalização. Nota-se que apesar do resultado obtido nos experimentos realizados revelar uma alta taxa de sucesso (100%, ou muito próximo) isso não garante que o método proposto seja suficientemente preciso para todos os casos, pois esse algoritmo não foi testado exaustivamente. Há apenas evidências de desempenho bastante satisfatório nos casos analisados. Notavelmente, esse algoritmo pode, perfeitamente, receber inovações, inclusive visando à inclusão de novos tipos de perturbações e diferentes configurações da rede elétrica elétrica. Uma análise referente à influência dos parâmetros da rede neural *Fuzzy-ARTMAP* foi elaborada, possibilitando uma quebra do pragmatismo dos valores pré-estabelecidos de parâmetros. Deve-se enfatizar que todos os resultados apresentados e discutidos neste trabalho foram obtidos com apenas uma época, em que uma época é definida como um ciclo de treinamento em um conjunto inteiro de padrões de entrada. Técnicas que são comumente usadas na literatura, *e.g.*, rede neural de *multilayer perceptron* com retro propagação, exigem mais épocas para obter resultados semelhantes e, em algumas situações, podem enfrentar problemas de convergência.

REFERENCES

- [1] Decanini, J. G. M. S.; Tonelli-Neto, M. S. and Minussi, C. R. “Robust fault diagnosis in power distribution systems bases on fuzzy Artmap neural network-aided evidence theory”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 11, pp. 1112-1120, 2012.
- [2] Bi, T. S., Ni, Y. X., Shen, C. M. and Wu, F. F. “A novel ANN fault diagnosis system for power systems using dual GA loops in ANN training”, 2000 Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, cat. no. 00CH37134, pp. 425-430, 2000.
- [3] Tonelli-Neto, M. S., Decanini, J. G. M., Lotufo, A. D. P. and Minussi, C. R. “Fuzzy based methodologies comparison for high-impedance fault diagnosis in radial distribution feeders”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no.6, pp. 1557-1565, 2017.
- [4] Zamboni, L., da Silva, I. N., Soares, L. N. and Fernandes, R. A. S. “Fault detection in power distribution systems using automated integration of computational intelligence tools”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 9 no. 4, pp. 522-527, 2011.
- [5] Henriques, H. O., Pecanha, M. L. P., Fortes, M. Z., D’Avila, C. J. R., da Silva Leite, L. S. B. and Neto, A. F. M. “Development of transient fault management methodology”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 4, pp. 618-625, 2014.
- [6] Oliveira, A. R., Garcia, P. A. N., Oliveira, L. W., Oliveira, E. J. and Silva, H. A. “Fault classification in distribution systems based on fault current angles”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 1, pp. 199-205, 2016.
- [7] Moreto, M. and Cieslak, D. A. G. “Fuzzy inference system to automatic fault classification in power plants”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 746-751, 2016.
- [8] Abdelgayed, T. S., Morsi, W. G. and Sidhu, T. S. “Fault detection and classification based on co-training of semisupervised machine learning”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1595-1605, 2017.
- [9] Mallat, S. G. “A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674-693, 1989.
- [10] Daubechies, I. Ten lectures on wavelets, vol. 61. Siam, 1992.
- [11] Mallar, S., I. A Wavelet Tour of Signal Processing The Sparse Way, 3.ed, Elsevier, 2009.
- [12] Carpenter, G. A., Grossberg, S., Markuzon, N., Reynolds, J. H. and Rosen, D. B. “Fuzzy ARTMAP: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps”, *IEEE Transactions on neural networks*, vol. 3, no. 5, pp. 698-713, 1992.

- [13] Wakileh, J. J. and Pahwa, A. “Optimization of distribution system design to accommodate cold load pickup”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 1, pp. 339-345, 1997.
- [14] Clinard, K. N. “Distribution automation: research and the emergence of reality”, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 8, pp. 2071-2075, 1984.
- [15] Grainger, J. J. and Civanlar, S. “Volt/Var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part i: the overall problem”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 11, pp. 3278-3283, 1985.
- [16] Barros, A. C., Tonelli-Neto, M. S., Decanini, J. G. M. S., and Minussi, C. R. “Detection and classification of voltage disturbances in electrical power systems using a modified Euclidean ARTMAP neural network with continuous training” *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 19, pp. 2178-2188, 2015.



Haislan Ranelli Santana Bernardes possui graduação em Engenharia da Elétrica (2011) pela Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, mestrado em Engenharia Elétrica (2019) pela Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”-UNESP, Campus de Ilha Solteira.

Atualmente, está desempenhando a função de Professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus Presidente Epitácio. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: sistemas de distribuição de energia elétrica, diagnóstico de falhas e sistemas inteligentes.



Mauro de Souza Tonelli Neto possui graduação (2009), mestrado (2012) e doutorado (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”-UNESP, Campus de Ilha Solteira. Atualmente é pós-doutorando pela UNESP, Campus de Ilha Solteira. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em

Sistemas Elétricos de Potência, atuando nos seguintes temas: sistemas de distribuição de energia elétrica, diagnóstico e prognóstico de falhas, e sistemas inteligentes.



Carlos Roberto Minussi possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (1978), mestrado (1981) e doutorado (1990) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é Professor Titular (a partir de 2005) da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”-UNESP,

Campus de Ilha Solteira. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: sistemas elétricos de potência, estabilidade transitória, controle preventivo dinâmico, previsão de carga e sistemas inteligentes.