



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ARIEL LIMA DAMIÃO

**DETECÇÃO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A TRANSFORMADA WAVELET CONCATENADO
AO PREDITOR LINEAR**

FEIRA DE SANTANA

Fevereiro de 2022

ARIEL LIMA DAMIÃO

**DETECÇÃO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A TRANSFORMADA WAVELET CONCATENADO
AO PREDITOR LINEAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica, da Unidade de Ensino
Superior de Feira de Santana, em
cumprimento às exigências para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Reginaldo Barnabé
Gonzalez Grimaldi

FEIRA DE SANTANA

Julho de 2021

ARIEL LIMA DAMIÃO

**DETECÇÃO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A TRANSFORMADA WAVELET CONCATENADO AO
PREDITOR LINEAR**

Feria de Santana, 20 de fevereiro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Me. Reginaldo Barnabé Gonzalez Grimaldi
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Orientador

Prof. Me. Márcio da Silva Pereira Bove
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador

Prof. Me. Flávio Couvo Teixeira Maia
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem ele, nada seria possível.

A minha amada tia, Normilda Lopes de Cerqueira (*in memoriam*), pelo amor de mãe, carinho e atenção durante todos os 23 anos da minha vida.

A minha mãe, Aline Vieira Lima, pela presença e apoio nas minhas decisões.

Aos meus avós, Josenilda Vieira Lima e Ariosvaldo Silva Filho pela empolgação e orações.

A minha família que, com orações e incentivos, não mediu esforços para me ajudar a chegar tão longe.

Ao meu orientador, professor Reginaldo Barnabé Gonzalez Grimaldi, pela inspiração, direção e parceria, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas e conterrâneos pela parceria, troca de conhecimentos e confiança durante todo o período da graduação.

Enfim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse objetivo.

*A minha família,
em especial, a minha tia Normilda,
a minha mãe Aline e
aos meus irmãos Ariele e Daniel.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Corrente de FAI gerada em ambientes diversificados	12
Figura 2 - Sequência de etapas na ocorrência de uma FAI	Erro! Indicador não definido.
Figura 3 - Características do sinal da corrente proveniente de uma FAI.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 4 - Diagrama de blocos do PL	Erro! Indicador não definido.
Figura 5 - Filtros de baixa e alta frequência	Erro! Indicador não definido.
Figura 6 - Decomposição em níveis de resoluções	Erro! Indicador não definido.
Figura 7 - Família Daubechies	Erro! Indicador não definido.
Figura 8 - Modelo representativo de uma FAI.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 9 - Diagrama unifilar do modelo do alimentador escolhido	Erro! Indicador não definido.
Figura 10 - Diagrama de blocos do processo de detecção	Erro! Indicador não definido.
Figura 11 - Sinal da corrente total do 10º barramento	Erro! Indicador não definido.
Figura 12 - Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução	Erro! Indicador não definido.
Figura 13 - Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução	Erro! Indicador não definido.
Figura 14 - Sinal da corrente total do 30º barramento	Erro! Indicador não definido.
Figura 15 - Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução.	Erro! Indicador não definido.
Figura 16 - Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução	Erro! Indicador não definido.
Figura 17 - Sinal da corrente total do 63º barramento.	Erro! Indicador não definido.
Figura 18 - Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução.	Erro! Indicador não definido.
Figura 19 - Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução.	Erro! Indicador não definido.
Figura 20 - Sinal da corrente total do 90º barramento.	Erro! Indicador não definido.
Figura 21 - Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução.	Erro! Indicador não definido.
Figura 22 - Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução.	Erro! Indicador não definido.
Figura 23 - Sinal da corrente total do 90º barramento	Erro! Indicador não definido.
Figura 24 - Erro de predição utilizando db4 de 1º resolução.	Erro! Indicador não definido.
Figura 25 - Erro de predição utilizando db8 de 4º resolução	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Etapas do processo de uma FAI.....	13
Tabela 2 – Banco de dados.....	18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
ABRADEE	<i>Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica</i>
BC	<i>Banco de Capacitores</i>
CSCT	<i>Chave Simples Controlada por TACS</i>
Db4	<i>Daubechies 4</i>
Db8	<i>Daubechies 8</i>
DDP	<i>Diferença de Potencial</i>
DEC	<i>Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora</i>
DIC	<i>Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora</i>
DMIC	<i>Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade</i>
DICRI	<i>Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora</i>
EC	<i>Energização de Carga</i>
FAI	<i>Faltas de Alta Impedância</i>
FEC	<i>Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora</i>
FIC	<i>Frequência de Interrupção Individual por Unidade</i>
RDP	<i>Registradores Digitais de Perturbações</i>
RVT	<i>Resistências Variantes no Tempo</i>
PL	<i>Preditor Linear</i>
PRODIST	<i>Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica</i>
SDEE	<i>Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica</i>
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TW	<i>Transformada Wavelet</i>
TWD	<i>Transformada de Wavelet Discreta</i>

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	9
1. Introdução.....	10
2. Fundamentação Teórica.....	12
2.1. Faltas de Alta de Impedância.....	12
2.2. Preditor Linear.....	14
2.3. Transformada Wavelet.....	15
3. Metodologia	16
3.1. Banco de dados	16
3.2. Aplicação dos algoritmos.....	17
4. Resultados.....	18
5. Conclusão.....	22
6. Referências.....	23

DETECÇÃO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A TRANSFORMADA WAVELET CONCATENADO AO PREDITOR LINEAR

ARIEL LIMA DAMIÃO

Departamento de Engenharia Elétrica, Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana,
Feira de Santana, Bahia, Brasil.

Abstract: *Faced with various disturbances that accompany the distribution system, such as High Impedance Faults (HIF) they are considered one of the biggest problems faced by electricity supplier concessionaires. This phenomenon occurs when the primary conductor comes into contact with a high impedance surface, generating fault currents with low amplitudes. However, as currents coming from an HIF, it will not sensitize conventional protection devices that are driven by overcurrent's. In this way, the phenomenon is not extinguished by the protection system, and it can trigger several problems that involve financial, social and public safety aspects. 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.*

Key-words: *High Impedance Faults, Transformed Wavelet, Linear Predictor.*

Resumo: Diante de vários distúrbios que acometem o sistema de distribuição, as Faltas 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. Dessa forma, o fenômeno não é extinguido pelo sistema de proteção, podendo desencadear em diversos problemas que implicam nos aspectos financeiros, sociais e de segurança pública. Contudo, este tipo de falta evidencia características peculiares nos sinais de corrente e, portanto, através dessas características, este trabalho tem como objetivo precípuo 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.

Palavras-chave: Faltas de Alta Impedância, Transformada Wavelet, Preditor Linear.

1. Introdução

Desde sua criação, a eletricidade vem desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico pela sua importância e versatilidade em realizar inúmeras atividades do cotidiano. Contudo, antes de transportar a eletricidade até a unidade consumidora, faz-se necessário a implementação de um conjunto de sistemas elétricos, composta por quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo (NACIMENTO, 2014)

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 evidencia maiores taxas de falhas, expondo o SDEE a várias perturbações e distúrbios (KOTLINSKI, 2013).

Dentre inúmeros distúrbios que ocorrem no SDEE, as faltas 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 má condutividade elétrica, as correntes de falta possuem baixas amplitudes, 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 de tempo, proporcionando riscos de choques elétricos em animais e nas pessoas que se aproximarem. Segundo a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), em 2018, os cabos energizados no solo foram a segunda causa que mais matou no SDEE. Além dos acidentes, esse fenômeno tem o potencial de gerar incêndios em propriedades públicas, privadas ou no meio ambiente, devido a formação dos arcos elétricos (FARIAS, 2013).

Durante uma FAI, além de comprometer a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica, as concessionárias ficam sujeitas em sofrer sanções pelos órgãos reguladores, caso haja transgressões dos índices de qualidade e de energia elétrica. Esses índices estão previstos no 8º módulo dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Segundo o PRODIST (2021), os indicadores são:

- Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC);
- Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC);

- Duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DIC);

- Frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão (FIC);

- Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DMIC);

- Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DICRI).

Ao longo do tempo, vários métodos foram desenvolvidos com o propósito de detectar as FAI, porém até hoje, nenhum foi aplicado de forma efetiva. Por outro lado, não existe atualmente nenhum equipamento apropriado para este tipo de falta. No entanto, é relevante para as concessionárias de energia elétrica mitigar ou 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 também, para preservar vidas.

Portanto, o objetivo precípua deste trabalho foi desenvolver um método capaz de detectar a FAI, baseados nos sinais da corrente de falta, a partir dos algoritmos do Preditor Linear (PL) e da Transformada Wavelet (TW). Contudo, para melhor verificar a eficácia dos algoritmos, foi utilizado um sistema teste de uma concessionária de energia elétrica brasileira variando a superfície de contato, o barramento e seus respectivos carregamentos ao longo da modelagem.

A organização do artigo é estruturada pelos seguintes tópicos: o segundo capítulo contextualiza sobre o distúrbio (FAI) e das ferramentas utilizadas para realizar a detecção. Já no terceiro tópico, é apresentado o banco de dados e a metodologia empregada. Em seguida, no quarto tópico, é exposto graficamente os resultados das simulações em ambiente computacional. E por fim, no quinto tópico, as ponderações conclusivas acerca dos resultados obtidos no quarto tópico.

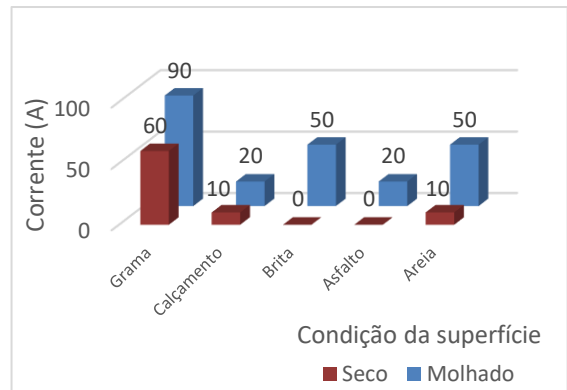
2. Fundamentação Teórica

2.1. Falta de Alta de 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, como galhos de árvores, brita, areia, asfalto ou pedras (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, 2011), 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 Figura 1, são representados os valores referentes as correntes de falta provenientes de ensaios em campo, variando o ambiente e situações (SANTOS, 2011):

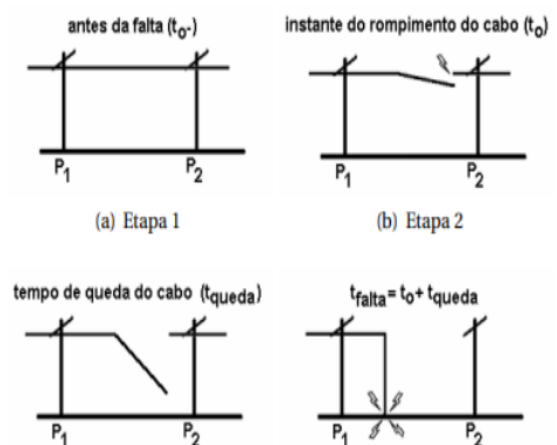
Figura 1 - Corrente de FAI gerada em ambientes diversificados



Fonte: Adaptado de Santos

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. Dessa forma, de acordo com Nakagomi (2006), na Figura 2 é apresentado o processo sequencial das etapas para a ocorrência de uma FAI e posteriormente na Tabela 1 é abordado os processos em ordem sequência.

FIGURA 2 - SEQUÊNCIA DE ETAPAS NA OCORRÊNCIA DE UMA FAI



Fonte: (NAKAGOMI, 2006)

Tabela 1 - Etapas do processo de uma FAI

Etapas		Tempo	Comentários
1	Pré-falta	$0 \leq T < T_0$	As correntes que circulam na rede são produzidas somente pelas cargas
2	Rompimento do cabo	$T = T_0$	Abertura da fase em que ocorre o defeito
3	Queda do cabo	$T_0 < T < T_0 + T_{queda}$	Na queda do cabo rompido, não há contato com outra fase ou neutro.
4	Arco-elétrico	$T \geq T_0 + T_{queda}$	O cabo chega ao solo e inicia-se o arco elétrico

Fonte: Adaptado de (Nakagomi, 2006)

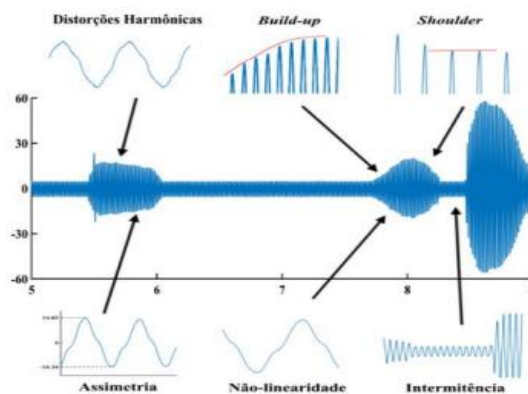
O aparecimento dos arcos elétricos citado na Etapa 4 da Tabela 1, são formados de acordo com aumento da Diferença de Potencial (DDP) e do campo elétrico tornar-se mais intenso devido a aproximação do condutor com o solo. Dessa forma, os elétrons livres são acelerados até atingir um certo limiar de energia 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).

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).

Analizando o comportamento da presença do arco elétrico, a FAI percebeu-se algumas características peculiares na forma de onda da corrente, ilustradas na Figura 3 (NAKAGOMI, 2006; COSTA *et al*, 2015 SANTOS *et al*, 2016; SILVA, 2020):

- 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.
- Build-up: A corrente de falta amplifica gradualmente até seu valor máximo;
- Shoulder: Intervalos no Build-up durante alguns ciclos;
- Não-linearidade: Não se admite homogeneidade nas superfícies de contato, devido a variedade de camadas com diferentes resistências;
- Intermitência: O processo aleatório da extinção e reignição do arco elétrico geram descontinuidade na corrente de falta em um determinado período de tempo.

FIGURA 3 - CARACTERÍSTICAS DO SINAL DA CORRENTE PROVENIENTE DE UMA FAI.



Fonte: (LIMA, 2016)

Por último, mas não menos importante, são as análises do espectro da frequência associada à FAI. Segundo (NAKAGOMI,

2006), as correntes oriundas de uma FAI, apresentam as seguintes componentes harmônicas:

- 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);
- A assimetria entre os semiciclos é o principal fator responsável pela presença dos harmônicos de ordem par;
- A intermitência da corrente durante a extinção e a reignição do arco induz o surgimento de um espectro de harmônicos de alta frequência;
- Os fenômenos de build-up e shoulder provocam variação da amplitude da corrente ao longo do tempo, provocando o aparecimento das harmônicas de frequência não múltiplas da fundamental, conhecidos como inter-harmônicos.

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).

2.2. 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 amostras anteriores. Os coeficientes de ponderação são obtidos pela comparação entre os valores previstos com os valores futuros (Dalzell & Cowan, 2011).

Já 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. (8), 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).

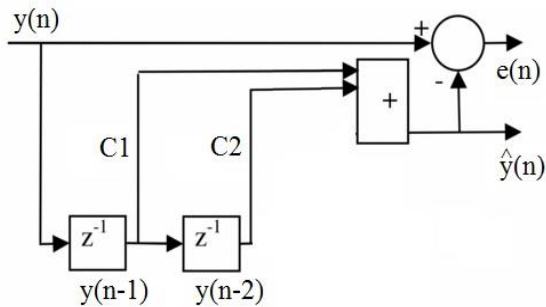
Para a predição dos sinais da FAI foi necessário definir o grau do modelo, ou seja, m (que deve ser cuidadosamente selecionado) e os coeficientes, $C_1, C_2, \dots, C_m$, que devem ser calculados da janela de modelagem.

O objetivo do PL é obter o erro de predição, onde 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 transientes eletromagnetos nas simulações envolvendo os sinais característicos da FAI. Abaixo, segue o modelo utilizado neste artigo, um preditor linear de dois passos (de 2° ordem) em tempo discreto, representado pela

Figura 4 (GRIMALDI, 2018).

FIGURA 4 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PL



Fonte: (MISITI *et al.*, 1996)

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:

$$\hat{y}(n) = C1 \cdot y(n-1) + C2 \cdot y(n-2). \quad (3)$$

O erro gerado entre o valor previsto e o valor real é $e(n) = y(n) - \hat{y}(n)$. (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 (GRIMALDI, 2020).

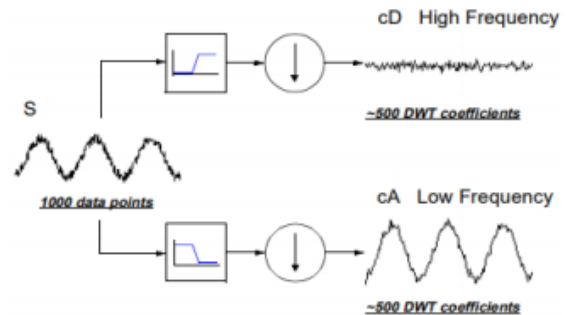
2.3. Transformada Wavelet

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 Figura 5, ilustra a aplicação dos filtros (SANTOS, 2016):

FIGURA 5 - FILTROS DE BAIXA E ALTA FREQUÊNCIA

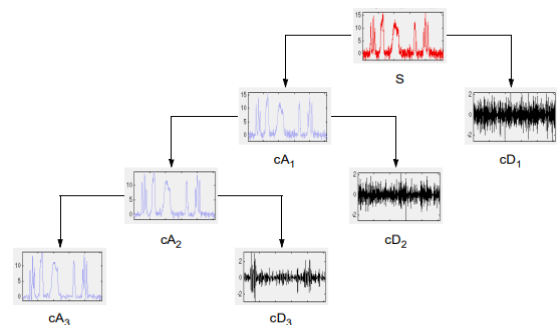


Fonte: (MISITI *et al.*, 1996)

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.

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 Figura 6, representa uma série de decomposição de um sinal (MISITI *et al.*, 1996).

FIGURA 6 - DECOMPOSIÇÃO EM NÍVEIS DE RESOLUÇÕES



Fonte: (MISITI *et al.*, 1996)

Os coeficientes são definidos como

(SANTOS, 2016).

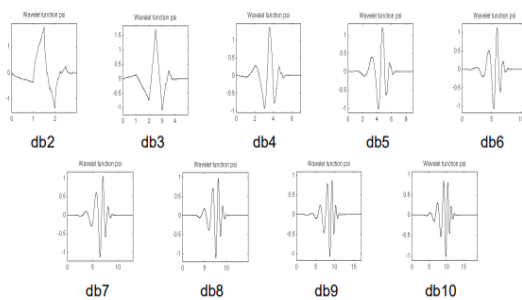
$$C_{j+1}(k) = \sum_n D(n - 2k) \cdot c_j(n) \quad (5)$$

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

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 Figura 7, pode-se verificar o comportamento ideal de cada wavelet mãe em relação ao sinal aplicado (COSTA *et al*, 2015).

FIGURA 7 - FAMÍLIA DAUBECHIES



Fonte: (MISITI *et al.*, 1996)

3. Metodologia

Neste capítulo, descreve-se sobre os métodos empregados para a avaliação do algoritmo na detecção da FAI, descrevendo também, os dados das superfícies, localidade e carregamento dos barramentos.

3.1. Banco de dados

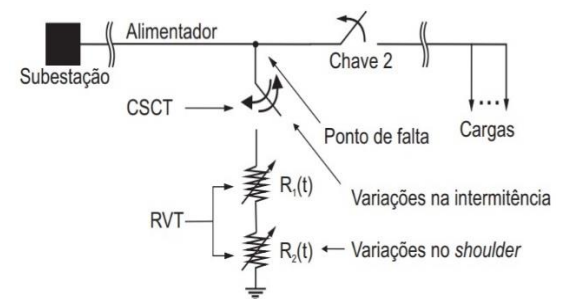
A princípio foi utilizado um banco de

dados oriunda de uma pesquisa sobre FAI, que foi gentilmente 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), afim 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 Figura 8, contemplando as características já mencionadas no tópico 2, que são: intermitência, shoulder, build-up, assimetria, não-linearidade e conteúdos harmônicos (SANTOS, 2016).

FIGURA 8 - MODELO REPRESENTATIVO DE UMA FAI



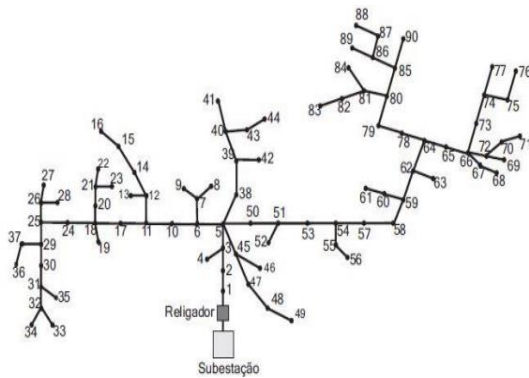
Fonte: (SANTOS, 2016)

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 Figura 9 (GRIMALDI, 2020).

FIGURA 9 - DIAGRAMA UNIFILAR DO MODELO DO ALIMENTADOR ESCOLHIDO



Fonte: (SANTOS, 2016)

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.

Desta forma, neste artigo foram

simulados 50 sinais de FAI, como consta na Tabela 2, variando de forma aleatória, 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.

Tabela 2 – Banco de dados

Superfície	Número de registros
Areia	10
Calçamento	10
Grama	10
Brita	10
Asfalto	10

Fonte: autoria própria

3.2. Aplicação dos algoritmos

3.2.1 Transformada Wavelet Discreta

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 prevendo a mitigação dos ruídos presentes no SDEE para que os resultados não sofram interferências. 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 quando se trata dos sinais da corrente elétrica provenientes de uma FAI.

3.2.2 Preditor Linear

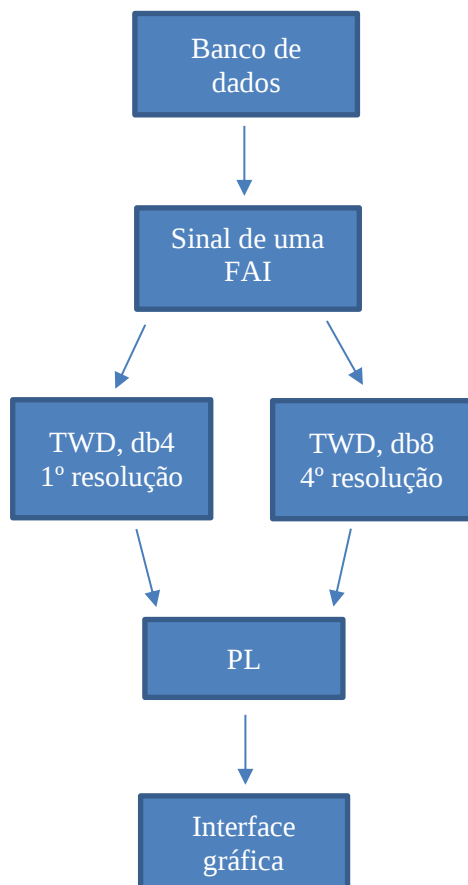
Após a decomposição do sinal, através

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 Figura 10, sumariza a metodologia desenvolvida para a detecção das faltas de alta impedância baseado na junção da TWD e o PL.

FIGURA 10 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO DE DETECÇÃO



Fonte: Autoria própria

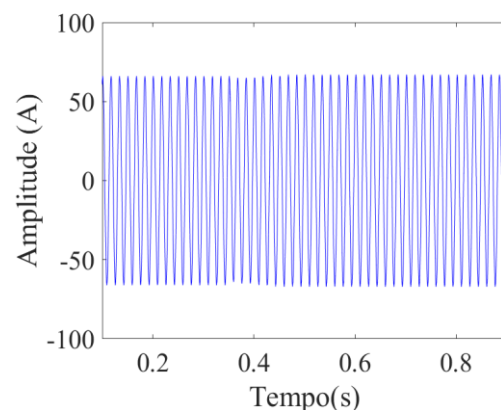
4. Resultados

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 do 10º barramento com 25% de carregamento.

O sinal da corrente é representado pela Figura 11 e percebe-se que, 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.

FIGURA 11 - SINAL DA CORRENTE TOTAL DO 10º BARRAMENTO

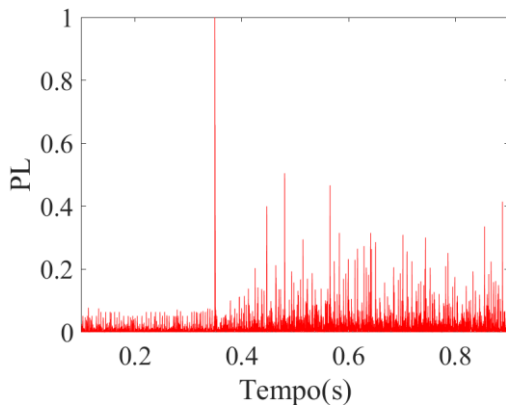


Fonte: Autoria própria

Aplicando o algoritmo proposto junto à db4 com apenas um nível de resolução, obtém-se o comportamento que é ilustrado na Figura 12. Já na Figura 13, obtém-se o comportamento do sinal da FAI utilizando a

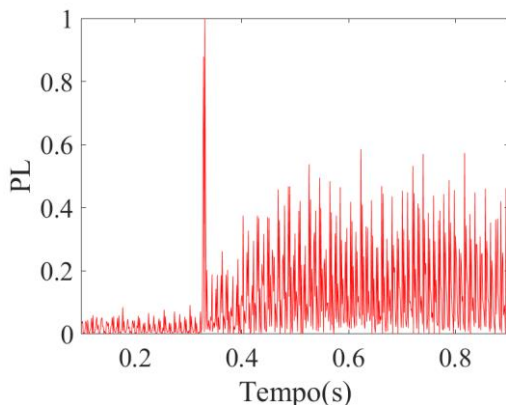
db8 com quatro níveis de resolução.

FIGURA 12 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB4 DE 1º RESOLUÇÃO



Fonte: Autoria própria

FIGURA 13 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB8 DE 4º RESOLUÇÃO



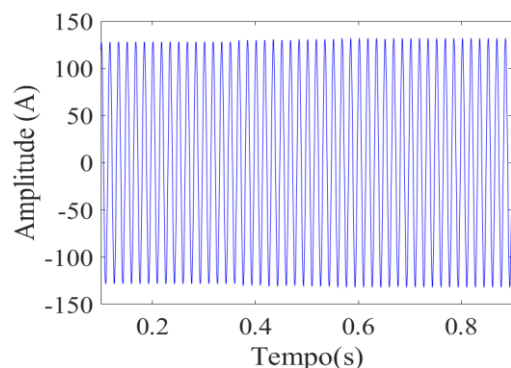
Fonte: Autoria própria

Analisando os gráficos da Figura 12 e Figura 13, 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, 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 FAI.

Partindo para a superfície de **asfalto** tem-se a seguinte situação: A falta ocorreu na fase A, barramento 30º com o carregamento de 50%.

Na Figura 14, representa graficamente o sinal da corrente na fase A e no instante que aconteceu a FAI, entretanto visualmente é difícil determinar quando começou o distúrbio. Dessa forma, a corrente de falta é insignificante para sensibilizar o sistema de proteção devido os ajustes de pick-up dos relés possuírem valores acima desse parâmetro.

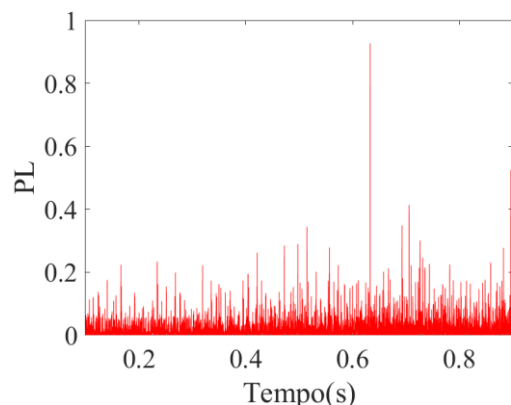
FIGURA 14 - SINAL DA CORRENTE TOTAL DO 30º BARRAMENTO



Fonte: Autoria própria

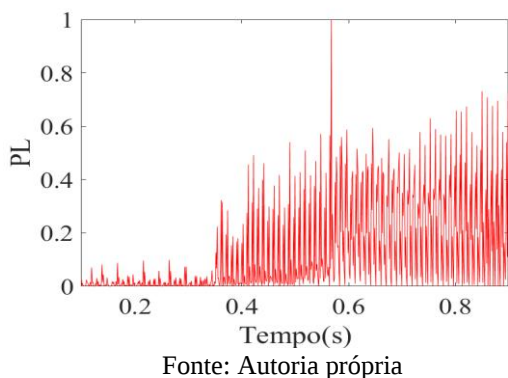
Ao aplicar o algoritmo utilizando a db4 com um nível de resolução, obtém-se o comportamento que é ilustrado na Figura 15. Já na Figura 16, obtém-se o comportamento do sinal da FAI utilizando a db8 com quatro níveis de resolução.

FIGURA 15 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB4 DE 1º RESOLUÇÃO



Fonte: Autoria própria

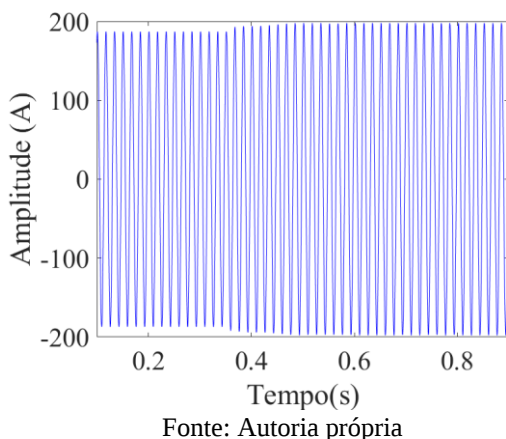
FIGURA 16 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB8 DE 4º RESOLUÇÃO



Com o comportamento diferente do resultado anterior, na Figura 15, 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 Figura 16, gerou-se um erro de predição elevada no instante que começou a FAI e continuou crescente, indicando a detecção de algum problema no SDEE.

Na superfície de **calçamento** na fase A, barramento 63º com o carregamento de 75%, obtém-se tais resultados:

FIGURA 17 - SINAL DA CORRENTE TOTAL DO 63º BARRAMENTO.



No instante em que acontece a FAI, existe um leve aumento na amplitude da corrente, representada pela Figura 17. Tal amplitude 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 pelas Figuras 18 e Figura 19.

FIGURA 18 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB4 DE 1º RESOLUÇÃO.

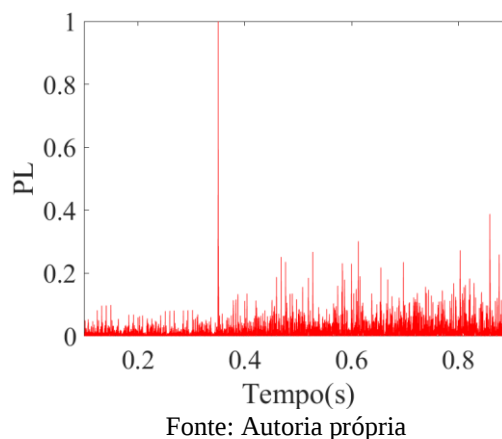
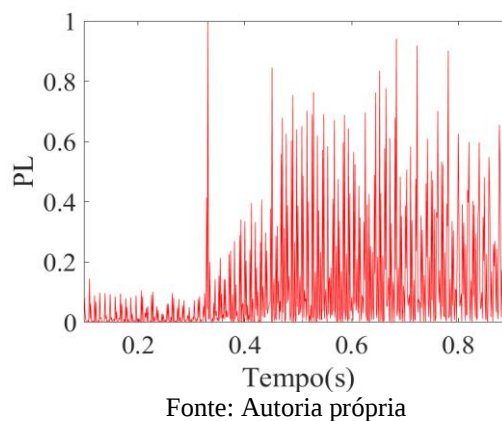


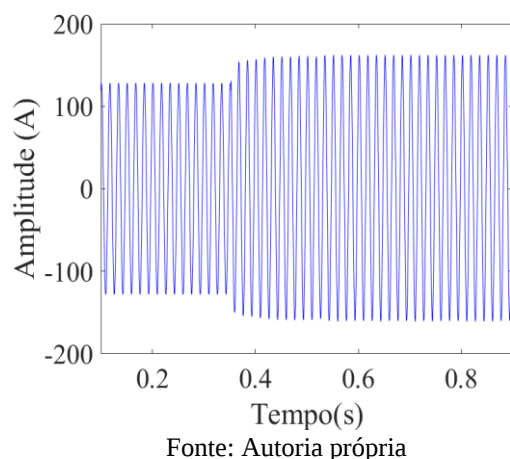
FIGURA 19 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB8 DE 4º RESOLUÇÃO.



Nesta superfície, pode-se visualizar graficamente 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 ultimo barramento do sistema teste (90º barramento) com o carregamento de 50%, é representada pela Figura 20.

FIGURA 20 - SINAL DA CORRENTE TOTAL DO 90° BARRAMENTO.



Nesse caso, 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 na Figura 21 e Figura 22.

FIGURA 21 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB4 DE 1° RESOLUÇÃO.

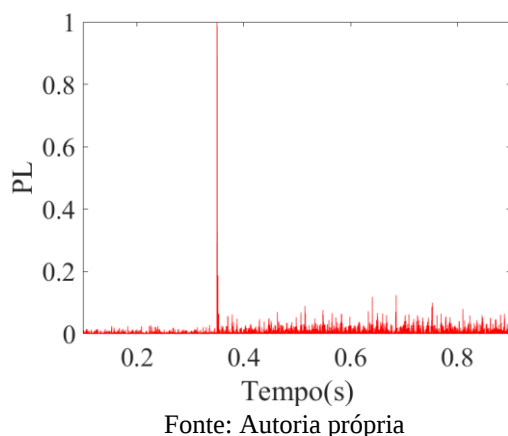
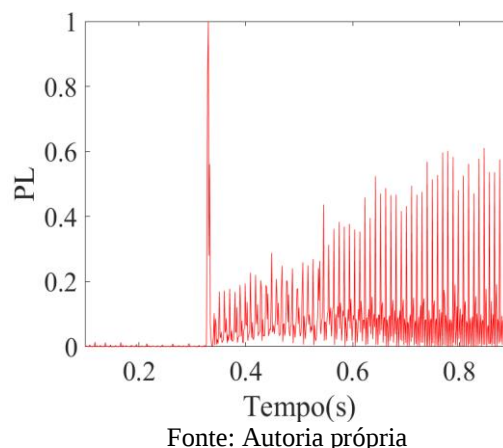


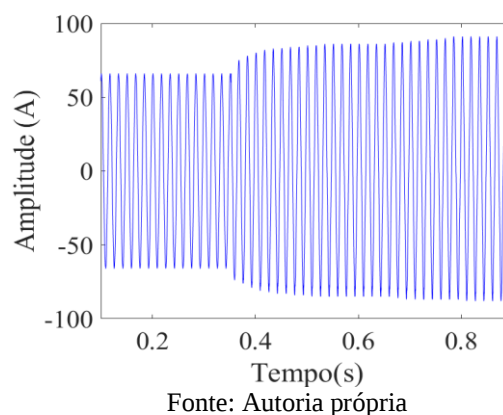
FIGURA 22 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB8 DE 4° RESOLUÇÃO.



Analisando as Figuras 21 e Figura 22, 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 Figura 22 possui valores mais elevados. Outro ponto a ser considerado é a mitigação do ruído, que na Figura 22 ficou mais limpa em comparação a Figura 21.

Como os sinais da FAI são superamortecidos ao longo da linha, torna-se mais difícil detectá-lo, via relé da SE. Portanto, foi realizada outra simulação na superfície de brita, no último barramento do sistema teste (90° barramento) com o carregamento de 25%, sendo representada pela Figura 23.

FIGURA 23 - SINAL DA CORRENTE TOTAL DO 90° BARRAMENTO



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.

FIGURA 24 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB4 DE 1º RESOLUÇÃO.

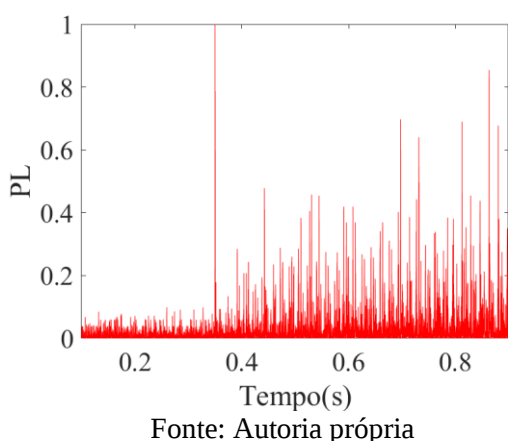
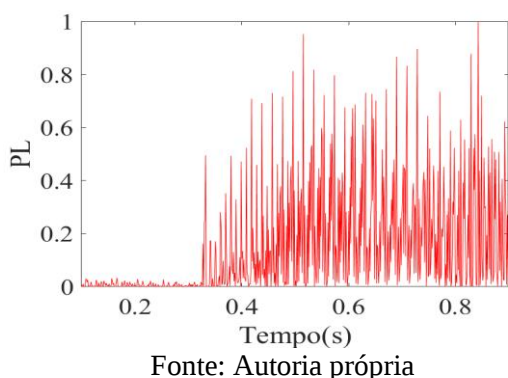


FIGURA 25 - ERRO DE PREDIÇÃO UTILIZANDO DB8 DE 4ª RESOLUÇÃO



Analisando as Figura 24 e Figura 25, 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.

5. Conclusão

Este artigo propôs a utilização de duas ferramentas aplicadas em conjunto para detectar a FAI no SDEE, sendo eles o PL e o TW. Dessa forma, com o propósito de avaliar melhor o comportamento do sinal, foi convencionado a falta em diversas superfícies, diferentes barramentos e variando seus carregamentos. 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 Figura 15, 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
- Inserção de Geração Distribuída (GD) no sistema-teste.

6. Referências

- ABRADEE. Disponível em: <http://www.abradee.com.br>. Acesso em abril de 2021.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST. Módulos 8*. 2021.
- NACIMENTO, J. P. *Um algoritmo de proteção adaptativa para sistemas de distribuição com inserção de geração distribuída*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2014.
- 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.
- 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, R. B. G. *Proposição e avaliação de técnicas alternativas para detecção de faltas de alta impedância*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Sergipe – UFS, 2020.
- 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.
- SANTOS, W. C. *Identificação de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2016.
- ZAMBONI, L. *Detecção e Localização de Faltas em Sistemas Elétricos de Distribuição Usando Abordagem Inteligente Baseada em Análise Espectral de Sinais*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- 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.
- SANTOS, W. C. *Uma revisão de modelos clássicos de faltas de alta impedância para efeito de melhoramento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2011.
- 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.
- Riahy, G. H., & Abedi, M. (2007). *Short term wind speed forecasting for wind turbine applications*. Science Direct, 35-41.
- GRIMALDI et al. (2020). *High impedance fault detection based on predictor linear*. Science Direct, 106846.
- MISITI et al. *Wavelet toolbox. User's Guide Version 1*, 1996.

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.

ONS. (2009). *Operador Nacional do Sistema. Brasil: Submódulo 2.6.*

ANEEL. (2011). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Brasil: Módulos 1 ao 8.*

GRIMALDI et al. (2020). **High impedance fault detection based on predictor linear.** *Science Direct*, 106846.

STEIN. H. **uma nova proposta para detecção de faltas de alta impedância envolvendo a ruptura do condutor.** *Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, 2019*

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.*

ARIAS, J. C. G. **Identificação de Faltas de Alta Impedância em redes aéreas Multiaterradas.** *Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – USP, 2015*