

# ANÁLISE DA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS COM TOPOLOGIAS BASEADAS EM PERCEPTRON MULTICAMADAS E REDES RBF

RODRIGO Z. FANUCCHI<sup>1</sup>, MARIO OLESKOVICZ<sup>1</sup>, DANIEL BARBOSA<sup>2</sup>.

1. *Universidade de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos  
Avenida Trabalhador São-Carlense, 400 CEP:13566-590, SP, São Carlos*  
E-mails: [fanucchi@usp.br](mailto:fanucchi@usp.br), [olesk@sc.usp.br](mailto:olesk@sc.usp.br)

2. *Universidade Salvador  
Rua Ponciano Salvador, 126, 2º andar, 41950-275, BA, Salvador*  
E-mails: [daniel.barbosa@pro.unifacs.br](mailto:daniel.barbosa@pro.unifacs.br)

**Abstract** - This paper presents a methodology for high impedance faults detections in a distribution system operating at 34.5 kV. The presented method uses the harmonic distortion of odd and even components of phases currents. This values are obtained through an FFT algorithm with a sampling rate of 256 samples per cycle, in addition with an artificial neural network (ANN). The propose is to distinguish a high impedance fault from normal occurrences of the system. For this analysis, a distribution system was modeled in ATP / EMTP and events related to high impedance faults, switching capacitor banks and transformers inrush currents were simulated. For detection, two neural network topologies were analysed, the Multilayer Perceptron (PMC) and the network with Radial Basis Function (RBF), both with a number of neurons varying from one to six in the hidden layer, and their results were compared. The results obtained through the analysis of 126 events, shows that the PMC has a better performance than RBF.

**Keywords** - Applications of Intelligent Systems in Power Systems, High impedance fault, Fault-detection, Artificial neural network classifier

**Resumo** - Esse trabalho apresenta uma metodologia para detecção de faltas de alta impedância em um sistema de distribuição operando em 34,5 kV. A metodologia apresentada utiliza-se dos dados de distorção harmônica dos componentes ímpares e pares dos valores de corrente de fase, obtidos através de um algoritmo de FFT utilizando dados amostrados a uma taxa de 256 amostras por ciclo, em conjunto de uma rede neural artificial (RNA) para detectar uma falta de alta impedância, diferenciando-a de ocorrências normais do sistema. Para essa análise, um sistema de distribuição real foi modelado no ATP/EMTP e eventos relacionados a faltas de alta impedância, cujo modelo utilizou-se de dois resistores variáveis e dois diodos de forma a se obter as características da presença do arco elétrico, chaveamento de bancos de capacitores e energização de transformadores foram simulados. Para a detecção foram utilizadas duas topologias de redes neurais, o Perceptron Multicamada (PMC) e a Rede de Função de Base Radial (RBF) com uma camada escondida com a quantidade de neurônios variando de um a seis, e seus resultados foram comparados. Os resultados obtidos, através da análise dos 126 eventos, mostra um ótimo desempenho de um PMC frente a RBF.

**Palavras-chave** - Aplicações de sistemas inteligentes em sistemas de potência, Faltas de alta impedância, Detecção de Faltas, Classificador com redes neurais artificiais

## 1 Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica aéreos estão sujeitos a diversos tipos de faltas, transitórias ou permanentes, ao longo de toda a sua extensão. Destas faltas, as de alta impedância estão entre as que mais preocupam atualmente as concessionárias de energia.

Estas faltas possuem como característica básica valores de corrente de baixa amplitude, até 100 A, que, na maioria dos casos, não é suficiente para sensibilizar os relés de sobrecorrente normalmente utilizados para proteção de sistemas elétricos de

distribuição. Formas clássicas deste tipo de faltas estão relacionadas a galhos de árvores em contato com cabos de média tensão energizados, isoladores com fuga de corrente e cabos caídos ao solo em terrenos de alta impedância. Tendo em vista a segurança das pessoas, este último tipo de falta de alta impedância é o mais crítico. Isso ocorre pois as mesmas podem ser vistas pelo sistema como carga e, desta forma, não há sensibilização das proteções de sobrecorrente. Consequentemente, os condutores permaneceriam energizados no solo por tempo indefinido.

Sendo assim, é necessário que outras características da falta de alta impedância sejam analisadas,

visto que sua amplitude não é suficiente para sua detecção [AUCOIN et al., 1995]. Um desses aspectos que tem sido utilizado refere-se a presença de arco elétrico nessas faltas e, as características da forma de onda de corrente quando de sua presença. Essas características podem ser vistas através de seu conteúdo harmônico e, em diversos trabalhos esse aspecto tem sido levado em consideração [SHARAF et al., 1992; LAZKANO et al., 2000]. Além disso, técnicas inteligentes tem sido utilizadas para a detecção de faltas de alta impedâncias como redes neurais [YANG et al., 2004; BAQUI et al., 2005], sistemas fuzzy [FLAUZINO, 2007], ANFIS [SARLAK & SHAHRTASH, 2011], entre outros.

Sendo assim, no presente trabalho, as características de uma falta de alta impedância, considerando a presença de um arco elétrico, são analisadas e modeladas no Alternative Transient Program (ATP/EMTP). Estas faltas são então simuladas em um sistema de distribuição modelado no ATP/EMTP, bem como outras situações normais do sistema e que inserem distorção na forma de onda de corrente como energização de transformadores e chaveamento de banco de capacitor. Esses dados são então utilizados para treinamento e operação de duas topologias de RNA, PMC e RBF, e seus resultados são então comparados

## 2 Detecção de Faltas de Alta Impedância

As faltas de alta impedância tem como uma de suas características a baixa amplitude da corrente da mesma. Entre suas causas, conforme informado anteriormente, a que mais preocupa as concessionárias de energia está relacionada a queda de condutores ao solo com alta impedância.

A Tabela 1 ilustra alguns casos desse tipo de falta e suas respectivas correntes médias.

Pode-se verificar que com essas amplitudes, em alguns casos, poderá haver omissão do relé de sobre-corrente que não distinguirá a situação de falta de uma operação normal do sistema.

Tabela 1. Valores típicos de correntes de faltas de alta impedância (AUCOIN et al.,1995)

Superfície	Corrente(A)
Asfalto Seco ou Areia	0
Areia Molhada	15
Relva Seca	20
Grama Seca	25
Relva Molhada	40
Grama Molhada	50
Concreto Reforçado	75

Essa situação pode acarretar um risco à segurança dos equipamentos e, principalmente, do transeuntes do local, tendo em vista a existência de um cabo

energizado ao solo cuja falta não foi extinta pelos sistemas convencionais de proteção.

Uma característica normalmente relacionada a condutores caídos é a presença de um arco elétrico. Neste caso, a corrente de falta apresentará as seguintes características [NAKAGOMI, 2006]:

- ▲ Assimetria: haverá diferença de amplitude entre o semiciclo positivo e negativo.
- ▲ Não-Linearidade: a curva característica de tensão por corrente será não linear.
- ▲ *Buildup*: a corrente crescerá gradualmente até seu valor máximo.
- ▲ *Shoulder*: durante o *buildup* haverá alguns patamares de amplitude que permanecerão por alguns ciclos
- ▲ Intermitência: Devido a extinção temporária do arco elétrico, haverá momentos de não condução de corrente. Este tempo dura até a reignição do arco elétrico.

Na Figura 1 é possível verificar essas características descritas. Além disso, é possível visualizar as descontinuidades existentes na corrente de falta nas proximidades da passagem da mesma pelo eixo x (NAKAGOMI, 2006).

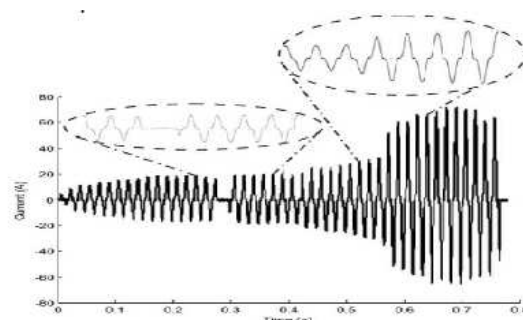


Figura 1. Detalhes das Características de uma Falta de Alta Impedância (NAKAGOMI,2006)

Em função dessas características há uma certa assinatura harmônica de faltas de alta impedância com predominância de ordem ímpar conforme visto na Figura 2.

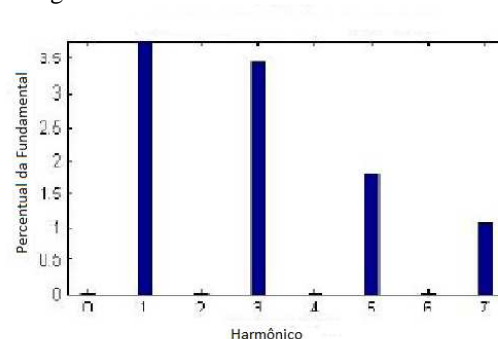


Figura 2. Espectro Harmônico de uma FAI (NAKAGOMI, 2006)

No entanto, para utilização das características de distorção harmônica de uma FAI para sua detecção, deve-se diferenciá-las de outras situações normais do sistema que acarretam esse tipo de alteração.

No chaveamento de bancos de capacitores, tem-se que há o aparecimento de uma banda de frequência relacionada a características RLC do sistema elétrico. Esse aspecto pode ser visto na Figura 3.

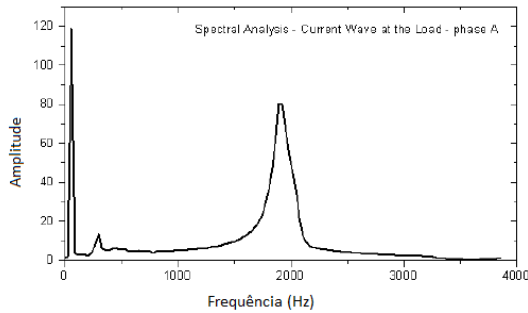


Figura 3. Espectro Harmônico de um Chaveamento de Banco de Capacitor (SANTOS et al., 2005)

Outra situação normal do sistema refere-se à energização de transformadores. Nesse caso há o aparecimento de frequências de segunda e quinta ordem predominantemente, tendo em vista a ocorrência conjunta de uma possível sobre-excitação [COURY et al., 2011].

### 3 Redes Neurais Artificiais

Uma Rede Neural Artificial (RNA) tem como principal inspiração o cérebro humano e sua capacidade de aprendizagem e generalização.

Existem diversas topologias de RNA de forma a possibilitar a resolução de diversos tipos de problemas, tais como: Aproximação de funções, classificação de padrões, controle de processos, entre outros.

No caso da classificação de padrões, duas topologias que serão analisadas no presente trabalho: o PMC e a RBF.

#### 3.1 O Perceptron Multicamadas

As redes do tipo Perceptron Multicamadas caracterizam-se por possuir ao menos uma camada de neurônios escondida. Além disso, possuem uma arquitetura conhecida como *feedforward* de camadas múltiplas e seu treinamento é feito de forma supervisionada.

Esse processo de treinamento baseia-se em um algoritmo conhecido como *backpropagation*. Esse algoritmo constitui-se de duas fases: *forward* e *backward*.

Na primeira etapa, apenas é obtido o resultado da topologia com os pesos sinápticos e limiares de ativação atuais. Já na segunda etapa, tendo como base os valores esperados para a entrada considerada, são obtidos os desvios  $e$ , em conjunto com o gradiente local de cada neurônio, são corrigidos os valores dos pesos sinápticos e limiares de ativação.

Os ajustes das camadas de saída e intermediária são dados pelas equações 1 e 2. Já os gradientes locais de cada camada intermediária e da camada de saída estão relacionados as equações 3 e 4.

$$W_{ji}^{(L)}(t+1) = W_{ji}^{(L)}(t) + \eta \cdot \delta_j^{(L)} \cdot Y_i^{(L-1)} \quad (1)$$

$$W_{ji}^{(1)}(t+1) = W_{ji}^{(1)}(t) + \eta \cdot \delta_j^{(1)} \cdot x_i \quad (2)$$

$$\delta_j^{(L)} = \left( \sum_{k=1}^{n_{L+1}} \delta_k^{(L+1)} \cdot W_{kj}^{(L+1)} \right) \cdot g'(I_j^{(L)}) \quad (3)$$

$$\delta_j^{(L)} = (d_j - Y_j^{(L)}) \cdot g'(I_j^{(L)}) \quad (4)$$

#### 3.2 Redes de Função de Base Radial

As redes do tipo RBF possuem apenas uma camada escondida e uma camada de saída. Possui também uma arquitetura do tipo *forward*, sendo que o sinal é propagado da entrada para a camada intermediária, que possui uma função de ativação do tipo gaussiana, e desta para a camada de saída, com uma função de ativação do tipo linear.

O processo de treinamento de uma rede RBF é composto por dois estágios, sendo o primeiro não-supervisionado e o segundo, supervisionado.

Na primeira etapa a distância euclidiana entre os pesos de cada neurônio e cada valor da amostra é calculada. Com isso, um neurônio é declarado vencedor quando este possui a menor distância em relação a todas as amostras do conjunto de teste. Esta amostra é então vinculada ao conjunto  $\Omega^{(j)}$  onde estão relacionados os neurônios vencedores em cada iteração. Após todas as amostras terem sido verificadas, os pesos sinápticos de cada neurônio são atualizados conforme a equação 5.

$$W_{ji}^{(1)} = \frac{1}{m^{(j)}} \sum_{x^{(k)} \in \Omega^{(j)}} x^{(k)} \quad (5)$$

Após isso, nova iteração é feita até que não haja alterações nos grupos vinculados a cada neurônio da camada intermediária. Com isso, a variância, para utilização na função gaussiana, é obtida conforme equação 6.

$$\sigma^2 = \frac{1}{m^{(j)}} \sum_{x^{(k)} \in \Omega^{(j)}} \sum_{i=1}^n (x_i^{(k)} - W_{ji}^{(1)})^2 \quad (6)$$

Na segunda etapa, os pesos sinápticos da camada de saída são ajustados de forma similar ao processo de ajuste da mesma camada no PMC.

### 4 Metodologia Proposta

A metodologia proposta busca diferenciar uma falta de alta impedância de situações que geram distorções harmônicas mas são inerentes ao sistema elétrico de distribuição. No caso em estudo, serão consideradas as situações de chaveamento de bancos de capacitores e energização de transformadores. Dessa forma, serão utilizadas topologias de redes

neurais artificiais do tipo PMC e RBF de forma a possibilitar a classificação dos eventos entre três classes: Falhas de Alta Impedância, Energização de Transformadores e Chaveamento de Bancos de Capacitores.

Para o pré-processamento, apenas os dados de corrente são necessários e os mesmos são amostrados à uma taxa de 15,36 kHz. Com essas amostras, são calculados, através de um algoritmo de FFT, os componentes harmônicos da frequência fundamental do sistema, 60 Hz, até a quinquagésima ordem.

Com esses dados, obtém-se então a relação da quantidade dos componentes de harmônicos ímpares e pares em relação ao valor da componente fundamental conforme mostrado nas equações 7 e 8.

$$DHT_{par}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{25} (I_{(2n)})^2}{I_1^2}} \quad (7)$$

$$DHT_{impar}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{24} (I_{(2n+1)})^2}{I_1^2}} \quad (8)$$

Esses valores são então inseridos na entrada da rede neural que os classificará entre os tipos de eventos considerados.

## 5 Sistema Elétrico Modelado e Simulações Realizadas

O sistema elétrico de distribuição considerado na análise é mostrado na Figura 4. Ele é composto por um alimentador de distribuição em tensão de 34,5 kV, alimentando uma subestação 34,5/13,8 kV. Inicialmente, tem-se a fonte de geração 138 kV e a impedância equivalente do sistema referido à tensão de 138 kV ( $R_0 = 0,735$ ;  $L_0 = 5,7167$ ;  $R_1 = 1,1205$ ;  $L_1 = 6,4954 \Omega$ ). O transformador T1 possui três enrolamentos com tensões nominais 138/34,5/13,8 kV ligado na configuração estrela-aterrado/estrela-aterrado/delta.

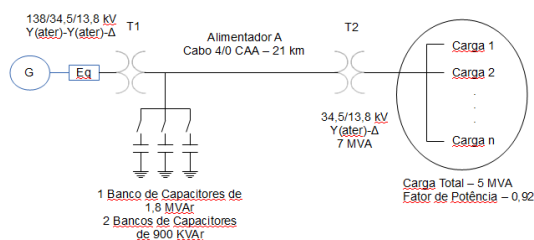


Figura 4. Sistema Elétrico de Distribuição considerado na Análise

Na saída do alimentador em 34,5 kV estão instalados um banco capacitor de 1,8 MVAR e dois bancos de 900 kVAR.

A linha de distribuição de 34,5 kV é formada por 21 quilômetros de cabo de alumínio com alma de

alço com bitola 4/0 sem transposição e sem carga distribuída no trecho. Esta linha alimenta o transformador T2 com tensão nominal 34,5/13,8 kV, potência nominal de 7 MVA e ligação em estrela-aterrado/delta. A carga do sistema em condições normais é de 5 MVA com fator de potência 0,92.

Para a simulação da falta de alta impedância, o modelo considerado é o apresentado por Emanuel et al. (1990). Esse modelo é composto por dois resistores variáveis e dois diodos, de forma a representar as características básicas de uma FAI como a assimetria e as discontinuidades apresentadas em sua forma de onda. As Figuras 5 e 6 mostram respectivamente o modelo e a curva VxI do mesmo.

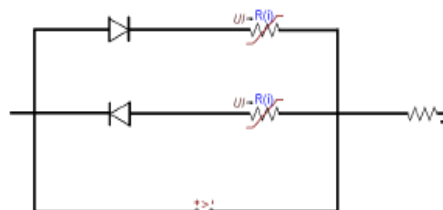


Figura 5. Modelo considerado para as Falhas de Alta Impedância

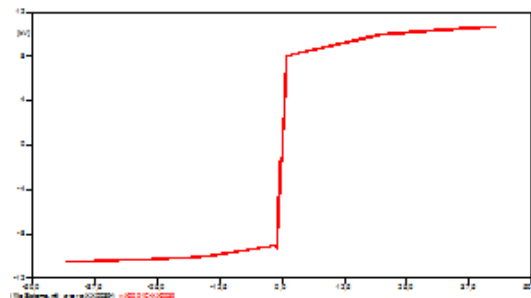


Figura 6. Curva VxI do modelo de Falta de Alta Impedância

### 5.1 Eventos Simulados

Para o sistema de distribuição considerado a seguir foram simulados, no APT/EMTP, 81 eventos referentes a energização de transformadores, com carga variando de 50% e 100% e fator de potência de 0,8 ou 0,92, e chaveamento de bancos de capacitores, variando-se a configuração de bancos ligados e desligados e a corrente de carga de 50% a 100% com fator de potência de 0,8 ou 0,92. Além disso, foram simuladas 45 faltas monofásicas de alta impedância com corrente variando entre 10 e 50 A e distância entre 0% e 100% da linha.

Esses valores são então pré-processados e inseridos na entrada da rede neural que os classificará entre os tipos de eventos considerados.

## 6 Resultados Obtidos e Discussão

Para a avaliação do método, foram divididos os dados obtidos em simulações em um conjunto de

treinamento e um de teste. O primeiro com 70% dos dados e o outro com 30%.

Com isso, foram treinadas, primeiramente, seis configurações de redes PMC com o número de neurônios da camada escondida variando de um a seis. Para esse treinamento, a taxa de aprendizagem considerada foi de 0,1 e a precisão de  $10^{-7}$ .

Na Tabela 2 são mostrados os resultados obtidos para cada uma das configurações consideradas.

Tabela 2. Resultados Obtidos com a Rede PMC

Quantidade de Neurônios	Acerto
1	80,43%
2	100%
3	100%
4	100%
5	100%
6	100%

Foram consideradas ainda seis configurações de redes RBF com a quantidade de neurônios da camada intermediária variando de um a seis. Os resultados obtidos estão relacionados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados Obtidos com a Rede RBF

Quantidade de Neurônios	Acerto
1	30,43%
2	80,37%
3	73,93%
4	91,30%
5	97,83%
6	97,83%

Analisando primeiramente o resultado obtido pelo PMC, pode-se verificar que a partir de dois neurônios, o mesmo já consegue realizar a classificação correta entre as classes existentes. Já para a rede RBF, os resultados se tornaram satisfatórios apenas com quatro ou mais neurônios. Apesar disso, em nenhuma das configurações propostas, o desempenho da rede RBF foi igual ao do PMC.

Outro aspecto importante refere-se a convergência do PMC com dois neurônios. Tendo em vista o fato da classificação ser em três classes (Faltas de Alta Impedância, Chaveamento de Bancos de Capacitores e Energização de Transformador), e partindo do entendimento que as mesmas são linearmente separáveis, torna-se coerente e correto que o PMC com dois neurônios atinja um desempenho de 100%.

## 7 Conclusões

Pelos resultados apresentados, pode-se verificar que a rede PMC com dois neurônios mostrou-se como a melhor opção, tendo em vista a ótima resposta obtida e o menor custo computacional para a mesma.

Importante ressaltar ainda que em todos os casos, as redes PMC tiveram resultados melhores que as RBFs, e, convergiram para a precisão requerida em uma quantidade menor de épocas.

## Referências Bibliográficas

- Sharaf, A.M.; Snider, L.A. and Debnath, K. (1993). A Neural Network Based Back Error Propagation Relay Algorithm for Distribution System High Impedance Fault Detection. *Advances in Power System Control, Operation and Management*, Vol 2, pp. 613-620.
- Lazkano, A.; Ruiz, J.; Leturiondo, L.A. and Aramendi, E. (2000). High Impedance Arcing Fault Detector for three-wire Power Distribution Networks. *10<sup>th</sup> Mediterranean Electrotechnical Conference*, vol 3, pp. 899-902.
- Aucoin, B. M. and Jones, R.H (1995). High Impedance Fault Detection Implementation Issues. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No. 1, pp. 139- 148.
- Yang, M; Gu, J.; Hsu, W. and Chang, Y (2004). A Novel Intelligent Protection Scheme for High Impedance Fault Detection in Distribution Feeder. *TENCON*, Vol 3, pp. 401-404.
- Baqui, I.; Mazon, A.J.; Zamora, I and Vicente, R (2004). High Impedance Fault Detection in Power Distribution System by Combination of Artificial Neural Network and Wavelet Transform. *18<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, pp. 1-4.
- Sarlak, M. and Shahrtash, S.M. (2008). High Impedance Fault Detection in Distribution Networks using Support Vector Machines based on Wavelet Transform. *Electric Power Conference, EPEC 2008*, pp. 1-6.
- Flauzino, R.A. (2007). Identificação e Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição Baseadas em Decomposição por Componentes Ortogonais e Inferência Fuzzy. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.
- Nakagomi, R.M. (2006). Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo.
- Santos, C.J.; Coury, D.V.; Oleskovicz, M. and Tavares, M.C. (2005). Avaliação de Transitórios devido ao Chaveamento de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição da CPFL. *Ciência & Engenharia*, Universidade Federal de Uberlândia, v. 14, n. 1, pp. 37-45.
- Emanuel, A.E.; Cyganski, D.; Orr, J.A. and Shiller, S. (1990). High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15 kV Distribution Feeders: Contributions to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.5, n. 2, pp. 676-686.

Coury, D.V.; Oleskovicz, M. and Giovanini, R.,  
Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potên-

cia: dos relés eletromecânicos aos microproces-  
sados inteligentes, EESC, 2007.