

Diagnóstico de Falhas em Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando Redes Imunológicas Artificiais

Helton do Nascimento Alves^[1]

Kelly dos Santos Silva^[2]

Cristiana da Silva Alexandre^[3]

^[1] Departamento de Eletroeletrônica (DEE), ^{[2][3]} Engenharia Elétrica Industrial
Grupo de Pesquisa em Sistemas Elétricos (GPSE)

São Luís, Brasil.

helton@ifma.edu.br, santoss.kelly@outlook.com, cristianaalexandre@hotmail.com

Resumo — Este trabalho apresenta uma metodologia para diagnósticos de falhas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. A ferramenta desenvolvida atua em complementariedade com o sistema de proteção, auxiliando na tomada de decisão e, portanto, acelerando os procedimentos para restabelecimento das condições normais de operação. O algoritmo é baseado em uma ferramenta extraída de Redes Imunológicas Artificiais e utiliza apenas as medições de corrente nas três fases obtidas na subestação para realizar o monitoramento do sistema.

Palavras-chave — Redes Imunológicas Artificiais, Diagnóstico de Falhas, Redes de distribuição.

I. INTRODUÇÃO

O constante aumento da demanda por processos industriais mais sofisticados tem exigido do sistema elétrico alto grau de continuidade e qualidade em seus serviços, o que tem incentivado o desenvolvimento de ferramentas de apoio à operação, capazes de aumentar a confiabilidade do sistema. Além disso, as indústrias, que na sua grande maioria tem a energia como matéria-prima principal dentro da produção, tornam-se cada vez mais exigentes quanto à continuidade e qualidade da mesma, uma vez que esta é um fator fundamental para que seu produto seja competitivo no mercado. Neste sentido, investir em uma proteção adequada e eficaz desempenha um papel fundamental, tendo em vista o impacto financeiro que a qualidade da energia elétrica traz aos consumidores e às concessionárias. No âmbito dos sistemas de distribuição de energia elétrica a ocorrência de falhas é mais frequente [1], onde estas são causadas por mau funcionamento de equipamentos e fenômenos naturais, por exemplo. Distúrbios como estes diminuem os índices de qualidade e elevam os custos operacionais. Considerando que, normalmente, os alimentadores de distribuição não possuem um nível satisfatório de monitoramento e controle

de suas operações, o estudo para melhorias na monitoração, proteção e controle em redes de distribuição para redução dos impactos das grandes perturbações é de grande relevância.

O processo de automação na operação de proteção já vem sendo aplicado há várias décadas [2]. Recentemente, várias técnicas estão sendo empregadas no intuito de desenvolver uma ferramenta computacional para diagnóstico e localização precisa de falhas em redes de distribuição. Como exemplo tem-se os trabalhos desenvolvidos em [3], que utiliza redes neurais artificiais, sistemas rugosos e sistemas especialistas para localizar o setor e o tipo de falta ocorrida dentro de uma subestação; [4] que utiliza redes neurais Perceptron Multicamadas e Análise Espectral de Sinais na detecção, classificação e localização de falhas; [5] que utiliza redes neurais artificiais e transformada wavelet para detecção e localização de falhas; [6] que faz uma abordagem baseada em redes neurais artificiais e transformada de Stockwell na localização de falhas em linhas de transmissão.

A literatura propõe, principalmente, a utilização de sistemas inteligentes e sistemas especialistas na tarefa de diagnóstico de falhas. A utilização das técnicas de inteligência artificial se adequam bem ao diagnóstico de falhas, especialmente aquelas que têm características de reconhecimento de padrões. Dentre essas técnicas, as Redes Imunológicas Artificiais (RIA) caracterizam-se como um promissor campo da inteligência artificial. Inspirado nos Sistemas Imunológicos Biológicos, essa técnica busca reproduzir computacionalmente as principais características, propriedades e habilidades dos anticorpos. As RIAs caracterizam-se pela detecção de um comportamento anômalo diferente de um padrão estabelecido, por isso apresentam-se como uma ferramenta adequada em termos de aplicabilidade no diagnóstico de falhas em sistemas de potência.

Este trabalho propõe uma ferramenta de monitoramento em tempo real para diagnóstico de faltas em redes aéreas de distribuição, utilizando como ferramenta RIA. A metodologia implementada é baseada no monitoramento das correntes de cada conjunto trifásico dos transformadores de corrente (TCs) de proteção instalados na subestação. O objetivo da ferramenta é auxiliar as equipes de manutenção das concessionárias de energia elétrica na detecção de distúrbios nos alimentadores, bem como na operação durante uma falta e supervisão do sistema de proteção. Foi dada ênfase a faltas envolvendo curto-circuito monofásico, bifásico, fase-fase-terra e trifásico, e distúrbios de qualidade de energia foram considerados como situação normal do sistema.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O sistema de distribuição de energia elétrica vem apresentando ao longo dos anos um aumento na sua demanda devido ao crescimento populacional e desenvolvimento industrial. Esse aumento tem tornado maiores as exigências dos padrões de qualidade e continuidade de energia elétrica, de modo a garantir que estes sistemas operem em condições normais evitando assim danos às instalações. Minimizar o tempo de paradas não programadas é fundamental para alcançar esse padrão.

As tradicionais práticas de diagnóstico de defeitos em redes de distribuição se baseiam no julgamento dos operadores, levando em conta suas experiências em análise e planejamento de ações corretivas. Durante a ocorrência de uma falta em subestações automatizadas, os sinais de alarmes recebidos indicando anormalidade, caracterizam-se pelo status da atuação dos relés e dos disjuntores. Na sequência (detecção, classificação e localização) e em tempo mínimo, os operadores devem estimar a situação do defeito. Assim, em vista dos complexos sistemas de distribuição existentes, realizar a automação de forma eficiente é considerado uma tarefa difícil, se os procedimentos adotados baseiam-se somente nos operadores humanos. Devido a esses fatores, torna-se imprescindível o uso de ferramentas de apoio à operação do sistema, capazes de aumentar a sua confiabilidade, reduzindo o número e/ou duração de paradas não programadas das instalações.

III. ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto neste trabalho é baseado em redes imunológicas artificiais para detecção de faltas em redes de distribuição. A abordagem realizada pela RIA é baseada em uma técnica, inspirada no sistema imunológico biológico, chamada seleção negativa que busca fazer a detecção de elementos que não são comuns à rede. O algoritmo funciona de forma a capturar amostras de onda das correntes nas três fases, em tempo real, na subestação, e analisá-las através de RIA. A partir dessa análise, caso haja uma falta, a mesma é detectada e classificada. Foram enfatizadas situações de falta envolvendo curto-circuito e problemas de qualidade de energia.

A. Sistema imunológico artificial

O sistema imunológico é responsável pela proteção do organismo contra agentes não próprios, ou seja, estranhos ao mesmo. Esses agentes são chamados de patogênicos, enquanto as células do organismo são chamadas de células próprias. A tarefa de reconhecimento e classificação das células como próprias ou não próprias é uma das principais atividades do sistema imunológico. Para cumprir seu papel na proteção do organismo, o sistema imunológico possui dois mecanismos de defesa: o sistema imunológico inato e o adquirido. O mais eficiente deles é o sistema adquirido, que age quando o sistema inato, o primeiro a ser acionado, não consegue, por si só, proteger o organismo. As células responsáveis pelo reconhecimento dos agentes patogênicos no sistema adquirido são os linfócitos. Estes reconhecem os agentes não próprios unindo-se a eles. O reconhecimento é feito quando ocorre uma ligação entre os agentes patogênicos e os receptores presentes na superfície do linfócito. A parte do agente patogênico que se une aos receptores do linfócito é chamada de epítipo. Os linfócitos se dividem em dois tipos: células B e T. As células B são capazes de identificar agentes estranhos através da detecção de antígenos presentes na sua superfície e, assim, destruí-los. As células do tipo T são responsáveis pela imunidade celular e pelo processo de discriminação próprio e não próprio. Durante a maturação, essas células passam pelo processo de seleção negativa, onde as células T que reagem com células próprias são rejeitadas, e somente as que não casam com nenhuma célula do corpo circularão pelo organismo. Devido à variedade de agentes infecciosos, não há possibilidade de que o corpo produza uma célula T capaz de reagir plenamente com todos os epítopos dos elementos invasores. Assim, os detectores reconhecem um antígeno pela reação de seus epítopos com apenas alguns epítopos do elemento invasor, o que é chamado de casamento parcial. Desta forma tem-se que um único detector é capaz de detectar diversos agentes patogênicos, o que é uma vantagem, pois é necessária uma pequena quantidade de linfócitos para reconhecer uma grande variedade desses agentes [7].

B. Algoritmo de Seleção Negativa

O algoritmo de seleção negativa (ASN) proposto por [8] é inspirado no sistema imunológico biológico e funciona de maneira análoga ao mecanismo de seleção negativa que sofrem as células T.

O ASN compreende três fases, sendo as duas primeiras executadas de forma *off-line* e a última de forma *on-line*:

- Fase 1: definição dos dados a serem protegidos;
- Fase 2: geração de detectores;
- Fase 3: monitoramento de erro;

Analogamente ao corpo, os elementos que representam um sistema que se quer monitorar, são denominados próprios e qualquer anomalia que possa ocorrer nele é denominado elemento não próprio. Esta etapa caracteriza a fase de definição dos dados a serem monitorados.

A fase de geração de detectores ocorre similarmente ao que acontece no Timo, onde se encontram as células T. Amostras dos elementos próprios são apresentadas a elementos candidatos a detectores, que são análogos às células T imaturas. Se ocorrer um casamento entre o elemento candidato a detector e os elementos próprios, esse candidato é rejeitado, caso contrário, é armazenado como detector.

O ASN também utiliza o recurso do casamento parcial para estabelecer o casamento entre elementos. Dessa forma, não é necessário que todos os pontos que compõe um detector casem com um elemento do corpo para que este seja considerado um corpo estranho.

C. Definição dos dados a serem protegidos

Nessa fase são definidos os dados a serem protegidos. Esses dados representam os elementos próprios do sistema. Foram definidos como elementos próprios situações sem distúrbio e com distúrbios produzidos por transitórios, elevação e afundamento de tensão, notching e spike. Os dados a serem protegidos foram organizados como um conjunto de vetores C, com tamanho l , e seus valores foram descritos pelo alfabeto decimal. Os elementos próprios foram gerados a partir do janelamento das ondas de correntes amostradas no alimentador sem faltas e com os distúrbios de qualidade de energia citados acima. Visto que esta corrente pode ter uma variação dentro do funcionamento normal do sistema, o algoritmo tem como variáveis de entrada os percentuais máximos e mínimos de variações normais da corrente lida, estabelecidos pelo operador do sistema. Portanto, são gerados outros elementos próprios baseados nesses intervalos.

D. Geração de Detectores

Nessa fase são gerados, de forma aleatória, vetores candidatos a detectores, também de tamanho l . Esses vetores são testados a fim de verificar se os mesmos casam com elementos próprios. Caso ocorra o casamento, o vetor candidato é descartado. Caso contrário, o vetor é incluído no conjunto D de detectores. O processo de teste é repetido até que o número desejado de detectores seja alcançado no conjunto D. Para isso, é gerado um grupo inicial de candidatos que são testados, primeiramente, com amostras sem falta. Após a geração desse grupo inicial, o mesmo é testado com amostras contendo afundamento. Caso ocorra o casamento com algum detector, este será eliminado do conjunto de candidatos. Esse processo é realizado para cada uma das amostras com distúrbios de qualidade de energia, utilizando nos teste de verificação de casamento o último conjunto de candidatos a detectores salvo. Cada ponto do vetor candidato a detector é gerado no intervalo de $-10I_N$ a $+10I_N$ onde I_N é o módulo do valor de pico da corrente de carga.

Foram utilizados critérios de casamento parcial nos testes de casamento entre candidatos a detectores e elementos próprios. Para isso, foi definido um número mínimo r , com $r < l$, de elementos do vetor D que precisam casar com

elementos do vetor C para que se considere que houve um casamento.

Nos sistemas de monitoramento de erros dois critérios para casamento parcial são mais utilizados: r -contínuos e r -Hamming. No algoritmo proposto foi utilizado o critério r -Hamming que consiste em verificar se dois vetores, de mesmo tamanho, casam em, pelo menos, r posições correspondentes e não necessariamente de forma contínua.

Como no alfabeto decimal o casamento entre os vetores não acontece com valores exatos, é considerada em um dos vetores uma margem para mais e para menos, dessa forma, para qualquer valor nesse intervalo, o casamento é considerado. Essa margem é atribuída ao vetor amostrado como um desvio ε .

No algoritmo proposto são gerados detectores específicos para cada fase, assim, são considerados desequilíbrios entre fases.

E. Monitoramento de Erro

Nessa fase é verificado de forma contínua se há casamento entre os detectores D e R, onde R é um vetor, de tamanho l , que representa um elemento qualquer encontrado no sistema em determinado instante. Esse elemento representa a janela da corrente capturada em tempo real na subestação. São capturadas janelas de corrente para cada fase e comparadas com o respectivo grupo de detectores. Se algum detector, em algum momento, casar com um vetor R, significa que ocorreu uma mudança em R. Quando em uma determinada janela de dados os detectores são acionados, caracteriza-se que uma falta ocorreu e esta é classificada com base nas fases onde foram detectados os distúrbios.

F. Aquisição de dados

Os dados do sistema obtidos pelo algoritmo proposto correspondem às amostras das formas de onda das correntes medidas na subestação. A obtenção desses dados ocorre na geração dos elementos próprios, que é feita *off-line*, onde o sistema não poderá estar submetido à faltas, e no monitoramento do erro, que é feita em tempo real. Utilizou-se taxa de amostragem de 2,4 kHz e janela de tempo de um ciclo, que correspondeu a um vetor de 40 posições. O software ATP (*Alternative Transient Program*) foi utilizado para realizar as simulações do sistema, devido à indisponibilidade de um sistema real para obtenção dos dados. O algoritmo proposto foi desenvolvido no MATLAB®.

IV. RESULTADOS

O algoritmo proposto é aplicado a um alimentador primário de 104 barras cujos dados de linha e carga são encontrados em [9]. O desvio utilizado foi de 5%. Foram simulados casos de faltas relacionadas à qualidade de energia (transitórios, elevação e afundamento de tensão, notching e spike) e de curto-circuito monofásico (A-T, B-T, C-T), bifásico (AB, BC, CA), fase-fase-terra (AB-T, BC-T, CA-T) e trifásico. As faltas foram modeladas como resistências de $1\ \Omega$ e foram utilizadas chaves normalmente abertas que fecharam em diferentes tempos e barras. O tempo de simulação foi de 150

ms. Foram geradas várias janelas em cada simulação contendo amostras da corrente com e sem a falta. Utilizou-se o comprimento dos vetores próprios e dos vetores de detectores $l=40$, desvio $\varepsilon=5\%$ e como critério de casamento adotou-se o r-Hamming e foi definido $r=2$ na geração e $r=4$ no monitoramento do erro. Para cada fase foram gerados conjuntos aleatórios de detectores, onde cada conjunto foi composto por 500 elementos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1, que mostra o desempenho do método proposto na detecção de faltas. Para o processo aleatório de geração dos detectores foram realizadas diversas simulações utilizando diferentes sementes. Em todos os casos as faltas foram totalmente detectadas. Os resultados correspondem a uma simulação escolhida aleatoriamente. Tendo em vista que o tempo de processamento de cada janela foi de 9 ms, em média, o algoritmo é próprio para uso em tempo real, pois a janela utilizada foi de um ciclo e esta leva pelo menos 16.7 ms para ser amostrada. O algoritmo proposto é capaz de detectar todas as alterações ocorridas nas fases do sistema elétrico analisado. Para as janelas onde não ocorreram faltas, ou ocorreram faltas relacionadas à qualidade de energia, o número de detectores acionados foi nulo para cada fase, como mostra a Tabela 1. O baixo número de detectores acionados deve-se à ampla faixa de valores que os detectores podem assumir na geração. Esse número não influencia na eficiência do método, pois o acionamento de apenas um detector é suficiente para o algoritmo proposto indicar a ocorrência da falta.

Tabela 1. Algoritmo aplicado a um alimentador de 104 barras.

Tipo de Falta	Detectores acionados nas Fases		
	A	B	C
A-T (Barra 4264)	11	00	00
B-T (Barra 4414)	00	07	00
C-T (Barra 895)	00	00	14
AB-T (Barra 4262)	09	22	00
AC-T (Barra 817)	01	00	13
BC-T (Barra 825)	00	11	17
AB (Barra 4013)	10	07	00
AC (Barra 3995)	07	00	03
BC (Barra 878)	00	14	15
ABC (Barra 2995)	18	10	11
Transitório (Barra 918)	00	00	00
Elevação (Barra 4260)	00	00	00
Afundamento (Barra 4410)	00	00	00
Notching (Barra 823)	00	00	00
Spike (Barra 3015)	00	00	00

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um método de detecção de faltas em redes de distribuição de energia elétrica baseado

em RIA. Foram apresentadas as principais etapas e características da RIA e sua aplicação no problema abordado. Foram realizadas simulações para validação do algoritmo através do software ATP, próprio para simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos. Como dados de entrada do sistema, o algoritmo precisa apenas dos dados oscilográficos das correntes nas fases medidas na subestação. O algoritmo proposto apresentou excelentes resultados, demonstrando eficiência em todas as simulações realizadas. A fase de monitoramento do sistema a partir da coleta dos dados é realizada em milésimos de segundos, o que possibilita que o algoritmo seja utilizado como uma ferramenta empregada em tempo real para auxílio da operação durante uma falta, já que as decisões precisam ser tomadas rapidamente. A fase de geração de detectores é a que demanda maior tempo computacional, no entanto, essa demora não acarreta prejuízo ao algoritmo, pois essa fase é executada de forma off-line. Os resultados obtidos nos remetem à continuação da pesquisa visando inserir módulos de classificação e localização de faltas, bem como aplicar o método em um sistema real. O objetivo final será a construção de um protótipo que possa ser utilizado em campo.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Maranhão (FAPEMA) pelo apoio ao desenvolvimento do projeto.

Referências:

- [1] Hartsteins, R. "Detecção e classificação de faltas monofásicas em sistemas elétricos utilizando a transformada wavelet." 2007.
- [2] Liacco, T. E. and Kraynak, T. J. "Processing by Logic Programming of Circuit Breaker and Protective Relaying Information," 1969.
- [3] Su, H. and Zhao, F. "A novel substation fault diagnosis approach based on RS and ANN and ES", 2006.
- [4] Zamboni, L. "Detecção e Localização de Faltas em Sistemas Elétricos de Distribuição Usando Abordagem Inteligente Baseada em Análise Espectral de Sinais." (2013)..
- [5] Fanucchi, R. Z. "A Detecção e Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição Utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais". 2014.
- [6] Souza, S. C. A.; Braga, A. P.S.; Leão, R. P. S.; Almeida, O. M.; Almeida, A. R and Abreu, F. C. M. "Uso de Redes Neurais Artificiais e Transformada de Stockwell na Localização de Faltas em Linhas de Transmissão," 2015.
- [7] Amaral, J. L. M. "Sistemas Imunológicos Artificiais Aplicados à Detecção de Falhas". Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PUC. Rio de Janeiro, 2006.

- [8] Carvalho, R. Alves, H. N. and Protásio, C. "Algoritmo Baseado em Sistemas Im-unológicos para Detecção de Faltas em Sis-temas de Transmissão". (2009).
- [9] Alves, H. N., Souza, B. A. and Ferreira, H. A. (2005). Banks of Automatic Capacitors in Electrical Distribution Systems: a Hibrid Algorithm of Control. *Revista Controle & Automação*, Vol. 16 No. 1, p. 93-99.
- [10] Martins, J. F., Pires, A. J., Dente, J. A. and P. J. C. Branco, "Fault detection using Immune-Based Systems and Formal Languages Algorithms". *IEEE Conference on decision and control*, p. 2633-2638, 2000.
- [11] Vale, D. T., Coser, J. and Rolim, J. G. "Ferramenta Inteligente para Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia," XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador-Ba. (2006).
- [12] Lo, K. L., Ng, H. S. and Trecat, J. Power system fault diagnosis using Petri nets. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* Vol. 144, No. 3, p. 231-236. (1997).
- [13] Das, R., Sachdev, M. S. and Sidhu, T. S. "A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution Lines." *Power Engineering Society Summer Meeting, Proceedings*, v. 1, p. 443-448. (2000).
- [14] Souza, F. A. "Detecção de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica usando dispositivos programáveis." (2008).