

Detecção de Falhas de Alta Impedância no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet Concatenado ao Preditor Linear

Ariel L. Damião*, Reginaldo B. G. Grimaldi*, Márcio da S. P. Bove*, Flávio C. T. Maia*, Tarso V. Ferreira**, Wellinsilvio C. dos Santos ***

* Departamento de Engenharia Elétrica, Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana. Av. Luís, Av. Eduardo Magalhães Subaé - Aviário, Feira de Santana - BA, 44079-002. E-mails: ariel.ld.eng@gmail.com, reginaldogrimaldi@gmail.com, marcioengeduca@gmail.com, flaviocouvo.engele@gmail.com

** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe – PROEE/UFS Av. Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, São Cristóvão/SE - Brasil, CEP: 49100-000. E-mails: tarso@ufs.br

*** 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: Against with several disturbances that affect the distribution system, High Impedance Faults (HIF) are considered one of the biggest problems faced by electricity supply concessionaires. This phenomenon occurs when the primary conductor comes into contact with a high impedance surface, generating fault currents with low amplitudes. In this way, the currents coming from a HIF, cannot sensitize conventional protection devices that are driven by overcurrent's. However, this type of fault evidences peculiar characteristics in the current signals and, therefore, through the characteristics, this present work has as main objective to develop an algorithm capable of detecting as HIF, through the junction of the Wavelet Transform (TW) with the Linear Predictor (PL) defaults on typical fault currents signals, using a test system model of um Brazilian electric power utility, varying the contact surfaces, buses and their respective loads, showing promising results in the detection of HIF.

Resumo: Diante de vários distúrbios que acometem o sistema de distribuição, as Falhas de Alta Impedância (FAI) são tidas como um dos maiores problemas enfrentados pelas concessionárias fornecedoras de energia elétrica. Este fenômeno ocorre quando o condutor primário entra em contato com uma superfície de elevada impedância, gerando correntes de falta com baixas amplitudes. Dessa forma, as correntes provenientes de uma FAI, não conseguem sensibilizar os dispositivos de proteção convencional que são orientados por sobrecorrentes. Contudo, este tipo de falta evidência características peculiares nos sinais de corrente e, portanto, através dessas características, este trabalho tem como objetivo precípua desenvolver um algoritmo capaz de detectar as FAI, através da junção da Transformada Wavelet (TW) com o Preditor Linear (PL) baseadas nos sinais de corrente típicos da falta, utilizando uma modelagem de um sistema teste de uma concessionária de energia elétrica brasileira, variando as superfícies de contato, os barramentos e seus respectivos carregamentos, apresentando resultados promissores na detecção da FAI.

Keywords: High Impedance Faults, Wavelet Transform, Linear Predictor.

Palavras-chaves: Falhas de Alta Impedância, Transformada Wavelet, Preditor Linear.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) no Brasil, predomina-se a utilização das redes aéreas convencionais com condutores nus (sem isolamento) (SILVA, 2020). Esta topologia, torna-se mais atrativa pelo baixo investimento em sua implementação, perante a grande ramificação e extensão dos alimentadores. Entretanto, esse tipo de rede evidência maiores taxas de falhas, expondo o SDEE a várias perturbações e distúrbios (Kotlinski, 2013).

Dentre inúmeros distúrbios que ocorrem no SDEE, as falhas de alta impedância (FAI) são consideradas como um dos maiores problemas e ocorrem quando o condutor energizado entra em contato com superfícies de alto valor resistivo, como por exemplo: asfalto, areia, pedras ou até mesmo

galhos de árvores (Farias, 2013). Portanto, devido à baixa condutividade elétrica, as correntes de falta possuem amplitudes atenuadas, correspondendo a mesma ordem de grandeza que outros fenômenos comuns do sistema, como a Energização de Carga (EC) ou comutação de Banco de Capacitores (BC) (Grimaldi, 2020; Lima, 2016). Como consequência, esse tipo de falta dificilmente é detectado pelo sistema de proteção convencional que são baseados por sobrecorrentes (Santos, 2016).

Mediante a ineficiência do sistema de proteção na detecção da FAI, o condutor pode permanecer caído e energizado por um longo período, proporcionando riscos de choques elétricos em animais e nas pessoas que se aproximarem. Segundo a Associação Brasileira para a Conscientização dos Perigos da Eletricidade (Abracopel), no 1º semestre de 2021,

os cabos partidos da rede área de distribuição foram a quinta causa que mais matou no país em casos envolvendo a eletricidade. Além dos acidentes e fatalidades, esse fenômeno tem o potencial de gerar incêndios em propriedades públicas, privadas ou no meio ambiente, devido a formação dos arcos elétricos (Farias, 2013).

Ao longo do tempo, vários métodos foram desenvolvidos com o propósito de detectar as FAI, porém até hoje, nenhum foi aplicado de forma efetiva, haja vista os dados de acidentes e fatalidades mencionados no parágrafo anterior. (Silva, 2020). Portanto, torna-se relevante para as concessionárias de energia elétrica resolver este problema, tendo em vista que, as consequências relacionadas a FAI englobam os aspectos da segurança pública, sociais e econômicas (Souza, 2017).

Mediante ao exposto, é indispensável a necessidade de se desenvolver métodos capazes de detectar a FAI o mais rápido possível e de forma confiável para o sistema, não só para assegurar bons indicadores de qualidade, mas sobretudo, para preservar vidas. Portanto, a contribuição deste trabalho foi desenvolver um método capaz de detectar a FAI, baseado em dados computacionais e dados reais, sendo analisados as condições de: 1º) a detecção precisa dos transientes induzidos pela FAI; 2º) rápida detecção da FAI; 3º) análise de várias superfícies e diferentes condições físicas; 4º) análise do comportamento dos sinais da FAI aplicando filtros de decomposição. O objetivo precípuo foi desenvolver um algoritmo capaz de detectar as FAI, através da junção da Transformada Wavelet (TW) com o Preditor Linear (PL) apresentando uma forma alternativa de detectar a FAI.

2. FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

As FAI são curtos-circuitos mais recorrentes nas redes de média tensão, ocasionados pela interação do condutor energizado com uma superfície de elevada resistividade elétrica (Farias, 2013). Portanto, a FAI é caracterizada por apresentar correntes com baixas amplitudes, incapazes de sensibilizar o sistema de proteção convencional que são orientados por sobrecorrentes (Santos et al., 2016).

Estudos apontam que a corrente resultante de uma FAI pode variar de acordo com a resistividade de cada superfície e da humidade relativa, no entanto, em todas as situações a corrente não ultrapassou os 100 Amperes (A) (Santos et al., 2016), o que corresponde a grandeza de outros fenômenos típicos da rede, como a energização/desenergização de cargas e a comutação de bancos de capacitores (Lima, 2016). Na Fig. 1, são representados os valores referentes as correntes de falta provenientes de ensaios em campo, variando a superfície de contato e a sua humidade (Santos et al., 2016).

Mediante a variedade das FAI que podem ocorrer no SDEE, esse trabalho aborda apenas os casos relacionados ao rompimento e, conseqüentemente, a queda do condutor primário ao solo. Durante o fenômeno da FAI, antes do cabo entrar em contato com o solo, pode ocorrer um arco elétrico que são formados de acordo com aumento da Diferença de Potencial (DDP) e do campo elétrico tornar-se mais intenso devido a aproximação do condutor com o solo. Dessa forma, os elétrons livres são acelerados até atingirem um certo limiar de

energia cinética, capazes de ionizar os nêutrons do ar, liberando novos elétrons livres. Esse processo dinâmico, gera colisões entre as moléculas dos elétrons com as dos neutros, conhecido como avalanche. Com isso, torna-se possível a quebrar da resistência dielétrica do ar, tornando-o apto a conduzir eletricidade (Nakagomi, 2006).

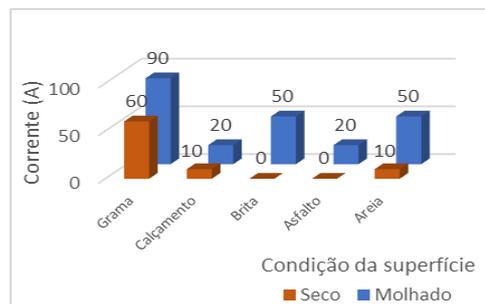


Fig. 1 Corrente de FAI gerada em ambientes diversificados. Adaptado de (Santos, 2016)

O arco elétrico é um fenômeno bastante estudado, entretanto, a maioria desses estudos são direcionados aos arcos de elevadas correntes indutivas ou para mecanismos de extinção de arco presentes em dispositivos de proteção. Contudo, quando se trata dos arcos elétricos provenientes de uma FAI, deve-se mudar o conceito tradicional de análise dos arcos, tendo em vista que, a natureza de uma FAI é predominantemente resistiva (Santos, 2016).

Analisando o comportamento da presença do arco elétrico na FAI, além das componentes harmônicas no espectro da frequência, percebeu-se algumas características peculiares na forma de onda da corrente, conforme ilustrado no modelo exemplar (ideal), na Fig. 2. (Nakagomi, 2006; Costa et al., 2015 Santos et al., 2016; Silva, 2020).

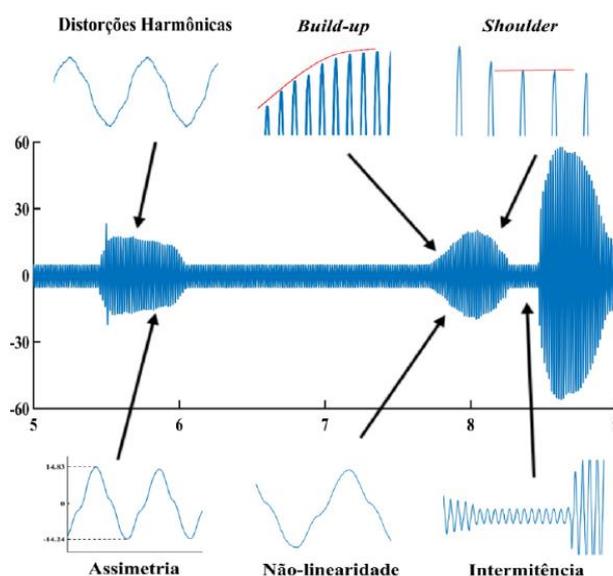


Fig. 2 Características do sinal da corrente proveniente de uma FAI real. (Lima, 2016).

• Assimetria: A Corrente de falta tem diferentes valores de pico para o semiciclo positivo e negativo. Essas características são influenciadas mediante ao nível de

porosidade e da umidade do solo. Responsável pela presença dos harmônicos de ordem par;

- *Build-up*: A corrente de falta amplifica gradualmente até seu valor máximo. Surgimento de inter-harmônicos;
- *Shoulder*: Intervalos no *Build-up* durante alguns ciclos. Surgimento de inter-harmônicos;
- Não-linearidade: Não se admite homogeneidade nas superfícies de contato, devido a variedade de camadas com diferentes resistências. A distorção na forma de onda, decorrente da não linearidade da resistência do arco, promove a aparição de harmônicas de baixa ordem na corrente (3° ao 10° harmônicos, aproximadamente);
- Intermitência: O processo aleatório da extinção e reigignição do arco elétrico geram descontinuidade na corrente de falta em um determinado período. Induz o surgimento de um espectro de harmônicos de alta frequência.

Portanto, através dessas características embutidas no sinal da corrente, torna-se possível realizar a sua detecção utilizando técnicas modernas e apropriadas para tal diagnóstico, como por exemplo: a Transformada Wavelet (TW) e o Preditor Linear (PL) (Costa et al., 2015; Grimaldi, 2020).

3. PREDITOR LINEAR

O PL é uma ferramenta capaz de determinar valores futuros de uma amostra de uma sequência de tempo discreto, baseados em combinações de amostrar anteriores. Os coeficientes de ponderação são obtidos pela comparação entre os valores previstos com os valores futuros (Dalzell & Cowan, 2011).

No tempo contínuo, o PL torna-se uma ferramenta poderosa quando aplicada em séries temporais com ambiente variável no tempo, representada como (Riahy & Abedi, 2007):

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

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 $y(t), y(t - T), \dots, y(t - (m - 1) \cdot T)$ são as observações presente e passadas. Na Eq. (1), a saída é a combinação linear das amostras presentes e passadas, portanto, é chamada de previsão linear (Riahy & Abedi, 2007).

Já no tempo discreto, o modelo da PL é representado por:

$$y(n + 1) = C_1 \cdot y(n) + C_2 \cdot y(n - 1) + \dots + C_m \cdot y(n - (m - 1)), \quad (2)$$

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 (Riahy & Abedi, 2007).

O objetivo do PL é obter o erro de predição, ao qual a diferença entre os valores previstos e reais, podem desempenhar o papel de indicador de transientes, sendo um

parâmetro que possibilita a detecção de um possível distúrbio no SDEE (Grimaldi, 2020)

Com isso posto, determinou-se a ordem do PL que conseguisse detectar transitórios eletromagnéticos nas simulações envolvendo os sinais característicos da FAI. Abaixo, segue o modelo utilizado neste artigo, um preditor linear de dois passos, $m = 2$ (de 2ª ordem), em tempo discreto, representado pela Fig. 3 (Grimaldi, 2020). Vale destacar que a escolha do preditor foi determinada a partir de teste realizados e que para a configuração proposta o preditor de ordem 2 apresentou resultados satisfatórios.

No PL temos: o $y(n)$ que é o sinal original, $\hat{y}(n)$ é o sinal previsto pelo PL e $e(n)$ é o erro de predição. O valor previsto do sinal $y(n)$ é dado por:

$$\hat{y}(n) = C_1 \cdot y(n - 1) + C_2 \cdot y(n - 2) + \dots + C_m \cdot y(n - m). \quad (3)$$

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

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n). \quad (4)$$

Então, o PL torna-se aplicável na detecção da FAI, tendo como método a utilização dos mínimos quadrados e a variação considerável no erro obtido entre a diferença das amostras de sinais anteriores com os sinais futuros serão utilizados como parâmetro para detecção da FAI (Grimaldi, 2020).

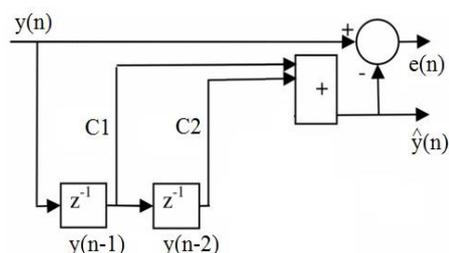


Fig. 3 Diagrama de Blocos do PL. (Grimaldi, 2018).

4. TRANSFORMADA WAVELET

A Transformada Wavelet (TW), tornou-se nas últimas décadas, uma ferramenta matemática largamente utilizada em diagnósticos de distúrbios nos sistemas de potência, devido a sua capacidade poderosa de processamento dos sinais não estacionários, com variação espectral ao longo do tempo, assim como os sinais observados da FAI (Santos, 2016).

A Transformada Wavelet Discreta (TWD), é usualmente utilizada como filtro, capaz de decompor a banda de frequência do sinal de entrada em componentes de baixa e alta frequência, que são chamados de coeficientes de aproximação e detalhe. Na Fig. 4, ilustra a aplicação dos filtros (Santos, 2016).

Quando se aplica a TWD, a taxa de amostragem se divide de acordo com o nível de filtragem. Dessa forma, quanto maior a aplicação de sequência de filtragens, menor é o detalhamento do sinal, o que pode contribuir para a deformação do sinal característico de um distúrbio, sendo

necessário analisar periodicamente através de suscetíveis testes (Misiti et al., 1996).

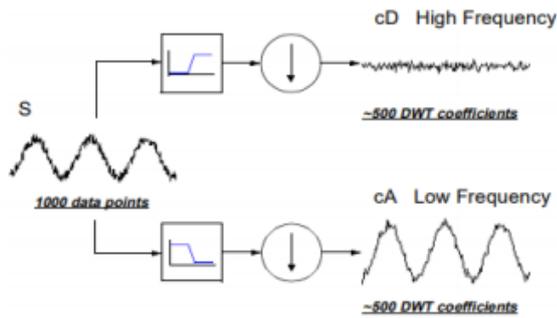


Fig. 4 Filtros de baixa e alta frequência. (Misiti et al., 1996)

Além da perda de detalhamento, esse processo de multiresolução requer um poder computacional mais elevado, entretanto, produz uma estimativa melhor da tendência desconhecida do sinal. Na Fig. 5, representa uma série de decomposição de um sinal (Misiti et al., 1996).

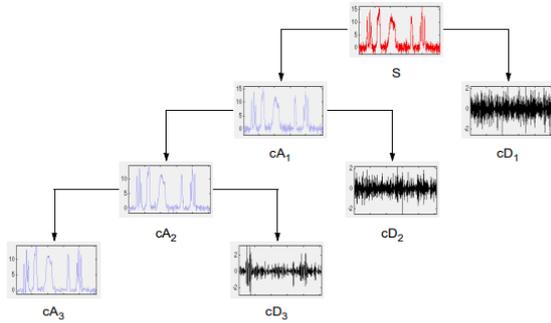


Fig. 5 Decomposição em Níveis de Resoluções. (Misiti et al., 1996).

Os coeficientes são definidos como (Santos, 2016).

$$c_{j+1}(k) = \sum_n D(n-2k) \cdot c_j(n) \quad (5)$$

$$d_{j+1}(k) = \sum_n A(n-2k) \cdot c_j(n) \quad (6)$$

em que, $c_{j+1}(k)$ e $d_{j+1}(k)$ são os coeficientes wavelet de aproximação e de detalhe da escala de resolução $j+1$, respectivamente e g e h são os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente (Santos, 2016).

A ideia principal dos métodos baseados em wavelet é detectar os transientes induzidos por distúrbios em tempo real. No entanto, os transientes induzidos por FAI são superamortecidos ao longo da linha. Além disso, a eficácia de uma análise baseada em wavelet é amplamente influenciada pela escolha da wavelet mãe, de acordo com o tipo de sinal em questão. Na Fig. 6, pode-se verificar o comportamento ideal de cada wavelet mãe em relação ao sinal aplicado (Costa et al., 2015).

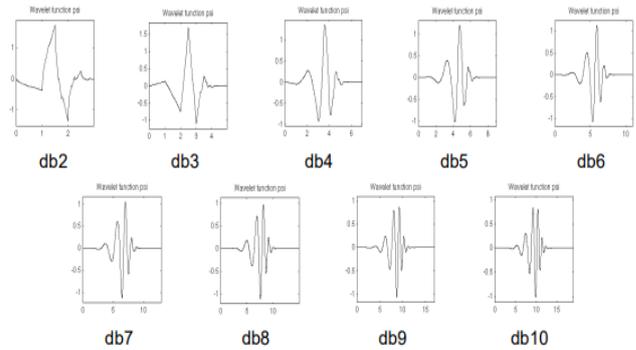


Fig. 6 Família Daubechies. (Misiti et al., 1996).

5. METODOLOGIA

A princípio foi utilizado um banco de dados oriunda de uma pesquisa sobre FAI, que foi cedida pelos integrantes do projeto de pesquisa para a aplicação neste presente trabalho. Este banco de dados, foi constituído mediante o recolhimento de amostras via testes em campo, alternando a superfície de contato e sua umidade relativa (superfície seco e molhado), a fim de abranger o máximo de cenários eventuais possíveis, consolidando um rico acervo de informações sobre a FAI (Santos, 2016; Grimaldi, 2020).

Para obter-se os sinais provenientes de cada teste, utilizou-se Registradores Digitais de Perturbações (RDP) com taxa de amostragem de 15.360 Hz para capturar, com uma maior qualidade, o comportamento dos sinais da corrente e tensão da FAI (Santos, 2016).

A partir desses sinais adquiridos através dos RDP's, foi possível simular em ambiente computacional o comportamento observado em campo, e adaptar para um modelo computacional que é representado pela Fig. 7, contemplando as características já mencionadas no tópico 2, que são: intermitência, *shoulder*, *build-up*, assimetria, não-linearidade e conteúdos harmônicos (Santos, 2016).

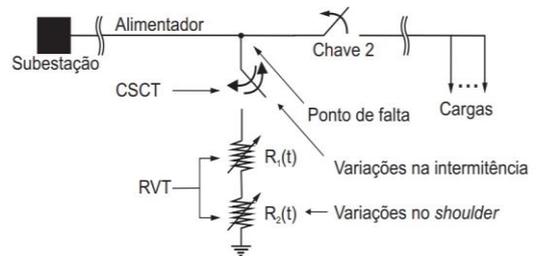


Fig. 7 Modelo para simular a FAI. (Santos, 2016).

O modelo proposto faz o uso de duas resistências variantes no tempo Resistores Variantes no Tempo (RVT), em série e controladas por TACS no ATP, além de uma chave simples controlada por TACS (CSCT), que foi acrescida de forma a dar início à falta e simular a descontinuidade da corrente de falta. Uma chave comum foi ligada a jusante do ponto de falta para simular o rompimento do condutor (Santos, 2016).

Para simular as FAI, além do modelo proposto, foi cedido uma modelagem realizada no ATP Draw (*Alternative Transient Program*) de um sistema-teste (um sistema de

distribuição real de 13,8 kV de uma concessionária de energia elétrica brasileira), cujo diagrama é apresentado na Fig. 8 (Grimaldi, 2020).

O sistema-teste possui as seguintes características (Santos, 2016):

- Linhas trifásicas não transpostas a parâmetros distribuídos e constantes com a frequência;
- Trechos compostos por um único tipo de cabo: cabo 4 AWG;
- Cargas de pontos próximos ao longo do alimentador, agrupadas em uma única barra, resultando em um alimentador com 90 barras;
- Fator skin para os cabos de 0,33;
- Resistividade da terra de 350 Ω/m ;
- Modelo de impedância constante para as cargas, considerando circuitos (RL) paralelos, conectados entre cada fase de cada barra e a terra;
- Fator de potência médio de 0,955.

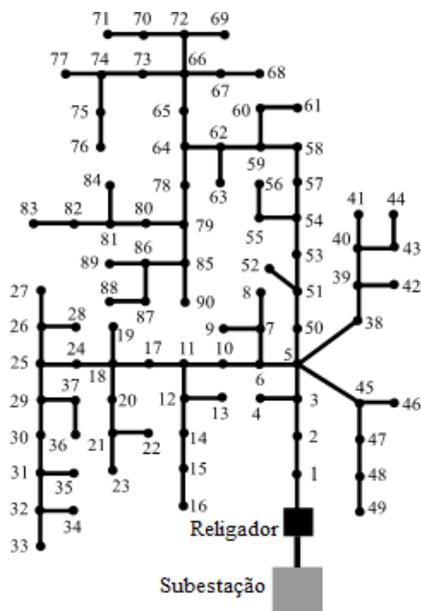


Fig. 8 Diagrama unifilar do modelo do alimentador escolhido. Adaptado de (Santos, 2016).

Desta forma, neste artigo foram simulados 50 sinais de FAI, como consta na Tabela 2, variando de forma aleatória, em diferentes barramentos do sistema-teste com diferentes superfícies de contato e diferentes carregamentos em cada barramento, visando uma melhor diversificação entre os sinais simulados para comprovar a eficiência do algoritmo proposto. Vale salientar que toda a ramificação da rede será vista pela proteção da SE, ou seja, toda FAI simulada e as cargas dos barramentos a montante da falta serão registradas.

Tabela 2 – Banco de dados

Superfície	Número de registros
Areia	10

Calçamento	10
Grama	10
Brita	10
Asfalto	10
Total	50

Como citado no tópico 2, a TWD tem a capacidade de decompor um sinal de entrada, separando os sinais de alta frequência e de baixa frequência. Nesse sentido, a TWD será implementada como filtro de passa baixa e sua saída é concatenada à entrada do PL promovendo a mitigação dos ruídos presentes no SDEE para que os resultados não sofram interferências nos valores previstos do PL. Portanto, neste trabalho foram aplicados os filtros suscetíveis (1º nível, 2º nível, 3º nível e 4º nível) a fim de avaliar a redução dos ruídos presentes no sinal de entrada.

Além dos níveis de resoluções, foi implementado a escolha da Wavelet mãe, nesse caso, a família dbN. Contudo, foi analisado a aplicação da db4, db6, db8 e a db10 para avaliar qual o melhor Wavelet mãe se enquadra ao tratar-se dos sinais da corrente elétrica provenientes de uma FAI.

Após a decomposição do sinal através do filtro passa baixa, a saída do filtro é a entrada do PL. Sendo assim, o PL é encarregado por evidenciar graficamente a detecção da falta, mediante a um aumento repentino e elevado do erro de predição em um determinado instante de tempo, que foi convencionado para acontecer em todas as simulações no tempo de 0.35234 s na fase ‘A’, ou seja, foi simulada uma falta monofásica seguindo a sequência da Tabela 1.

Contudo, vale ressaltar que, o aumento no erro de predição tende a permanecer elevado após o início do distúrbio, indicando um possível problema no SDEE.

O diagrama de blocos apresentado na Fig. 9, resume a metodologia desenvolvida para a detecção das faltas de alta impedância baseado na junção da TWD e o PL.

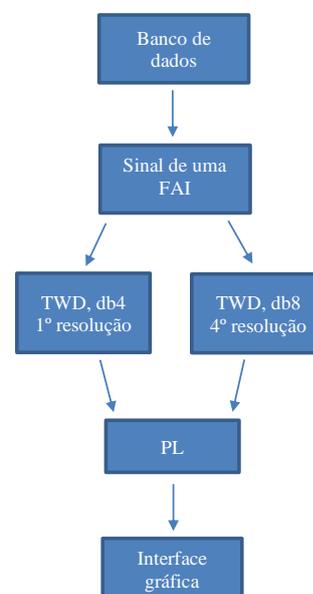


Fig. 9 Diagrama de blocos do processo de detecção.

6. RESULTADOS

Como mencionado no 3º tópico, neste trabalho foi aplicado no sinal de entrada (FAI) diferentes tipos de db's e níveis de resoluções, em detrimento de reconhecer qual combinação iria ter uma melhor performance em detectar a FAI. Portanto, mediante os testes realizados em ambiente computacional, observou-se que, a db8 com a quarta camada de resolução, apresentou melhores resultados nos sinais da corrente típicas do distúrbio. Já a db4, foi escolhida baseado nos resultados positivos apresentados por Santos (2016) e Costa et al. (2015).

Iniciando pela superfície de areia tem-se a seguinte situação: a falta ocorreu na fase A no barramento 10 com 25% de carregamento. O sinal da corrente é representado pela Fig. 10 e percebe-se que, a proteção alocada na SE, registrada as correntes provenientes das cargas ao longo do trecho, mas visualmente não é perceptível identificar o início da FAI, indicando que, possivelmente o sistema convencional não iria atuar devido à baixa amplitude da corrente de falta.

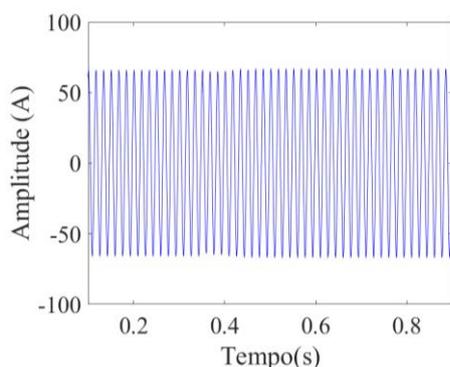


Fig. 10 Sinal da corrente total do barramento 10

Aplicando o algoritmo proposto junto à db4 com apenas um nível de resolução, obtém-se o comportamento que é ilustrado na Fig. 11 (a). Já na Fig. 11 (b), obtém-se o comportamento do sinal da FAI utilizando a db8 com quatro níveis de resolução.

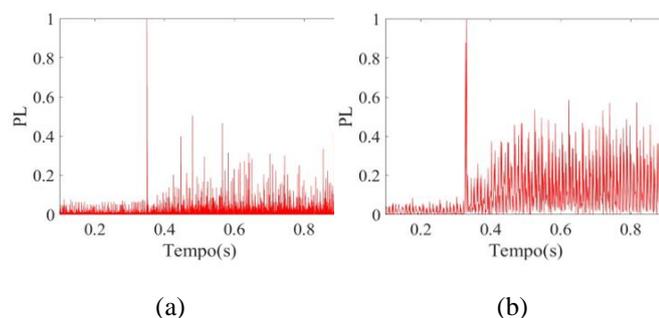


Fig. 11 (a) Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução; (b) Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução

Analisando as Fig. 11 (a) e (b), é possível identificar graficamente o início do distúrbio, devido a mudança repentina do comportamento do sinal. Verifica-se também que, após o algoritmo detectar o transiente eletromagnético provenientes da FAI, os valores do erro de predição continuaram elevados, indicando a continuação de um

possível problema na rede. Contudo, em ambos os casos, o algoritmo obteve sucesso na detecção da falta.

Partindo para a superfície de asfalto tem-se a seguinte situação: A falta ocorreu na fase A, no barramento 30 com o carregamento de 50%. Na Fig. 12, a proteção alocada na SE, consegue registrar as correntes provenientes das cargas ao longo do trecho, a montante a falta. Entretanto visualmente é difícil determinar quando começou a FAI, analisando a Fig. 12. Dessa forma, devido a corrente de falta ser insignificante o sistema de proteção não é sensibilizado, devido os ajustes de pick-up do relé e do religador possuírem valores acima desse parâmetro.

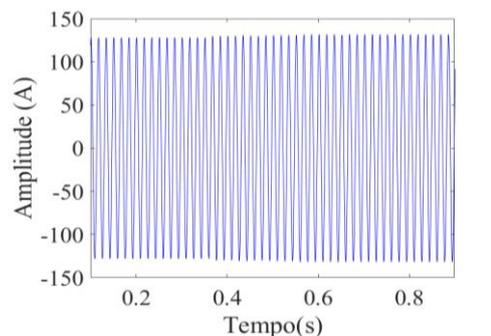


Fig. 12 Sinal da corrente total do 30º barramento

Ao aplicar o algoritmo utilizando a db4 com um nível de resolução, obtém-se o comportamento que é ilustrado na Fig. 13 (a). Já na Fig. 13 (b), obtém-se o comportamento do sinal da FAI utilizando a db8 com quatro níveis de resolução.

Com o comportamento diferente do resultado anterior, na Fig. 13 (a), observa-se que o algoritmo não conseguiu determinar o que seria a FAI ou ruído no SDEE, dificultando visualmente a detecção e requerendo uma análise computacional (rede neural, por exemplo). Já na Fig. 13 (b), gerou-se um erro de predição elevada no instante que começou a FAI e continuou crescente, indicando a detecção de algum problema no SDEE.

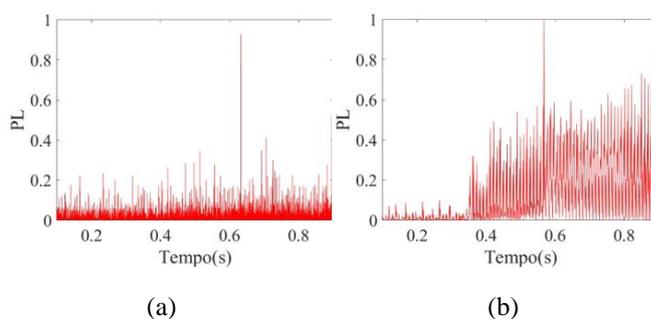


Fig. 13 (a) Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução; (b) Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução.

Na superfície de calçamento na fase A, no barramento 63 com o carregamento de 75%, obtém-se tais resultados, apresentado na Fig. 14.

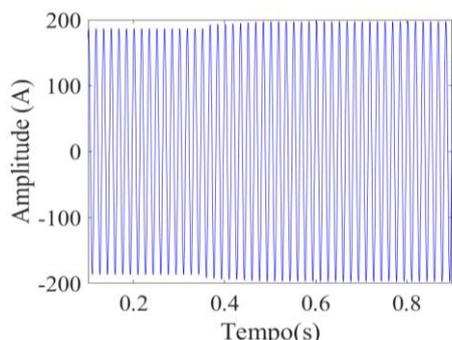


Fig. 14 Sinal da corrente total no barramento 63.

No instante em que acontece a FAI, existe um leve aumento na amplitude da corrente vista pelo lado a montante a falta, representada pela Fig. 14. Tal amplitude é a resultante do carregamento imposta no barramento (cargas conectadas), contudo, não seria suficiente para sensibilizar os ajustes de pick-up dos dispositivos de proteção. Dessa forma, foi aplicado neste sinal, o algoritmo proposto para realizar a detecção da FAI e representadas pela Fig. 15 (a) e (b).

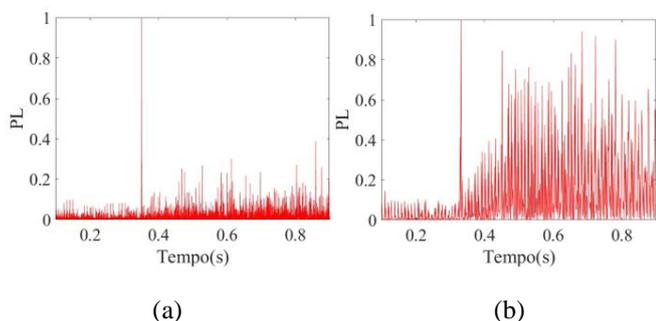


Fig. 15 (a) Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução; (b) Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução.

Nesta superfície, pode-se visualizar na Fig. 15 a detecção da FAI no instante em que se iniciou. No entanto, a db8 mostrou-se mais eficiente devido aos elevados níveis de erro de predição em comparação com a db4. Contudo, tanto a db4 e a db8 foram capazes de detectar a FAI.

Na superfície de grama, no último barramento do sistema teste (barramento 90) com o carregamento de 50%, é representada pela Fig. 16.

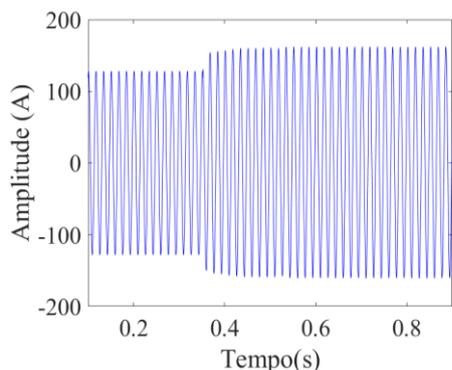


Fig. 16 Sinal da corrente total do barramento 90.

Nesse caso, na Fig. 16, torna-se possível perceber a mudança do sinal da corrente logo quando começa o distúrbio, entretanto, para o sistema essa variação pode ser interpretada como um evento normal do sistema, como descrito no tópico 2. Dessa forma, para realizar um melhor diagnóstico do que realmente está acontecendo no sistema, faz-se necessário aplicar os algoritmos propostos para obter os resultados que são representados nas Fig. 17 (a) e (b).

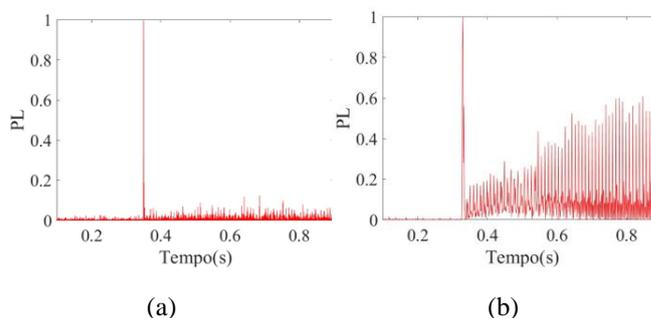


Fig. 17 (a) Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução; (b) Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução.

Analisando as Fig. 17 (a) e (b), nota-se que é nítido a detecção no instante em que se iniciou a FAI, devido ao elevado erro de predição. No entanto, existe uma discrepância entre os valores do erro de predição, sendo que na Fig. 17 (b) possui valores mais elevados. Outro ponto a ser considerado é a mitigação do ruído, que na Fig. 17 (b) ficou menos ruidosa em comparação a Fig. 17 (a).

Como os sinais da FAI são superamortecidos ao longo da linha, torna-se mais difícil detectá-lo, via proteção da SE. Portanto, foi realizada outra simulação na superfície de brita, no último barramento do sistema teste (barramento 90) com o carregamento de 25%, sendo representada pela Fig. 18.

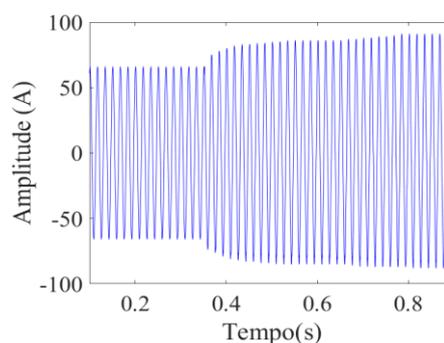


Fig. 18 Sinal da corrente total do barramento 90

Analisando a Fig. 18, ao acontecer a FAI, houve um acréscimo no sinal da corrente, valor esse que, possivelmente não iria justificar a entrada da proteção, tendo em vista a distância do ponto de falta até o relé da subestação e do religador.

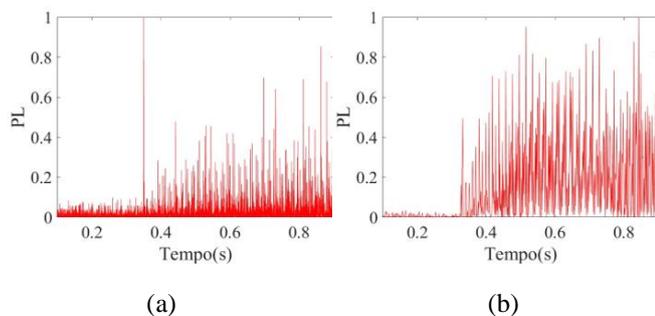


Fig. 19 (a) Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução; (b) Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução.

Analisando a Fig. 19 (a) e Fig. 19 (b), é possível perceber o início da FAI, baseado na quebra do padrão do sinal com uma elevada curva do erro de predição. Tal sinal, permaneceu elevado após a ocorrência da falta, indicando a detecção do problema no SDEE. Outro ponto a ser analisado é a baixa quantidade de ruído presente no sinal, melhorando a identificação visual do gráfico. Contudo, tanto o db4 e o db8 conseguiram detectar a FAI no exato momento que se iniciou a FAI.

6. CONCLUSÕES

Este artigo propôs a utilização de duas ferramentas aplicadas em conjunto para detectar os sinais da FAI no SDEE, sendo eles o PL e o TW. Dessa forma, com o propósito de avaliar melhor o comportamento do sinal da FAI, foi convencionado a falta em diversas superfícies de contato, diferentes barramentos e o carregamento das barras. Com isso, é possível abranger maiores situações e gerar um acervo de informações relevante para o âmbito de estudo.

Ponderando os resultados obtidos nas simulações computacionais, em todos os casos, salvo o resultado representado pela Fig. 14, foram possíveis detectar a FAI no instante da falta (tanto com a db4 quanto com a db8), satisfazendo as normas brasileiras, onde determina que em 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)

Mediante os resultados da db4 com apenas 1º nível de resolução e a db8 com 4º níveis de resolução, conclui-se que, a db8 apresentou melhores resultados nos sinais da corrente de falta inerentes a FAI, em detrimento dos elevados valores do erro de predição. Por outro lado, a db8 necessita de um maior poder computacional para realizar os níveis de filtragem do sinal de entrada.

Contudo, para avaliar a robustez e a aplicabilidade no SDEE, é necessário abranger o estudo para outros fenômenos recorrentes e similares, como: a entrada de cargas não-lineares e a comutação de banco de capacitores. Esses eventos, podem dissuadir a precisão do algoritmo na detecção da FAI, ativando a proteção de maneira equivocada.

Para trabalhos futuros, contempla-se, determinar um limiar no sinal do PL; aplicar o algoritmo nos sinais de corrente dos

eventos típicos do SDEE, como: energização de carga não-lineares e comutação de banco de capacitores; comparar os valores dos eventos aos valores da FAI.

REFERÊNCIAS

- Abracopel. Disponível em: <https://abracopel.org> Acesso em agosto de 2022.
- ARIAS, J. C. G. Identificação de Falhas de Alta Impedância em redes aéreas Multiaterradas. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – USP, 2015
- COSTA, F. B. et al. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 51, n. 6, p. 5312–5323, 2015.
- 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.
- FARIAS, P.E. Detecção e classificação de transitórios em redes de distribuição para a identificação das faltas de alta impedância. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 2013.
- GRIMALDI et al. (2020). High impedance fault detection based on predictor linear. *Science Direct*, 106846.
- KOTLINSKI, E. Detecção de falta de alta impedância em sistema de distribuição radial utilizando redes neurais artificiais. Dissertação de mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, 2013.
- LIMA, E. M. Proposição de um Método de Detecção de FAI Baseado nos Componentes Harmônicos de Baixa Frequência. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2016.
- MISITI et al. Wavelet toolbox. User's Guide Version 1, 1996.
- NAKAGOMI, R. M. Proposição de um sistema de faltas de alta impedância em redes de distribuição. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo -USP, São Paulo, 2006.
- 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. *Science Direct*, 35-41.
- SANTOS, W. C. Identificação de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2016.
- SILVA, H. R. J. Análise de uma nova proposta para identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 2020.
- ZAMBONI, L. Detecção e Localização de Falhas em Sistemas Elétricos de Distribuição Usando Abordagem Inteligente Baseada em Análise Espectral de Sinais. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.