

AValiação de Técnicas Alternativas para Detecção de Falhas de Alta Impedância

REGINALDO B. G. GRIMALDI¹, TARSO V. FERREIRA¹, JUGURTA MONTALVÃO¹, ÉRICA M. LIMA², NÚBIA S. D. BRITO², WELLINSÍLVIO C. DOS SANTOS³, MATHEUS S. MACEDO¹

¹*Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe – DEL/UFSS*
Av. Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, São Cristóvão/SE - Brasil, CEP: 49100-000.
E-mails: reginaldogrimaldi@gmail.com, tarso@ufs.br,
jugurta.montalvao@gmail.com, teusmacedo@gmail.com

²*Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – DEE/UFCG*
Rua Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Campina Grande/PB – Brasil, CEP: 58.429-900.
E-mails: erica.lima@ee.ufcg.edu.br, nubia@dee.ufcg.edu.br

³*Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas Grande – CTEC/UFAL*
Campus A.C. Simões - BR 101 Norte - Km. 14 - Tabuleiro do Martins - Maceió/AL - Brasil CEP: 57.072-970.
E-mails: wellinsilvio.santos@ctec.ufal.br

Abstract— In many situations, the rupturing of conductors in distribution systems, or even their contact with high impedance surfaces, does not sensitize the protection system. This type of occurrence and its variations are typically called high impedance faults. Considering the high severity of the problem by the power companies, the problem of high impedance faults can cause a series of material and immaterial damages, such as fines, administrative penalties, accidents and deaths. The present work has the objective of exposing the preliminary results of the application of three methodologies with little exploration in the literature for the detection of high impedance faults based on: Spectral Subband Centroid Energy Vectors, Teager Energy Operator and Linear Predictor Linear. In order to achieve the desired objectives, a database containing simulated HIF signals was used.

Keywords— high impedance faults, Spectral Subband Centroid Energy Vectors, Teager Energy Operator, Linear Predictor.

Resumo— Em muitas situações, o rompimento de condutores nos sistemas de distribuição, ou mesmo seu contato com superfícies de alta impedância, não sensibiliza o sistema de proteção. Este tipo de ocorrência e suas variações são tipicamente chamados de falhas de alta impedância. Considerando de alta gravidade pelas concessionárias, o problema das falhas de alta impedância pode ocasionar uma série de prejuízos materiais e imateriais, tais como multas, sanções administrativas, acidentes e episódios de eletroplessão. O presente trabalho tem por objetivo expor os resultados preliminares da aplicação de três metodologias pouco exploradas na literatura para detecção de falhas de alta impedância baseadas em: Vetores de Energia dos Centróides das Sub-bandas Espectrais, Operador de Energia Teager e Preditor Linear. A fim de viabilizar os objetivos pretendidos, foi utilizado um banco de dados contendo sinais simulados de FAI.

Palavras-chave— falta de alta impedância, vetores de energia dos centróides das sub-bandas espectrais, operador de energia teager, preditor linear.

1 Introdução

Ao longo da história, a eletricidade tem ocupado um papel de extrema importância no desenvolvimento tecnológico das sociedades. Usada em quase todas as atividades humanas contemporâneas, a energia elétrica é tida como uma das fontes de energia mais versáteis. Contudo, para atender seus consumidores são necessários sistemas elétricos complexos, compostos de quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo.

No âmbito dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), muitos problemas/distúrbios podem surgir como por exemplo, as falhas de alta impedância (FAI), considerada como uma das mais preocupantes, principalmente para as concessionárias de distribuição de energia elétrica (Santos, 2011).

Nos episódios de FAI, além de comprometer a qualidade do serviço, as concessionárias sofrem sanções

estipuladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que avalia e regula, em diversos aspectos, o fornecimento de energia elétrica. Nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) encontram-se definições acerca da qualidade da energia elétrica, destacando os indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica, ora transcritos:

- **DEC**: indica a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora;
- **FEC**: indica a frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora;
- **DIC**: indica a duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão;
- **FIC**: indica a frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão;
- **DMIC**: indica a duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão.

Os indicadores supramencionados dimensionam a frequência e duração das interrupções no fornecimento de energia elétrica, avaliando assim, a continuidade do fornecimento pelas concessionárias. O não atendimento aos limites impostos pela ANEEL, podem acarretar em multas e compensação aos consumidores (Zamboni, 2013). No entanto, as perdas financeiras ou mesmo os danos intangíveis associados às concessionárias não são as consequências mais preocupantes das FAI. Os acidentes, riscos à saúde de animais e pessoas, eventualmente levando à morte, são de fato, os fatores mais preocupantes.

Ante o exposto, o estudo desse fenômeno tem despertado o interesse tanto da academia quanto das empresas, principalmente, no desenvolvimento de métodos de diagnóstico, haja visto as dificuldades de sua identificação por meio dos sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente (Santos, 2011).

Este artigo enquadra-se nesse tema e analisa três métodos de detecção de FAI, a saber: algoritmo dos vetores de energia dos centróides das sub-bandas espectrais (VECSE); operador de energia Teager e preditor linear. Não é foco do trabalho, nesta etapa da pesquisa, o tratamento de ocorrências de falsos positivos de detecção.

2 Embasamento Teórico

2.1 Características de uma FAI

A principal característica de uma FAI é a baixa amplitude das correntes, as quais são resultantes do rompimento de um condutor e do seu contato com uma superfície de alta impedância. Durante o fenômeno, antes do cabo entrar em contato com o solo, pode ocorrer um arco elétrico, pois, quando o cabo energizado se aproxima do solo, a diferença de potencial aumenta e o campo elétrico torna-se mais intenso, diminuindo a resistência do ar, o que facilita o processo de condução do ar (Nakagomi, 2006).

O arco elétrico é um tema largamente estudado na literatura especializada, mas na grande maioria dos trabalhos, o foco tem sido o arco elétrico resultante das altas correntes de impedância indutiva e da operação dos dispositivos de proteção. Contudo, quando se fala em FAI, o enfoque são os arcos elétricos resultantes de curtos-circuitos de alta impedância resistiva e com características não-lineares (Santos, 2011).

A penetração do arco na superfície de alta impedância diminui a umidade da região de contato, forçando a extinção do mesmo. Todavia, a umidade de outra área próxima ao condutor pode difundir-se, reiniciando a formação do arco, processo conhecido como ‘intermitência’ (Nakagomi, 2006).

A presença do arco elétrico provoca ainda, o crescimento da envoltória da corrente de falta, fenômeno conhecido como *buildup*, pois o cabo demora certo tempo para assentar-se completamente no solo. Durante o *buildup*, a amplitude pode permanecer cons-

tante antes de voltar a crescer, dando origem ao fenômeno denominado de *shoulder* (Nakagomi, 2006).

Por fim, as correntes provenientes de uma FAI possuem assimetria, sendo a magnitude do semiciclo positivo maior que a do semiciclo negativo (Emanuel *et al.*, 1990). Essa característica é atribuída a porosidade e umidade da superfície de contato.

Todas essas características são mostradas em detalhes na Figura 1.

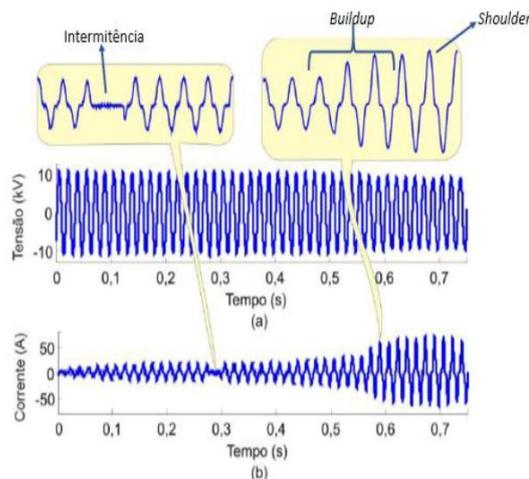


Figura 1. Detalhamento do comportamento da corrente: (a) Tensão; (b) Corrente (Santos, 2011).

Com relação à análise do sinal no domínio da frequência, as características dos sinais de corrente das FAI, produzem um comportamento harmônico, que pode ser usado para detectar a ocorrência desse distúrbio. Segundo Nakagomi (2006), as correntes de FAI produzem os seguintes componentes espectrais:

- A distorção na forma de onda decorrente da não-linearidade da resistência do arco propicia o aparecimento de harmônicas de baixa ordem na corrente (3° ao 10° harmônicos, aproximadamente).
- A assimetria entre os semiciclos é responsável pela presença dos harmônicos de ordem par.
- A intermitência da corrente durante a formação e a extinção do arco leva ao surgimento de um espectro de harmônicos de alta frequência.
- Os fenômenos de *buildup* e *shoulder* provocam variação da amplitude da corrente ao longo do tempo, produzindo inter-harmônicos resultantes do comportamento dinâmico da resistência de contato do defeito.

2.2 Operador de Energia Teager

O operador de energia Teager (OET) ou operador Teager-Kaiser calcula a energia de um sinal baseado não apenas na amplitude, mas na frequência do sinal. Segundo Kaiser, ao ser aplicado a um sinal composto por uma única frequência variante no tempo, o operador é capaz de extrair a medida de energia do processo mecânico que gerou esse sinal (Kaiser, 1990).

A estimativa do OET baseia-se no movimento harmônico simples de um objeto com massa m , suspenso por

uma mola com constante k , onde o modelo matemático do sistema é dado por (Kaiser, 1990):

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{k}{m}x(t) = 0. \quad (1)$$

A solução do movimento harmônico simples (1) é $x(t) = A \cos(\omega t + \phi)$, em que A é a amplitude do sinal, ω é a frequência ($\omega = \sqrt{k/m}$) e ϕ é a fase inicial arbitrária do sinal. A energia total do objeto considerado é a soma algébrica da energia potencial e da energia cinética do objeto.

$$E = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2. \quad (2)$$

Substituindo (1) em (2) e resolvendo, obtém-se:

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2A^2, \quad (3)$$

$$E \propto \omega^2A^2. \quad (4)$$

A partir da equação (4), Kaiser percebeu que a energia para gerar um sinal senoidal é diretamente proporcional ao quadrado da amplitude do sinal e ao quadrado da frequência de oscilação do sinal (Kaiser, 1990).

O operador de energia de Teager é definido no domínio contínuo conforme a seguir (Kaiser, 1993):

$$\Psi[x(t)] = \left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 - x(t)\left(\frac{d^2x(t)}{dt^2}\right), \quad (5)$$

$$\Psi[x(t)] = \dot{x}^2 - x\ddot{x}. \quad (6)$$

No domínio discreto, o operador de energia Teager é definido conforme a seguir (Kaiser, 1993):

$$\Psi[x(n)] = x^2(n) - x(n+1)x(n-1), \quad (7)$$

em que Ψ é o operador de Teager e $x(n)$ é o valor da n ésima amostra do sinal. Assim, o OET precisa de três amostras consecutivas do sinal para calcular sua energia e amplitude. Portanto, essa definição pressupõe um modelo de sinal perfeitamente senoidal, do qual a operação usada na definição é capaz de extrair de forma simples, a energia constante subjacente ao movimento puramente harmônico.

Neste trabalho, essa pressuposição é usada como uma hipótese de normalidade a ser testada ou como um detector de anomalia. Isto é, espera-se que: i) a energia medida seja constante, se o sinal for de fato, senoidal; ii) em caso de anomalias, como uma FAI, esse pressuposto seja violado, e a medida de Teager desvie notadamente de uma constante. Isso de fato acontece, como será mostrado na seção de resultados, mesmo que a deformação do sinal senoidal seja dificilmente perceptível quando o sinal é inspecionado visualmente.

2.3 Preditor Linear

O preditor linear (em inglês *forward linear predictor*, ou FLP) é uma operação matemática em que os valores futuros de um sinal de tempo discreto são estimados como uma função linear de amostras anteriores.

Um preditor linear é um filtro cuja resposta ao impulso apresenta duração finita (em inglês *finite impulse response*, ou FIR) que tem aplicações em *design* de filtros, codificação de fala, análise espectral e identificação de sistemas (Dalzell *et. al.*, 2011).

Em tempo contínuo, o preditor linear é considerado um método poderoso de previsão de séries temporais. Um modelo de predição linear representa recursivamente, séries temporais de amostras de sinal ao longo de um intervalo de tempo (Riahy, 2007), como:

$$y(t+T) = C_1 \cdot y(t) + C_2 \cdot y(t-T) + \dots + C_m \cdot y(t-(m-1) \cdot T), \quad (8)$$

em que C_1, C_2, \dots, C_m são os coeficientes da predição linear, m é o grau do modelo, T o tempo de amostragem, $y(t+T)$ é a observação futura e $y(t), y(t-T), \dots, y(t-(m-1)T)$ são as observações presente e passadas. Na Eq. (8), a saída é a combinação linear das amostras presentes e passadas, denominada de ‘previsão linear’ (Riahy, 2007).

Em tempo discreto, o modelo de predição é apresentado, como:

$$y(n+1) = C_1y(n) + C_2y(n-1) + \dots + C_my(n-(m-1)), \quad (9)$$

em que C_1, C_2, \dots, C_m são os coeficientes da predição linear, m é o grau do modelo, $y(n+1)$ é a observação futura e $y(n), y(n-1), \dots, y(n-(m-1))$ são as observações presente e passadas.

O modelo de predição linear é uma função complexa equivalente à estimativa espectral. A modelagem de todos os polos a partir da predição linear é idêntica ao método de estimativa espectral de entropia máxima (Riahy, 2007).

Para a predição dos sinais de FAI serão necessários definir o grau do modelo, ou seja, m (que deve ser selecionado cuidadosamente) e os coeficientes, C_1, C_2, \dots, C_m , os quais devem ser calculados a partir da janela de modelagem. O objetivo da predição aplicado aos sinais de FAI é usar a modelagem da forma de onda para prever as amostras futuras do sinal. O erro de predição é a diferença entre os valores previstos e reais. Baseado nestes conceitos, considera-se um preditor linear de dois passos, com o grau do modelo igual a 2, ao qual serão aplicadas duas amostras anteriores para prever o valor da próxima amostra. Apresenta-se na Figura 2 o diagrama de bloco do preditor linear utilizado.

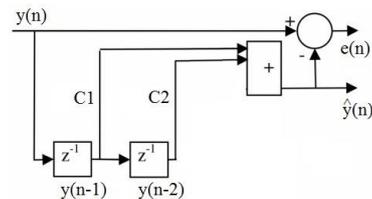


Figura 2. Diagrama de blocos do preditor linear.

Sendo: $y(n)$ o sinal original, $\hat{y}(n)$ o sinal previsto pelo preditor e $e(n)$, o erro de predição. O valor previsto do sinal $y(n)$ é dado por:

$$\hat{y}(n) = C1 \cdot y(n-1) + C2 \cdot y(n-2). \quad (10)$$

O erro gerado entre o valor previsto e o valor real é:

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n). \quad (11)$$

O preditor linear foi aplicado na detecção da FAI na análise do erro quadrático médio. Espera-se que no instante inicial de ocorrência da FAI, uma variação considerável do erro ocorra, o que pode vir a constituir um parâmetro de detecção da falta.

2.4 Vetores de Energia dos Centróides das Sub-bandas Espectrais

Dado que as FAI têm comportamentos característicos explícitos no domínio da frequência, observou-se a necessidade de um método que permitisse agrupar estas características e compactasse a informação relevante. Desta forma, resolveu-se analisar a influência da FAI nos centróides de sub-bandas espectrais, utilizando o método dos Vetores de Energia dos Centróides de Sub-bandas Espectrais (VECSE).

O comportamento dos centróides espectrais de um sinal no domínio da frequência pode ser utilizado como um dos parâmetros para detecção da FAI. O centróide espectral indica o ‘centro de massa’ (baricentro) de um espectro de frequências ou sub-bandas espectrais. Ele é calculado como uma média ponderada das frequências presentes no sinal, sendo os pesos, as amplitudes das frequências. Outro parâmetro que pode ser utilizado é a energia espectral, que é a energia contida no espectro de frequência.

Segundo Ferreira (2011), os passos para obtenção do VECSE, encontram-se descritos abaixo:

- i. Aplicação da transformada rápida de Fourier (TRF) do sinal para estimar o espectro de potência;
- ii. Divisão do espectro em um número de sub-bandas de frequências sobrepostas, através da aplicação de superposição dos filtros.
- iii. Localização dos centróides espectrais de cada sub-banda no espectro aplicando (10):

$$C_H = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} H_m(k) \cdot P(k)}{\sum_{k=0}^{N-1} P(k)}, \quad (10)$$

em que: $P(k)$ é a fatia do espectro de potência estimado, o qual foi limitado pelo filtro (sub-banda); $H_m(k)$ é o vetor de frequências; N é o número de amostras disponíveis na sub-banda.

- iv. Cálculo da energia associada a cada centroide aplicando (11):

$$E_c = \sum_{k=C_H-\delta \cdot N}^{C_H+\delta \cdot N} P(k), \quad (11)$$

em que: C_H é a localização do centroide da sub-banda em questão; δ é o parâmetro que definirá a largura da faixa em torno do centroide que será utilizada para o cálculo da energia média.

O número de filtros, suas larguras e o percentual de sobreposição definirão a taxa de compressão do método. Um número reduzido de filtros, com larga faixa passante e percentual de sobreposição baixo, proporcionará alta compressão, mas permitirá que detalhes

do espectro passem ‘despercebidos’. Um percentual de sobreposição baixo resultará numa correlação baixa entre as sub-bandas adjacentes, gerando assim, poucas sub-bandas e consequentemente, menor esforço computacional e resolução baixa.

Por outro lado, muitos filtros estreitos com percentual de sobreposição alto resultarão em uma compressão menor, proporcionando resolução espectral alta. O percentual de sobreposição alto resultará em correlação alta entre as sub-bandas adjacentes. Além disso, a influência das regiões espectrais próximas à sub-banda na qual um determinado centróide é calculado, será computada. Ao final, muitas sub-bandas serão utilizadas, o que resultará em maior esforço computacional e resolução alta.

3 Metodologia

Para realizar o estudo, inicialmente, utilizou-se uma base de dados de sinais de FAI simulados, que foi concebida por Santos (2011) e gentilmente cedida pelo Grupo de Sistemas Elétricos da Universidade Federal de Campina Grande. A base de dados foi construída conforme apresentada na Tabela 1. Em todos os sinais constituintes da base de dados o instante de ocorrência da FAI é 33 ms.

Tabela 1. Base de Dados.

Base de Dados	Superfície de Contato	Nº. de Registros
01	Areia	36
02	Asfalto	36
03	Brita	36
04	Calçamento	36
05	Gramma	36
06	Terra Local	36
Total		216

O próximo passo da metodologia adotada consistiu em estudar detalhadamente os sinais da base de dados. Em seguida, desenvolveu-se um algoritmo para janelar o sinal de corrente e/ou tensão obtidos no instante de ocorrência da FAI e em suas circunvizinhanças. Cada ciclo (1/60 Hz = 16,67 ms) do sinal elétrico (tensão ou corrente associados à FAI) possui 256 amostras. Adotou-se uma janela de 5 ciclos e um deslocamento de uma amostra por janela, conforme adotado por (Lima, 2018).

O próximo passo consistiu na programação dos algoritmos da energia Teager, do preditor linear e do VECSE. Neste último, utilizaram-se 20 filtros sobrepostos a 90%, com δ igual a 0,1. Em seguida, aplicaram-se todos os métodos a cada parcela janelada do sinal.

Foram definidas quantas amostras do sinal devem ter características de FAI a ponto de sensibilizar os algoritmos. Esta informação é muito importante, pois tem influência decisiva na aplicabilidade dos métodos em sistemas detectores de FAI em tempo real.

Por fim, desenvolveu-se uma interface gráfica, visando melhor visualização dos resultados. Nela, o usuário pode observar as parcelas janeladas do sinal sendo sobrepostas amostra por amostra, provendo a

sensação de evolução no tempo. Também são apresentados os resultados para cada um dos métodos estudados.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 3 sumaria a metodologia empregada.



Figura 3. Metodologia empregada.

4 Resultados

Para avaliar o desempenho dos métodos estudados, realizou-se uma análise de cada método individualmente. Dada a natureza inicial da pesquisa, os resultados apresentados avaliam os métodos no que se refere apenas à etapa de detecção da FAI, não entrando no mérito de detecções de falsos positivos.

4.1 Energia Teager

Quando aplicado aos sinais de tensão e corrente, este método mostrou-se eficaz e apresentou um aumento na energia na parcela janelada do sinal que continha apenas uma amostra da ocorrência da FAI. Conforme mostrado na Figura 4, o sinal gerado pelo cálculo da energia Teager aplicado à tensão apresentou, antes da falta, um valor de energia na ordem de 10^4 , sendo que na ocorrência da falta chegou a um valor de energia na ordem de 10^7 , permanecendo com valor alto, quando comparado ao período sem FAI. Em relação ao sinal de corrente, antes da falta, o valor máximo de energia foi de 250 e quando ocorreu a falta a energia atingiu o valor de 4185, permanecendo com amplitudes altas quando comparado ao período sem FAI.

Em alguns casos, a energia Teager apresentou oscilações persistentes e da mesma ordem de grandeza dos picos que permitem a detecção da FAI, durante todo o sinal, ocorrendo aumentos da energia no regime pré-falta. Quando aplicada aos sinais de corrente, o método apresentou resultados melhores em alguns casos, do que quando aplicado aos sinais de tensão (Figura 5).

Todos os sinais da base de dados foram avaliados e resultaram em resultados similares. Ao final, constatou-se que o método se mostrou mais promissor quando aplicado ao sinal de tensão. Em todos os casos,

logo que a parcela janelada do sinal que contém a primeira amostra com FAI foi analisada, o valor da energia teve um aumento de no mínimo, 10 vezes do valor encontrado sem a FAI.

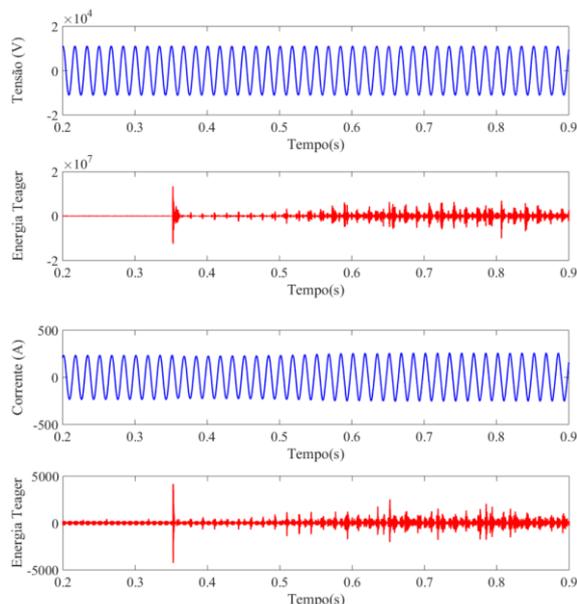


Figura 4. Resultado do processamento pelo algoritmo de cálculo da energia Teager para sinais de tensão e corrente de uma FAI na superfície terra local.

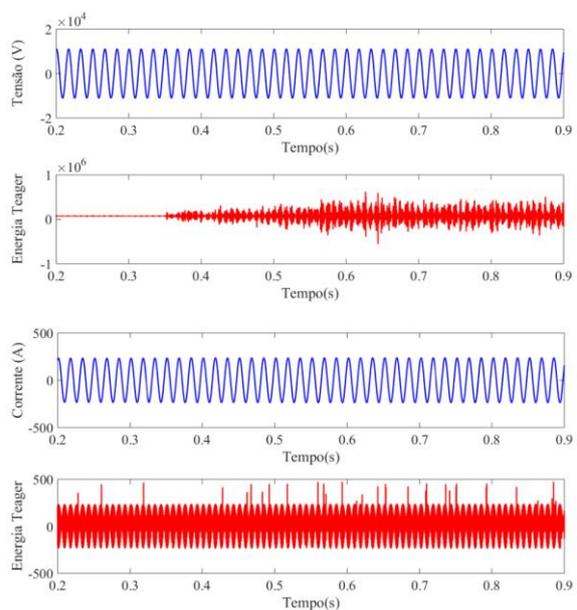


Figura 5. Resultado do processamento pelo algoritmo de cálculo da energia Teager para sinais de tensão e corrente de uma FAI na superfície asfalto.

4.2 Preditor linear

Também neste caso, o método mostrou-se eficaz, ou seja, conseguir detectar uma FAI. Conforme mostrado na Figura 6, o sinal gerado pelo cálculo do método FLP aplicado à tensão apresentou, antes da falta, um erro com valor máximo de 100. No instante de ocorrência da FAI, o erro chegou a um valor na ordem de 10^5 e permaneceu alto, quando comparado ao período sem FAI. Em relação ao sinal de corrente, antes da falta, o valor máximo atingido pelo erro foi de 4 e no

instante de ocorrência da FAI, o erro atingiu o valor de 35 e permaneceu alto, quando comparado ao período sem FAI. Quando aplicada aos sinais de tensão, o método apresentou resultados melhores em alguns casos, do que quando aplicado aos sinais de corrente (Figura 7).

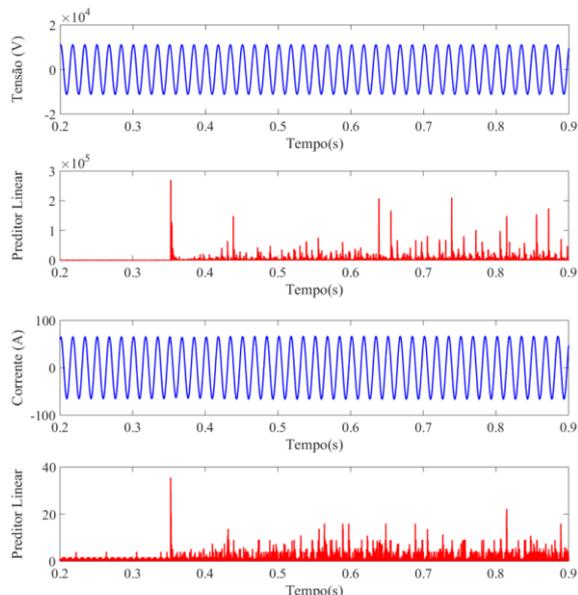


Figura 6. Resultado do processamento pelo algoritmo do preditor linear para sinais de tensão e corrente de uma FAI na superfície areia.

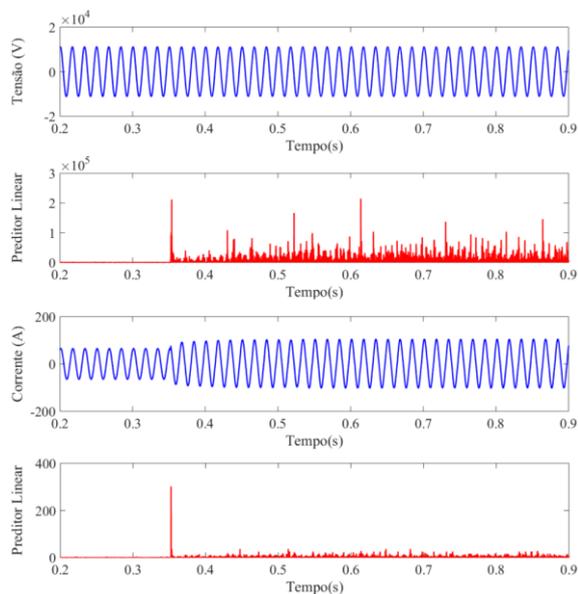


Figura 7. Resultado do processamento pelo algoritmo do preditor linear para sinais de tensão e corrente de uma FAI na superfície grafita.

Todos os sinais da base de dados foram avaliados e resultaram em resultados similares. Em todos os casos o valor do erro quadrático médio teve um aumento de no mínimo 5 vezes, quando comparado ao erro antes da ocorrência da FAI, tendo este aumento ocorrido logo na presença da primeira amostra da falta.

4.3 VECSE

Esse método permite realizar a análise com base no comportamento de banda larga do espectro estimado dos sinais elétricos. Diferentemente dos outros métodos abordados neste trabalho, em que a análise foi feita observando apenas uma variável por grandeza elétrica, neste caso a FAI deve ser detectada observando o comportamento conjunto dos elementos do vetor.

Observou-se que à medida que as parcelas janeladas do sinal continuam mais amostras relativas à FAI, tanto a energia associada à cada centroide, quanto a localização dos centróides espectrais de cada sub-banda no espectro mudava. O comportamento dos vetores à medida que aumenta o número de amostras relativas à FAI é mostrado na Figura 8.

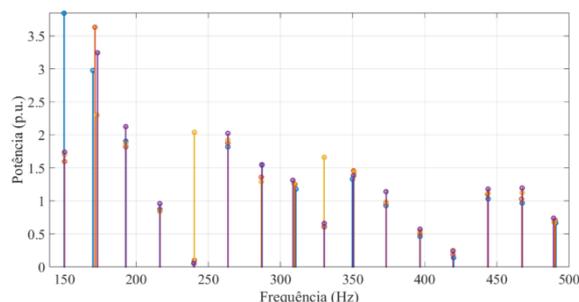


Figura 8. Resultado do processamento pelo algoritmo do VECSE para o sinal de corrente de uma FAI na superfície sobre brita.

Observam-se mudanças da amplitude e da frequência dominante em cada elemento do vetor. Na figura, cada vetor de cor diferente indica uma quantidade de amostras características da FAI na parcela janelada do sinal: azul, situação sem a falta; laranja, um ciclo (256 amostras) com características de FAI; amarelo, três ciclos (768 amostras) com características de FAI; roxo, cinco ciclos (1280 amostras) com características de FAI. Notadamente, os deslocamentos são mais acentuados em determinadas sub-bandas, especialmente em torno dos harmônicos de 3^a e 9^a ordem. Após o período de *buildup* e *shoulder*, o comportamento do método difere quando comparado ao regime permanente. Apresenta-se na Figura 9, a mesma análise para o sinal da Figura 8, considerando agora, apenas a condição de normalidade (azul) e após cinco ciclos com características de FAI (após o período de *buildup* e *shoulder*). Pode-se observar a variação de todos os elementos dos vetores após o período de *buildup* e *shoulder*, tanto na energia, quanto na localização associada à cada centróide. As variações mais notáveis aconteceram nos harmônicos de ordem 3, 9 e 19.

Se comparado com os outros métodos, o método VECSE demonstrou ser menos sensível às variações instantâneas, o que pode ser vantajoso no sentido de minimizar a ocorrência de falsos positivos. Outrossim, a análise conjunta dos diversos elementos do vetor tende a aumentar a complexidade na tomada de decisão, mas é provável que eleve a seletividade na detecção. No entanto, o método é aplicado somente nos sinais de corrente, não tendo sido possível detectar a

FAI nos sinais de tensão.

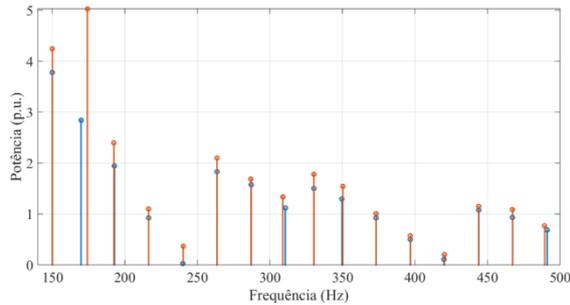


Figura 9. Resultado do processamento pelo algoritmo do VECSE para o sinal de corrente de uma FAI na superfície brita.

4.3 Avaliação Conjunta dos Métodos

Para finalizar, avaliaram-se os métodos conjuntamente, onde se constatou que todos eles podem ser utilizados para indicar a ocorrência de FAI. Além disso, todos os métodos conseguiram detectar a FAI em até cinco ciclos (83,35 ms), o que está de acordo com as normas brasileiras para redes de transmissão e distribuição com tensão nominal até 345 kV, onde os dispositivos de proteção devem ser devidamente coordenados para detectar e eliminar perturbações em até 150 ms (ANEEL, 2011; ONS, 2009). Para ilustrar, apresentam-se na Figura 10, imagens da interface gráfica.

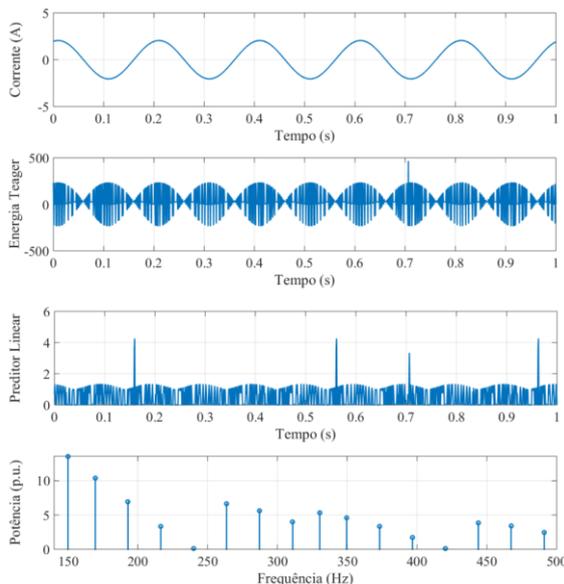


Figura 10. Interface gráfica dos métodos de detecção da FAI.

À medida que cada amostra janelada dos sinais é aplicada ao algoritmo (o que corresponde ao deslizamento da janela amostral), a *interface* mostra o comportamento dos métodos VECSE, energia Teager e do erro quadrático médio gerado pelo preditor linear. Com isso, é possível, avaliar a aplicabilidade dos métodos em uma simulação da aplicação em tempo real, considerando que os cálculos pós-amostragem são de possível realização entre os intervalos de amostragem, e que as características do sistema não mudam após a falta (além, naturalmente, da mudança provocada pela

própria falta). Algumas características dos três métodos no processo de detecção de FAI são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos métodos.

Método	Sinal melhor utilizável	Aplicável em tempo real	Detecta a falta?
VECSE	Corrente	Sim	Sim
Energia Teager	Corrente e/ou Tensão	Sim	Sim
Preditor linear	Corrente e/ou Tensão	Sim	Sim

Para finalizar, constatou-se que: (i) o método VECSE exige maior esforço computacional maior, quando comparado com os outros métodos estudados neste trabalho; (ii) os métodos energia Teager e preditor linear podem indicar a ocorrência da FAI através da observação de uma única variável (ultrapassagem de limiar), enquanto que o método VECSE requer uma interpretação multivariável.

5 Conclusão

Neste artigo foram avaliados o desempenho de três métodos quando aplicados para detectar faltas de alta impedância: energia Teager, preditor linear e vetores de energia dos centróides de sub-bandas espectrais (VECSE). Para o estudo, utilizou-se uma base de dados composta de 216 sinais simulados de FAI em diferentes superfícies. Constatou-se que:

- A energia Teager mostrou ser capaz de detectar FAI, apresentando um comportamento melhor quando aplicado no sinal de tensão.
- O preditor linear também mostrou ser capaz de detectar FAI.
- Ambos (energia Teager e preditor linear) foram capazes de detectar a FAI logo na primeira amostra do sinal.
- O método VECSE foi o menos sensível, mas com variações em todos os vetores associados. Sugere-se para melhorar o seu desempenho, uma análise de sensibilidade dos seus parâmetros, no sentido de otimizar o ajuste do método ao fenômeno.
- A seletividade e robustez dos métodos avaliados ainda precisa ser comprovada com validação em sinais que possuem características similares às FAI, como por exemplo, o chaveamento de banco de capacitores e energização de cargas não-lineares.
- É necessário que se garanta uma ocorrência mínima de falsos positivos na detecção de FAI, o que poderá ser atingido com variações dos métodos ou associações entre os mesmos e outros métodos existentes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES, entidade do Governo Brasileiro voltada para a formação de recursos humanos.

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo CNPq, através de bolsa para J.M. (grant 304853/2015--1). Também se agradece ao CNPq o provimento de bolsas de pós-graduação.

Referências Bibliográficas

- ANEEL. (2011). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*. Brasil: Módulos 1 ao 8.
- Aucoin, B. M., & Russel, B. D. (1982). *Distribution high impedance fault detection utilizing high frequency current components*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 6, pp. 1596-1606.
- Barros, A. C. (2009). *Detecção e Classificação de Falhas de Alta Impedância em Sistemas Elétricos de Potência Usando Lógica Fuzzy*. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica, São Paulo.
- Caminha, A. C. (1977). *Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos*. São Paulo: Edgard Blucher.
- Dalzell, W. G., & Cowan, C. N. (2011). *Blind channel shortening of ADSL channels with a single-channel linear predictor*. 19th European Signal Processing Conference, 2195-2199.
- Eletróbrás. (1982). *Proteção de sistemas aéreos de distribuição* (Vol. 2). Rio de Janeiro: Campus.
- Emanuel, A. E., Cyganski, D., Orr, J. A., Shiller, S., & Gulachenski, E. M. (1990). *High impedance fault arcing on sandy soil in 15kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum*. IEEE Transactions on Power Delivery, 5, 676-686.
- Ferreira, T. V. (2011). *Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos Vecse do Ruído Ultrassônico*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande.
- Kaiser, J. F. (1990). *On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal*. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1, 381-384.
- Kaiser, J. F. (1993). *Some useful properties of Teager's energy operators*. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 3, 149-152.
- Lima, E. M., Junqueira, C. S., Brito, N., Souza, B., Coelho, R. A., Medeiros, H. G. M. S. (2018). *A New High Impedance Fault Detection Method Based on the Short-Time Fourier Transform*. IET Generation, Transmission & Distribution, 8 pp.
- Nakagomi, R. M. (2006). *Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta impedância em Redes de Distribuição*. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo.
- ONS. (2009). *Operador Nacional do Sistema*. Brasil: Submódulo 2.6.
- Riahy, G. H., Abedi, M. (2007). *Short term wind speed forecasting for wind turbine applications using linear prediction method*. Science Direct, 35-41.
- Santos, W. C. (2011). *Uma Revisão de Modelos Clássicos de Falhas de Alta Impedância para Efeito de Melhoramento*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande.
- Zamboni, L. (2013). *Detecção e Localização de Falhas em Sistemas Elétricos de Distribuição Usando Abordagem Inteligente Baseada em Análise Espectral de Sinais*. Tese (Doutorado), São Carlos.