

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5711>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 07/04/2021

APROVADO 26/05/2021

PUBLICADO ON-LINE 22/08/2021

PUBLICADO 30/12/2022

EDITOR ASSOCIADO

Ademar Gonçalves da Costa Junior

Detecção de faltas de alta impedância por meio de análise fasorial e correntes de sequência zero

 Edson Antonio Batista ^{[1]*}

 Moacyr Aureliano
Gomes de Brito ^[2]

 Renan Saito Kawakita ^[3]

 Jader Lucas Perez ^[4]

 Cristiano Quevedo Andrea ^[5]

 José Wanderley Scucuglia ^[6]

[1] edson.ufms@gmail.com

[2] moacyr.brito@ufms.br

[4] jaderluc@gmail.com

[5] cristiano.andrea@ufms.br

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Universidade Federal
de Mato Grosso do Sul (UFMS), Brasil

[3] rskawakita@gmail.com

Energisa Mato Grosso do Sul, Brasil

[6] scucuglia@nastek.com.br

Nastek Indústria e Tecnologia, Brasil

RESUMO: Este trabalho apresenta uma solução para a detecção de faltas de alta impedância (FAIs) por meio do uso de um dispositivo FPGA (*Field Programmable Gate Array*). A proposição é de vital importância para o funcionamento adequado do sistema elétrico de distribuição de forma a atender aos requisitos dos procedimentos de distribuição (PRODIST), elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para analisar o comportamento das grandezas elétricas frente a essa falha, uma rede de distribuição primária foi modelada, usando a plataforma MATLAB/Simulink®. Paralelamente à modelagem, um algoritmo em linguagem VHDL (*VHSIC Hardware Description Language*) foi desenvolvido para a detecção da falta, no qual o monitoramento da corrente fasorial, por meio da Transformada Discreta de Fourier, foi utilizado, além do valor RMS da corrente de sequência zero. Para realizar as simulações e os testes do algoritmo, o software ModelSim® foi utilizado, e, posteriormente, o código foi embarcado no dispositivo de lógica programável FPGA. O algoritmo de detecção de falta de alta impedância foi integrado ao sistema modelado em Simulink® para monitoramento em tempo real e comando de um dispositivo de proteção. Os resultados apontam que o algoritmo foi capaz de detectar as faltas, indicando a fase interrompida e comandando a proteção de forma eficiente.

Palavras-chave: análise fasorial; correntes trifásicas; falta de alta impedância; simulação em hardware; sistemas de distribuição.

High-impedance fault detection through phasor analysis and zero-sequence currents

ABSTRACT: This work presents a solution for the detection of high impedance faults (HIFs) using an FPGA (*Field Programmable Gate Array*) device. The proposition is of vital importance for the proper operation of the electrical distribution system to meet the requirements of the distribution

*Autor para correspondência.

procedures (PRODIST) prepared by the National Electric Energy Agency (ANEEL) of Brazil. To analyze the behavior of the electrical quantities in face of this fault, a primary distribution network was modeled using MATLAB/Simulink® platform. Parallel to the modeling, a VHDL (VHSIC Hardware Description Language) algorithm was developed for detecting the fault, where it used the phasor current monitoring employing the Discrete Fourier Transform in addition to the RMS value of the zero-sequence current. To perform the simulations and tests of the algorithm, the ModelSim® software was used and, later, the code was implemented into the FPGA programmable logic device. The proposed high impedance detection fault has been integrated into the system modeled in Simulink® for real-time monitoring and command of a protection device. The results show that the algorithm was able to detect the HIFs, indicate the broken phase, and command the protection efficiently.

Keywords: *distribution systems; hardware simulation; high impedance faults; phasorial analysis; three-phase currents.*

1 Introdução

A crescente demanda por energia elétrica exige um maior planejamento para manter a confiabilidade e a segurança do fornecimento de energia pelas concessionárias. Os investimentos nessa área são importantes para que o sistema elétrico de distribuição possa operar sem interrupções, mantendo a qualidade de energia, além de prezar pela segurança das pessoas e dos equipamentos. Nesse aspecto, o sistema elétrico de potência passa por várias modificações para modernizar seus sistemas de monitoramento, controle e proteção (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

No entanto, mesmo com a modernização dos sistemas de proteção das redes de distribuição aéreas (RDAs), ainda existem problemas ocasionados por fatores climáticos e condições do ambiente em que a linha se encontra. É nesse contexto que o presente trabalho aborda a falta de alta impedância (FAI), ou seja, um curto-circuito gerado quando um condutor energizado faz contato com uma superfície de alto valor resistivo (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020). Essas faltas geram níveis de corrente insuficientes para sensibilizar a operação dos equipamentos de proteção de sobrecorrente (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

Usualmente, a impedância máxima de falta, considerada nos cálculos de curto-circuito à terra pelas distribuidoras, para o ajuste dos sistemas de proteção, é de 40 Ω (PENTEADO NETO, 2005). Todavia, os níveis de falta podem envolver resistências de contato muito superiores, dificultando ou, em algumas situações, impossibilitando a sua identificação. Nesse sentido, as FAIs podem causar acidentes envolvendo pessoas e animais, além de prejuízos aos consumidores e à concessionária de distribuição de energia. A FAI é uma problemática ainda carente de análise com resultados práticos, visto que existem vários estudos (CHAKRABORTY; DAS, 2019; CHOLLOT *et al.*, 2017; FARIAS *et al.*, 2016; HAGHIFAM; SEDIGHI; MALIK, 2006; MICHALIK *et al.*, 2006; MILIOUDIS; ANDREOU; LABRIDIS, 2012), mas nenhum com implementação eficiente até o momento. Diante desse fato, a necessidade de eliminar esse problema ainda é objetivo a ser conquistado pelas concessionárias de energia elétrica, pelas fabricantes de relés e pela comunidade científica mundial (CHAKRABORTY; DAS, 2019; CHOLLOT *et al.*, 2017; FARIAS *et al.*, 2016; HAGHIFAM; SEDIGHI; MALIK, 2006; PENTEADO NETO, 2005).

Existem várias técnicas para a identificação de faltas de alta impedância (CHAKRABORTY; DAS, 2019; CHOLLOT *et al.*, 2017; FARIAS *et al.*, 2016; HAGHIFAM; SEDIGHI; MALIK, 2006; MICHALIK *et al.*, 2006; MILIOUDIS; ANDREOU; LABRIDIS, 2012), sendo que, neste artigo, o método utilizado foi o de detecção baseado na análise fasorial das componentes fundamentais das correntes trifásicas do sistema primário de distribuição. Para a obtenção desses fasores de corrente, a Transformada Discreta de Fourier (ERSOY, 1994) foi adotada, com a inserção de filtros passa-baixa de segunda ordem (DORF; BISHOF, 2001) para a melhoria de robustez. Para aumentar a assertividade do algoritmo, o valor eficaz de corrente de sequência zero (OLIVEIRA *et al.*, 2000) foi adicionado para a detecção de FAI longe do alimentador principal.

Para a realização dos testes, uma Rede de Distribuição Aérea (RDA), no software MatLab/Simulink®, foi implementada, e o algoritmo de identificação da FAI foi desenvolvido na linguagem de descrição de hardware VHDL (do inglês, *VHSIC Hardware Description Language*) embarcado em um dispositivo de lógica programável FPGA (do inglês, *Field Programmable Gate Array*) (UNSLAM; FAR, 2017).

No restante do artigo, a seção 2 apresenta uma revisão sobre o tema de Falta de Alta Impedância e na seção 3, o método de detecção de FAI por análise fasorial das correntes trifásicas. Os resultados de simulação, no ambiente MatLab/Simulink®, e os que utilizam a estratégia FPGA *in-the-Loop* (FIL) (UNSLAM; FAR, 2017), onde o sistema de controle é implementado diretamente na placa FPGA e o modelo da planta é implementado na plataforma Simulink®, permitindo testes em tempo real, são apresentados para demonstrar a validade da proposta são apresentados na seção 4. Por fim, na seção 5, as conclusões desse trabalho.

2 Falta de alta impedância

Na maioria das regiões brasileiras, a distribuição da energia elétrica é feita por meio de redes aéreas com condutores nus, ao invés de condutores isolados, em virtude da redução do custo de investimento (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020; PENTEADO NETO, 2005). Esses condutores estão expostos a vários fatores que podem comprometer sua integridade física e, também, a sua fixação nos postes. Sendo assim, a sociedade em geral fica sujeita a um grande risco de acidentes caso um condutor energizado venha a cair no solo.

Na ocorrência do rompimento de condutor da rede primária de distribuição, o contato deste com o solo provocará um curto-circuito, caracterizado como uma falta de alta impedância (FAI), tendo em vista a elevada resistividade do meio. Tal problema não pode ser detectado com confiabilidade pelos equipamentos de proteção convencionais, visto que os níveis de corrente gerados são insuficientes para sensibilizar a operação desses (CHAKRABORTY; DAS, 2019; MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

A rede de distribuição é usualmente protegida pela atuação de dispositivos de proteção convencionais, basicamente compostos por relés de sobrecorrente, de desequilíbrio de carga entre as fases (corrente de neutro) e de fusíveis (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020). Esse sistema, normalmente, não detecta as faltas de alta impedância. Para que sejam tomadas ações, as concessionárias e as empresas de distribuição dependem da notificação dos consumidores (ou outros entes). Esse processo pode levar um tempo excessivo e, nesse período, o cabo permanece energizado, representando um risco elevadíssimo e potencial de acidentes (FARIAS *et al.*, 2016; PENTEADO NETO, 2005).

2.1 Contextualização das FAIs

A falta de alta impedância ocorre quando há o contato de um condutor energizado da rede primária de distribuição com uma superfície com alto valor resistivo (árvores, asfalto, concreto, grama, entre outros). Esse tipo de falta pode ser definido como uma corrente de curto circuito cuja intensidade é menor do que a sensibilidade da função de proteção de sobrecorrente ajustada para proteger uma linha de distribuição (FARIAS *et al.*, 2016; PENTEADO NETO, 2005).

As FAIs podem ser classificadas em dois tipos: as ativas e as passivas. As ativas ocorrem quando um condutor energizado se aproxima de uma superfície ou um objeto e, com a perda de isolamento do meio que os separa, forma um arco elétrico. Esse meio pode ser o ar ou o solo que separa o condutor do aterramento mais próximo. A falta ativa pode ser classificada ainda como em série (interrompendo a corrente de carga na fase) ou em derivação (quando o condutor, sem se romper, entra em contato com algum objeto aterrado com alto valor de impedância). As faltas passivas são aquelas nas quais o condutor se rompe, porém, sem entrar em contato com alguma superfície, não existindo a circulação de corrente à jusante da falta e nem o surgimento do arco elétrico (FARIAS *et al.*, 2016; PENTEADO NETO, 2005).

Segundo a norma de distribuição NDU-006 (ENERGISA, 2022), é determinado que, na rede de distribuição, o vão entre os postes deve ser de 40 metros e a distância entre tais estruturas, na via pública, deve estar entre 36 e 42,5 metros, procurando, sempre que possível, adotar o vão de 40 metros ou próximo desse valor. Logo, no caso de um rompimento de condutor, a tendência é que uma das partes seccionadas tocará o solo, visto que a distância do vão é aproximadamente o dobro da altura dos postes (11 ou 12 metros para a rede primária). Nesse caso, podem ocorrer dois tipos de falta, as de baixa ou de alta impedância. Na falta de baixa impedância, o solo (sem proteção) é adequadamente o condutor, gerando correntes elevadas e acionando, então, o dispositivo de proteção de sobrecorrente da linha; por outro lado, na falta de alta impedância, o solo apresenta elevada impedância, a qual gera correntes insuficientes para sensibilizar a proteção (CHAKRABORTY; DAS, 2019; MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020).

2.2 Principais causas das FAIs

O rompimento de um dos condutores de fase da RDA é causado por fatores internos, como falhas nas condições que mantêm a integridade física do condutor, ou por casos externos, como árvores, descargas atmosféricas, ventos, abalroamentos, falha humana, entre outros. Em Penteado Neto (2005), uma análise dos dados históricos de uma concessionária de energia brasileira nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil foi realizada, em que se confirmou que as principais causas para o rompimento de cabos de distribuição são: descarga atmosférica, corrosão atmosférica e contato com árvores.

2.3 Propriedades de uma FAI

A ocorrência das FAIs é mais frequente em sistemas de distribuição de até 15 kV, quando comparadas a ocorrências em sistemas de transmissão, devido às características da falta e das redes de distribuição (PENTEADO NETO, 2005). A magnitude da corrente de falta é altamente influenciada pelas condições do local, podendo ser citados

o tipo e a umidade do solo, além da presença de materiais na terra que estabelecem caminhos para a corrente, tais como canos metálicos de condução de água, cercas metálicas e raízes de árvores extensas. Valores típicos de corrente de falta são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 ►
Valores típicos de corrente de falta com condutores caídos ao solo.
Fonte: Farias et al. (2016)

Superfície	Corrente de falta (A)
Asfalto seco	<<1
Concreto (não reforçado)	<1
Areia seca	<1
Areia molhada	15
Gramma seca	20
Pasto seco	25
Gramma molhada	40
Pasto molhado	50
Concreto (reforçado)	75

Dessa forma, constata-se que os valores de impedância podem variar de centenas de Ω a dezenas de $k\Omega$, tomando como base as correntes de falta presentes na Tabela 1 e a tensão da rede de distribuição – 13,8 kV de linha e 7,96 kV fase-neutro (FARIAS *et al.*, 2016).

Considerando-se o alto risco envolvendo segurança pessoal associado às faltas de alta impedância, as concessionárias de energia elétrica são motivadas a implantar esquemas de proteção que aumentem a segurança na identificação desse tipo de ocorrência. Vários métodos de detecção de faltas de alta impedância têm sido desenvolvidos ao longo das últimas três décadas, podendo ser divididos conforme a grandeza monitorada: corrente, tensão ou tempo de propagação de pulsos aplicados ao alimentador (CHAKRABORTY; DAS, 2019; CHOLLOT *et al.*, 2017; GONZALES *et al.*, 2018; HAGHIFAM; SEDIGHI; MALIK, 2006; LAAKSONEN; HOVILA, 2017; MILIOUDIS; ANDREOU; LABRIDIS, 2012; MYINT; WICHAKOOL; SANTIPRAPAN, 2018; ZANGH *et al.*, 2019).

Apesar das diversas formas de identificação e mitigação de FAIs, é evidente que uma rede de distribuição que apresente total confiabilidade é economicamente inviável, visto que é elevado o valor de investimento em componentes, inspeções e manutenções preventivas. Logo, sempre ocorrerão faltas, e o sistema de proteção deverá estar apto para operar adequadamente nessas situações, corrigindo, em tempo hábil, as faltas (ANEEL, 2017).

2.4 Principais metodologias para detecção de FAIs

Um modelo bem difundido para a simulação da falta de alta impedância é o apresentado em Zamanan e Sykulsi (2014). Esse modelo é composto por dois resistores variáveis e dois diodos, de forma a representar as características básicas de uma FAI,

como a assimetria e as descontinuidades apresentadas em sua forma de onda. Na Figura 1, é ilustrado o modelo de uma FAI e, na Figura 2, é apresentada a forma de onda de corrente típica de uma FAI.

Figura 1 ►
Modelo para
simulação de uma FAI.
Fonte: adaptado de
Zamanan e Sykulsi (2014)

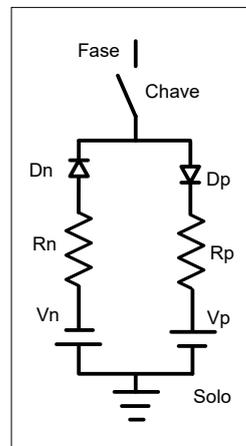
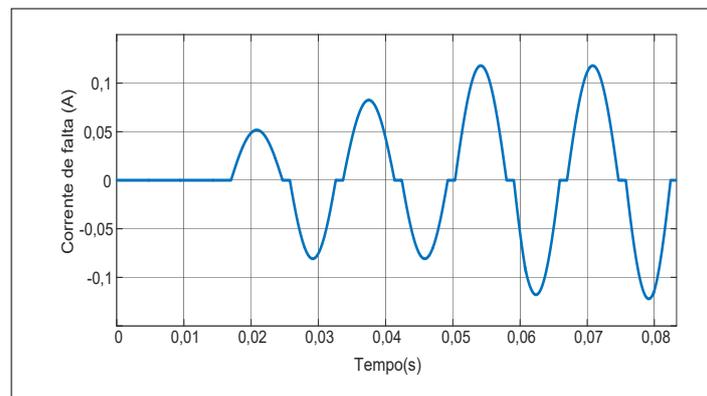


Figura 2 ►
Corrente típica de uma FAI.
Fonte: dados da pesquisa



Baseando-se na corrente típica de uma FAI (forma de onda e conteúdo espectral), diversos autores têm proposto metodologias baseadas em detecção de correntes de sequência zero (CHOLLOT *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2019), de detecção de harmônicos específicos (CHOLLOT *et al.*, 2017), uso de redes neurais e lógica *fuzzy* (GONZALES *et al.*, 2018; HAGHIFAM; SEDIGHI; MALIK, 2006; MILIOUDIS; ANDREOU; LABRIDIS, 2012), ou análise fasorial (MYINT; WICHAKOOL; SANTIPRAPAN, 2018; ZHANG *et al.*, 2019) para a detecção da falta. Essas metodologias ou são extremamente complexas e difíceis de serem embarcadas, como no caso das redes neurais (elevado tempo de treinamento também é proibitivo), ou têm falsas detecções quando há a energização de bancos capacitivos ou transformadores de alta potência, no caso do uso de harmônicos específicos para a detecção. Em relação ao uso de sequência zero, o desequilíbrio de cargas pode levar a falsos alarmes.

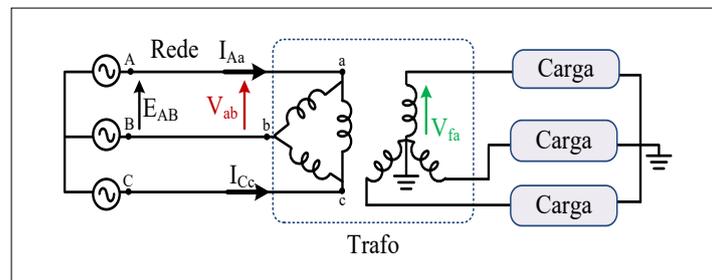
Entre tais metodologias, a análise fasorial se destaca pela simplicidade e pela facilidade de implementação embarcada, no entanto, sinais com elevado conteúdo harmônico ou nível CC podem prejudicar o sistema de detecção de FAI. Portanto, na pesquisa apresentada neste artigo, um algoritmo para a extração da componente fundamental da corrente foi implementado, que, aliado à utilização de filtros de segunda ordem, servem para aumentar a confiabilidade do sistema de detecção de FAI baseados em análise fasorial das correntes. Adicionou-se, neste sistema, o valor eficaz da componente de sequência zero para aumentar a assertividade do algoritmo, formando um algoritmo

híbrido. Como o sistema é trifásico, a corrente de sequência zero é obtida facilmente pelo uso das transformadas de Clark e Park (BRITO *et al.*, 2015). Obviamente é necessário escolher um nível de ajuste para inserir essa variável no algoritmo de detecção, o que nem sempre é trivial.

3 Método de detecção de FAI por análise fasorial das correntes trifásicas

Considerando uma rede de distribuição primária trifásica em 13,8 kV a três fios, com transformador de distribuição Δ -Y abaixador (13,8 kV:220 V), como ilustrado na Figura 3, nota-se que as tensões de fase da carga, refletidas ao primário do trafo, são iguais às tensões de linha do gerador, conforme a Equação 1, mesmo que a carga não seja equilibrada (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2020; ZAMANAN; SYKULSI, 2014).

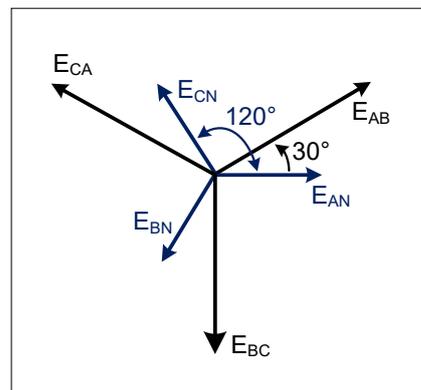
Figura 3 ►
Diagrama simplificado de um sistema de distribuição.
Fonte: elaborado pelos autores



$$E_{AB} = E_{BC} = E_{CA} = V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} \quad (1)$$

Observa-se que as tensões de linha (E_{AB} , E_{BC} e E_{CA}) são iguais em magnitude e com defasamento angular de 120° entre si, como pode ser observado no diagrama fasorial, adotando-se sequência positiva de fases, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 ►
Diagrama fasorial.
Fonte: ANEEL (2017)



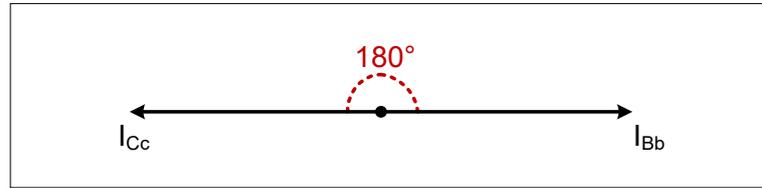
Na ocorrência de rompimento de um dos condutores da linha trifásica, isto é, se uma fase estiver em aberto, i.e., fase A (I_{Aa}), a alimentação da carga passará a ter uma característica bifásica. Dessa forma as correntes de linha que alimentam a carga ficarão

com um ângulo defasado em aproximadamente 180° entre si, conforme ilustrado no diagrama fasorial da Figura 5.

Figura 5 ▶

Diagrama fasorial para falta de alta impedância na fase A.

Fonte: elaborado pelos autores



Para a obtenção do diagrama fasorial, considerou-se a Transformada Discreta de Fourier (TDF) para a obtenção do módulo e do ângulo das componentes fundamentais de corrente de cada fase. A TDF desempenha um papel fundamental, se não crucial, em diversas aplicações de processamento digital de sinais (GERA, 1999; GUO; SITTON, BURRUS, 1998). As Equações de 2 a 6 demonstram a aplicação da TDF para obtenção do módulo e do ângulo (fase) das correntes. A Equação 2 apresenta como se obter a parte real do fasor, a Equação 3, a parte imaginária e, por meio das Equações 4 e 5, obtêm-se o módulo e a fase. Nesse conjunto de equações, N representa o número total de amostras, n a amostra atual e x o sinal amostrado. Na Equação 6, a frequência de amostragem (f_m) delimita o número de amostras (N) de acordo com a frequência do sinal (f_s).

$$Real = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cos\left(\frac{2\pi}{N} n\right) \quad (2)$$

$$Imag = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \sen\left(\frac{2\pi}{N} n\right) \quad (3)$$

$$Mod = \sqrt{Real^2 + Imag^2} \quad (4)$$

$$Fase = tg^{-1} \frac{Imag}{Real} \quad (5)$$

$$N = \frac{f_m}{f_s} \quad (6)$$

Em sistemas reais, a multiplicação do sinal senoidal das correntes com os sinais senoidais das Equações 2 e 3 levará ao aparecimento de componentes com o dobro da frequência, acarretando oscilações nos cálculos realizados conforme as Equações 4 e 5. Nesse sentido,

um filtro passa-baixa de segunda ordem com coeficiente de amortecimento unitário é aplicado, conforme a Equação 7, para minimizar essa influência nos cálculos do módulo e da fase. A frequência de corte adotada é $\omega_c = i 75,4$ rad/s.

$$F(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2s\omega_c + \omega_c^2} \quad (7)$$

As formas de onda apresentadas nas Figuras 6 e 7 ilustram o uso das Equações 2, 3 e 5 no cálculo da fase de uma forma de onda de corrente arbitrária, tensão como referência e corrente adiantada de 45° , sem e com o uso da Equação 7. Observa-se, portanto, a partir da análise da Figura 7, a viabilidade do uso do filtro, reduzindo as oscilações no cálculo da fase.

Figura 6 ►

Formas de onda de tensão (em vermelho) e corrente (em preto).
Fonte: dados da pesquisa

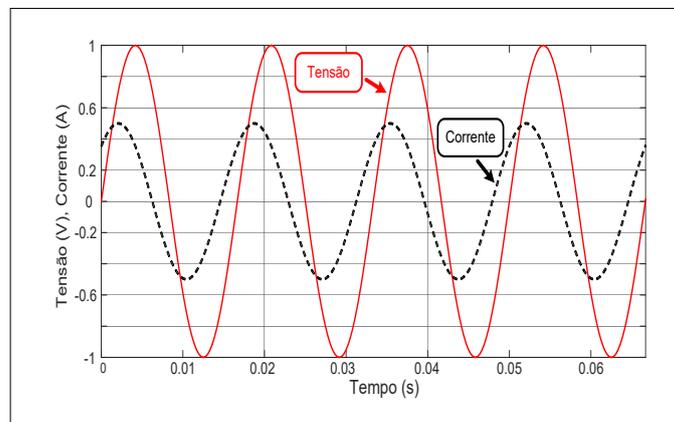
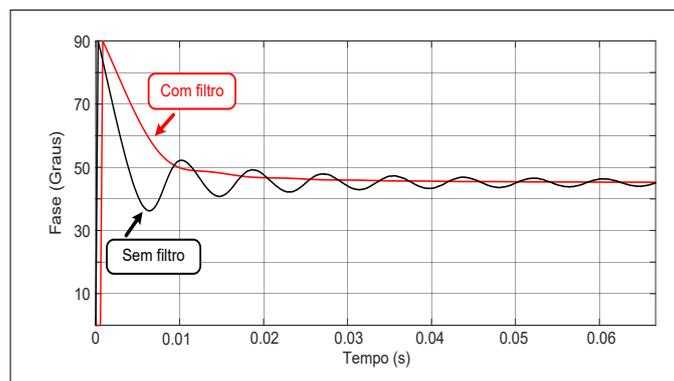


Figura 7 ►

Fase da forma de onda de corrente. Com o uso do filtro (em vermelho) e sem o uso do filtro (em preto).
Fonte: dados da pesquisa



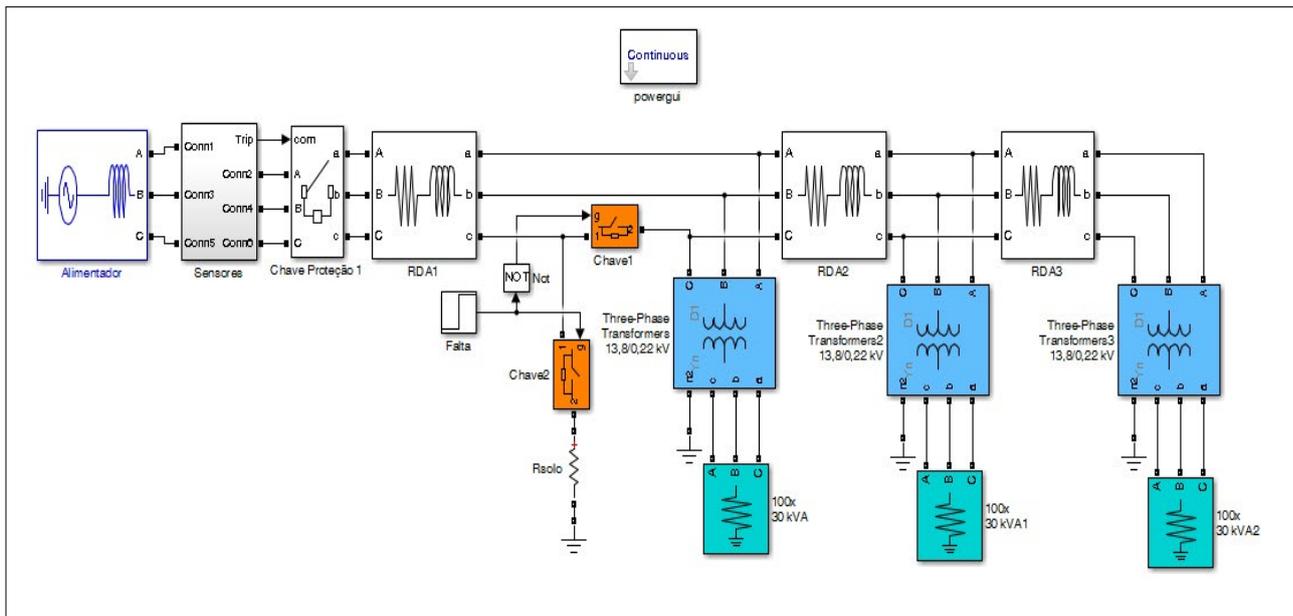
4 Simulação e análise do comportamento da rede de distribuição frente a uma FAI

Nesta seção, são apresentados os principais resultados obtidos com o algoritmo de detecção de FAI usando a plataforma MatLab/Simulink® e a inserção desse algoritmo no sistema FGPA, por meio da utilização da técnica FPGA *in-the-loop*.

4.1 Modelagem de uma rede de distribuição de 13,8 kV

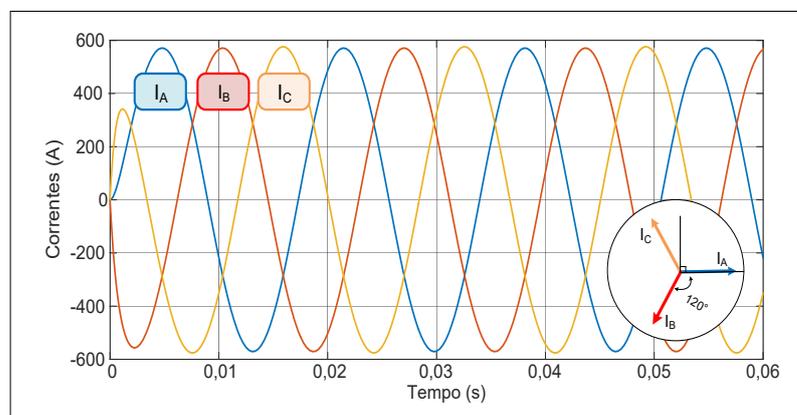
Figura 8 ▼
Configuração para simular uma rede de distribuição.
Fonte: elaborado pelos autores

Para analisar o comportamento das correntes trifásicas frente ao rompimento de condutor da rede de distribuição primária, um modelo de simulação de uma rede de distribuição de 13,8 kV foi desenvolvido no software MatLab/Simulink®, ilustrado na Figura 8. O carregamento dessa rede hipotética é de 10 MVA, sendo que o conjunto de transformadores 1, 2 e 3 alimenta, respectivamente, cargas de 3 MVA, 5,5 MVA e 1,5 MVA. Os sensores de corrente estão inseridos antes da chave de proteção 1, isto é, logo após a saída do alimentador.



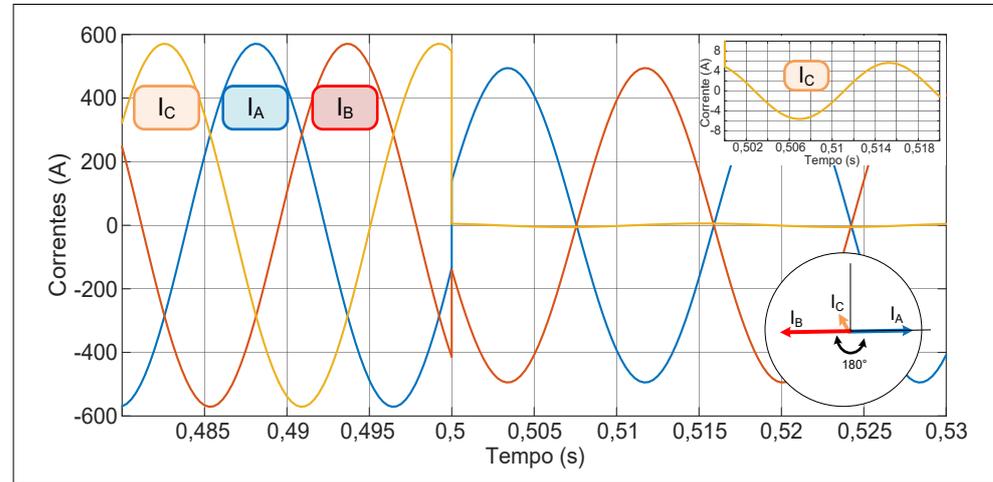
Com base no modelo de rede da Figura 8 e, adotando um sistema com cargas equilibradas, observa-se que as correntes da rede de distribuição primária apresentam mesma magnitude e defasamento angular de 120° entre si, conforme pode ser observado na Figura 9. O índice RDA1 se refere ao trecho de rede entre a chave de proteção 1 e o primeiro conjunto de transformadores; os trechos RDA2 e RDA3 se referem aos trechos entre o conjunto de transformadores 1 e 2 e entre o conjunto de transformadores 2 e 3, respectivamente.

Figura 9 ►
Comportamento das correntes trifásicas: correntes no trecho entre a proteção 1 e o primeiro conjunto de transformadores.
Fonte: dados da pesquisa



Em seguida, no instante $t = 0,5 \text{ s}$, aplicou-se a alternância de estados das chaves (1 e 2) ilustrada na Figura 8, que representa a falta de alta impedância para simular um rompimento do condutor da fase C. Ao visualizar as formas de onda das correntes na Figura 10, é possível verificar, após o transitório, o defasamento de 180° entre as fases A e B. Nesse caso, a corrente de falta apresenta uma amplitude aproximada de 5,63 A, em virtude do uso de uma resistência de solo de $2 \text{ k}\Omega$.

Figura 10 ►
Correntes trifásicas, detalhe da corrente na fase C e diagrama fasorial após o rompimento da fase C.
Fonte: dados da pesquisa



4.2 Algoritmo para detecção de falta de alta impedância

Após a simulação da rede de distribuição aérea e a análise do comportamento da corrente frente a uma falta de alta impedância, foi desenvolvido o algoritmo capaz de identificar o defasamento angular de 180° entre duas fases e determinar qual fase foi rompida.

Neste artigo, conforme já salientado, o uso da TDF foi considerado para a obtenção dos fasores de corrente (módulo e fase da componente fundamental) a serem inseridos no sistema de identificação de FAI. Considerou-se uma taxa de amostragem de 3600 Hz, obtendo-se 60 pontos de análise em uma janela de um ciclo de rede (60 Hz), conforme a Equação 6. Adicionalmente, para a implementação da Equação 7, adotou-se a transformada de Tustin (OGATA, 2001) aplicando a mesma taxa de amostragem de 3600 Hz, com posterior programação usando a representação direta de sua equação a diferenças, usando registradores, somadores e multiplicadores. Os coeficientes do filtro foram representados em formato de ponto fixo (UNSAM; FAR, 2017), utilizando 32 bits, sendo 1 bit de sinal e 30 bits para a parte fracionária.

As funções seno e cosseno foram implementadas, utilizando-se de tabelas unitárias em formato de ponto fixo, com 1 bit para a parte inteira mais 1 bit de sinal e 10 bits para a parte fracionária. Adotou-se aritmética de ponto fixo para as operações de soma e multiplicação.

O algoritmo foi desenvolvido na linguagem de descrição de hardware de alto nível VHDL. Na Figura 11 ilustra-se a descrição das entradas e das saídas do algoritmo. De forma simplificada, o fluxograma da Figura 12 auxilia no entendimento do algoritmo. Adotou-se um limite de mais ou menos 5° para a detecção da FAI, i.e., o limite 175° – 185° para a detecção. Tal limite foi utilizado para a falta no primeiro trecho da rede (fase C) e com um único grupo de sensores, logo após o alimentador.

Figura 11 ►

Diagrama de blocos do algoritmo.
 Fonte: elaborado pelos autores

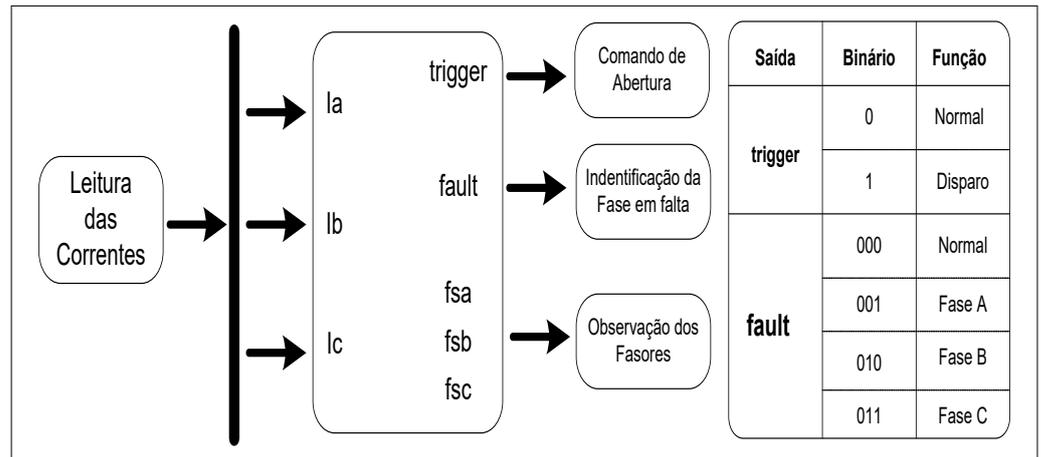
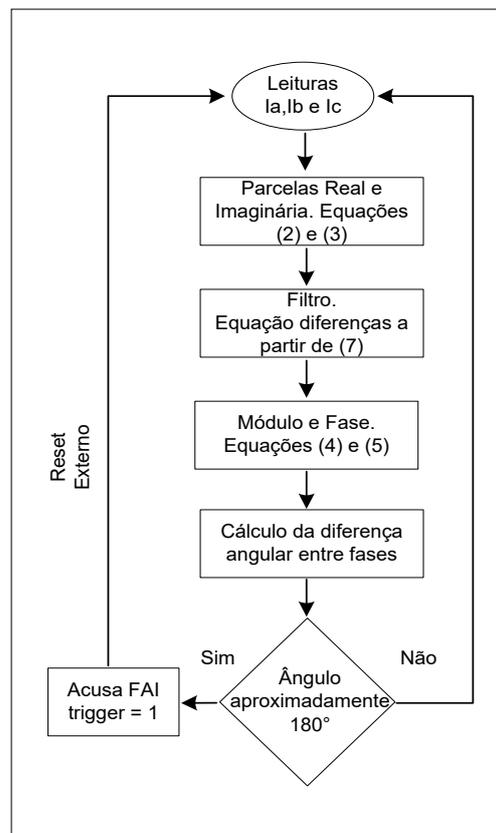


Figura 12 ►

Fluxograma simplificado do algoritmo.
 Fonte: elaborado pelos autores



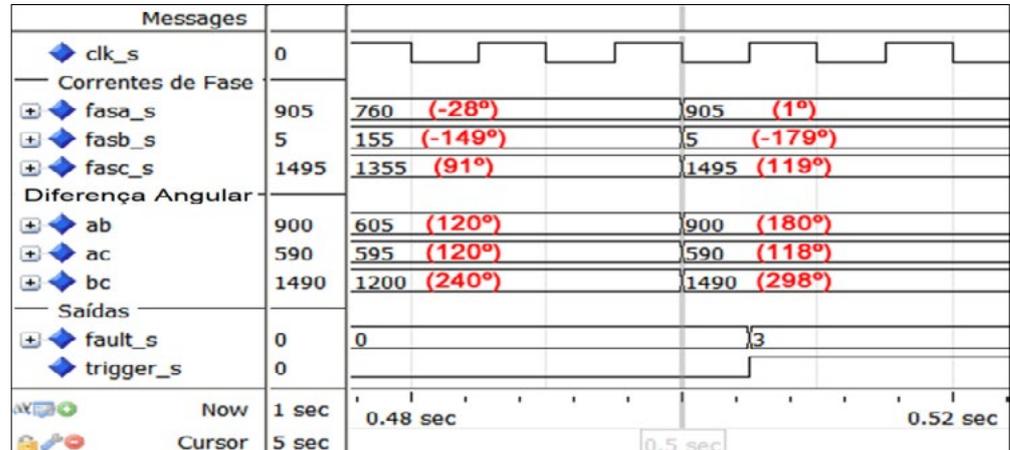
4.3 Testbench do algoritmo de detecção de FAI

Depois de desenvolvido e compilado o algoritmo, foi realizada a análise funcional, ou *testbench*, do projeto para verificar se as saídas se enquadravam com o resultado esperado. Esse processo, realizado no ModelSim®, consistiu na leitura das correntes trifásicas, no cálculo dos fasores e na análise da diferença de ângulos entre as fases. No início da simulação, no intervalo de tempo entre 0 s e 0,5 s, os valores de corrente em regime permanente são lidos e processados pelo código VHDL; na sequência (após 0,5 s), os valores são alterados devido à FAI, i.e., a diferença angular *ab* altera-se de 120° para 180°. Na Figura 13 (página seguinte), é apresentada a detecção da falta pelo algoritmo, representado pelo diagrama da Figura 12, em VHDL. O sinal de falta é

verificado pelo sinal do barramento de 3 bits (*fault_s*: 011 – 3), indicando que, na fase C, houve uma falta de alta impedância.

Figura 13 ▶

Testbench do algoritmo no software Modelsim®.
Fonte: dados da pesquisa

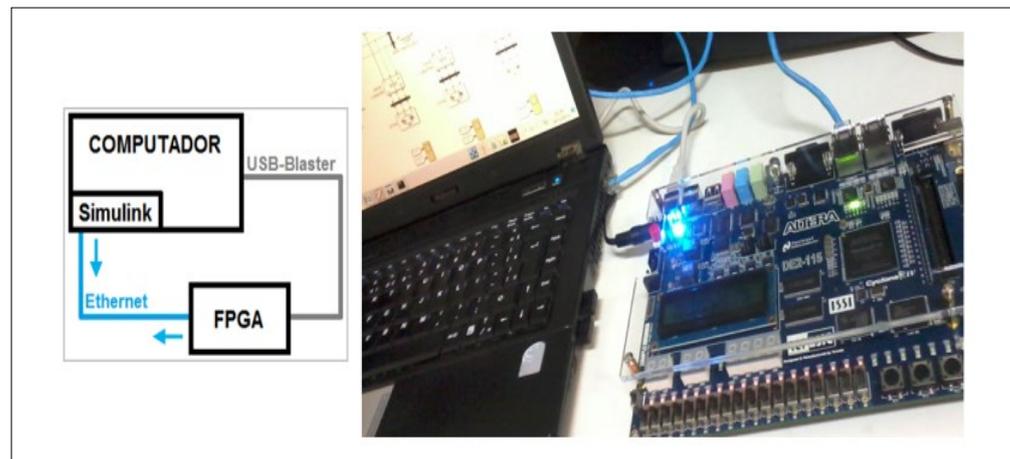


4.4 FPGA *in-the-loop*

A partir dos testes realizados, o algoritmo passa para a fase de prototipagem no dispositivo FPGA, utilizando o recurso FPGA *in-the-loop* (FIL) do Simulink®. Essa ferramenta faz o processo de síntese, mapeamento/roteamento de portas e conversão do projeto em VHDL para embarcar na placa física do FPGA. A integração entre o Simulink® e o FPGA é apresentada na Figura 14. Tal integração permite a comunicação em tempo real e possibilita a análise do projeto via processamento em um dispositivo de lógica programável.

Figura 14 ▶

FPGA in-the-Loop: associação do Simulink® ao FPGA.
Fonte: elaborado pelos autores

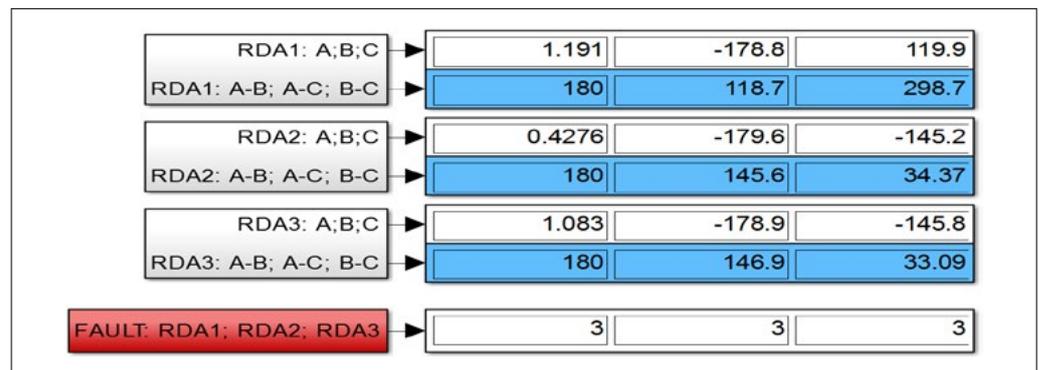


A comunicação entre o dispositivo FPGA e o computador é feita através das conexões USB Blaster e via rede Ethernet, em que a primeira é para a prototipagem do algoritmo no FPGA e a segunda é para o envio e o recebimento de informações em tempo real. Adotou-se para o FPGA – Cyclone IV EP4CE115 da Altera – o *clock* de 8 MHz via divisor de frequência. Esse dispositivo pode operar normalmente em até 50 MHz. A escolha da frequência de 8 MHz foi em função da limitação da conexão via Ethernet da placa de desenvolvimento.

4.5 Resultados de cossimulação

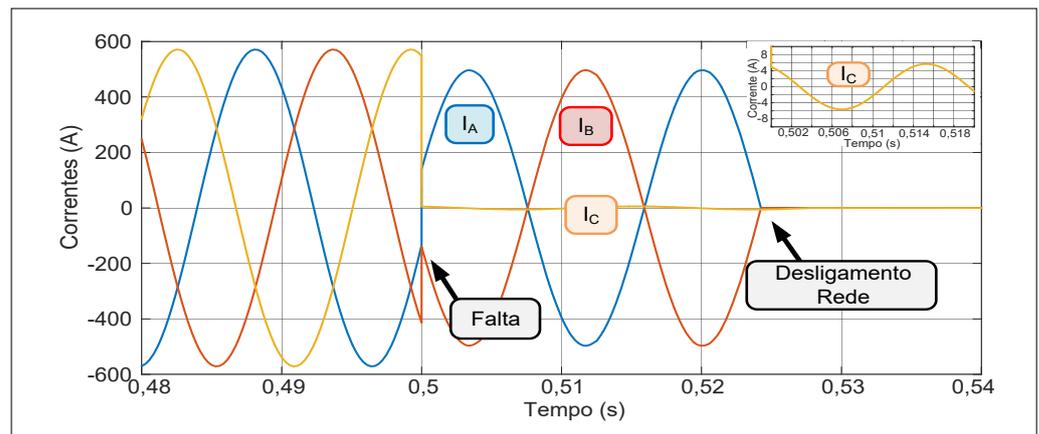
Seguindo o mesmo procedimento, foi simulado um rompimento do condutor primário, fase C (em $t = 0,5s$), em que a falta ocorre antes das três cargas do sistema, conforme a rede de distribuição primária da Figura 8. Os resultados obtidos através da técnica FIL, também conhecida como cossimulação (algoritmo embarcado no FPGA), podem ser observados na Figura 15, a qual informa os valores dos ângulos das correntes, a diferença angular duas a duas (destacado em azul) e a identificação da localização da falta de alta impedância (qual fase foi rompida, em vermelho – *fault*). Nesse caso, a falta foi detectada na fase C.

Figura 15 ►
Resultado da cossimulação (FIL) com o código embarcado no FPGA.
Fonte: elaborado pelos autores



Analisando os resultados indicados na Figura 16, pode-se notar o defasamento angular de 180° entre as fases remanescentes à faltosa, isto é, entre as fases A e B, a qual indica que a falta foi na fase C (*fault*: 3). Logo, o algoritmo identifica a FAI e atua na proteção para interromper o fornecimento de corrente elétrica para toda a rede, conforme ilustra a Figura 16 (antes de $0,53$ s toda a rede é desenergizada), demonstrando a viabilidade da solução embarcada no FPGA.

Figura 16 ►
Atuação da proteção pelo algoritmo de detecção de FAI.
Fonte: dados da pesquisa



Diferentes valores de impedâncias de falta foram testados, tais como: 200Ω , $1 \text{ k}\Omega$, $2 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ e $20 \text{ k}\Omega$, e a falta foi aplicada nas fases A, B e C. O tempo de detecção obtido foi praticamente o mesmo, já que o algoritmo não leva em consideração o valor da corrente de falta, e sim o defasamento angular, isto para faltas na saída do alimentador. O sistema de detecção de FAI se mostra eficiente

para detecção de FAI na saída do alimentador, independentemente da carga e da impedância de falta.

A entrada e a saída de cargas não afetam a detecção de FAI pelo algoritmo. Para realizar esse teste, uma carga de 250 kVA (200 kW em paralelo com 150 kVAR indutivo) foi inserida, no instante 0,2 s na face C, removendo-se esta em 0,4 s. As Figuras 17 e 18 ilustram as correntes no alimentador juntamente com a diferença de fase entre as correntes das fases A e B. Como não existe variação de fase, essa entrada e essa saída de carga não são consideradas como falta.

Figura 17 ▼

Correntes no alimentador com a entrada e a saída de carga na fase C.

Fonte: dados da pesquisa

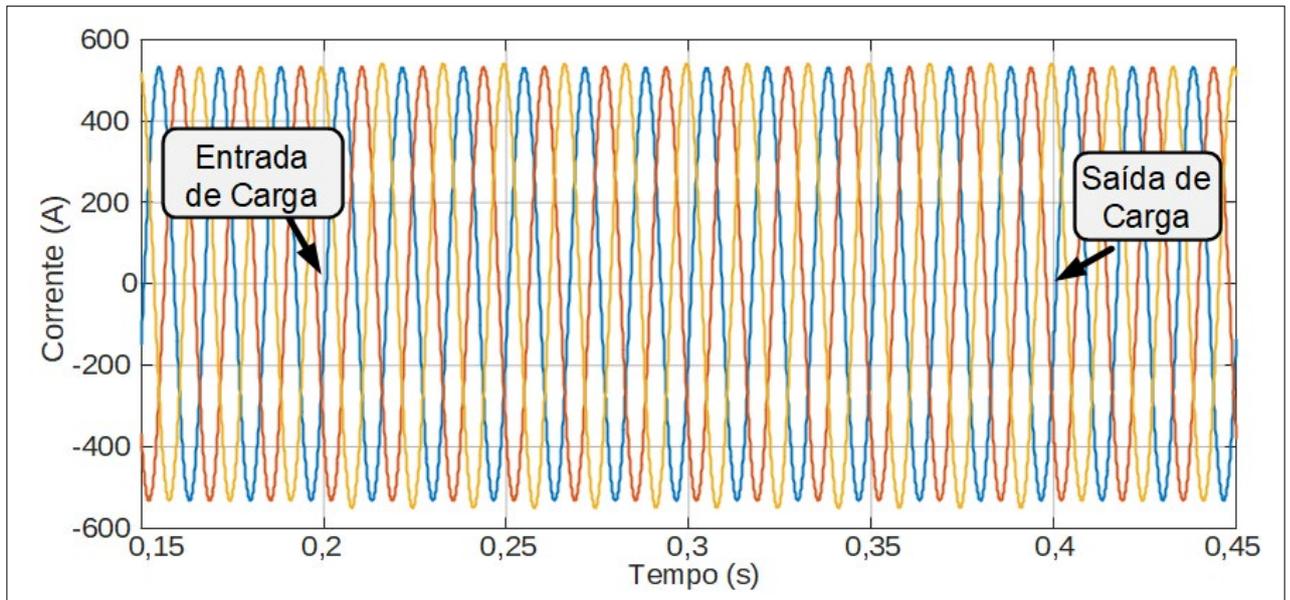
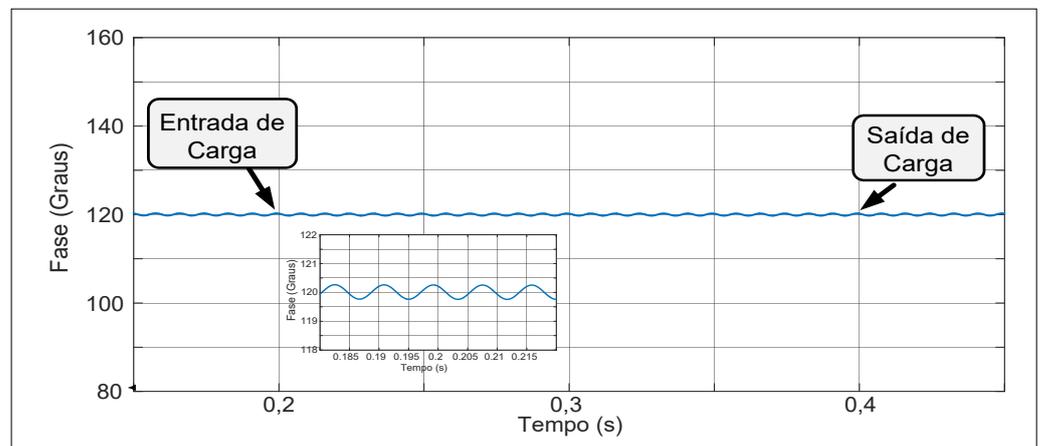


Figura 18 ►

Diferença de fase com a entrada e a saída de carga na fase C.

Fonte: dados da pesquisa



Para analisar as faltas em outras fases e mais distantes do alimentador, mas considerando ainda apenas um grupo de sensores próximo à saída do alimentador principal, recorre-se ao uso adicional das transformadas de Clark e Park (AFONSO; FREITAS; MARTINS, 2003), obtendo-se, a partir das correntes trifásicas do alimentador, a corrente de sequência zero. Em casos de falta longe do alimentador, a corrente de sequência zero se torna útil para auxílio nessa detecção, juntamente com o algoritmo de cálculo de fase, previamente apresentado.

Para esses testes, o sistema de distribuição da Figura 8 foi modificado de forma a conter um desequilíbrio de cargas antes da ocorrência da falta. Uma carga

Figura 19 ▼

Configuração para simular uma rede de distribuição com cargas desequilibradas.

Fonte: elaborado pelos autores

de 707 kVA (500 kW em paralelo a 500 kVAr indutivo) foi conectada entre as fases A e C e uma carga de 1,045 MVA (1 MW, 200 kVAr indutivo e 500 kVAr capacitivo em paralelo) foi inserida na fase A. A falta foi aplicada no trecho de rede RDA2, na fase B, conforme Figura 19, pela abertura da chave S0 e pelo fechamento da chave S1, chaves estas destacadas em alaranjado.

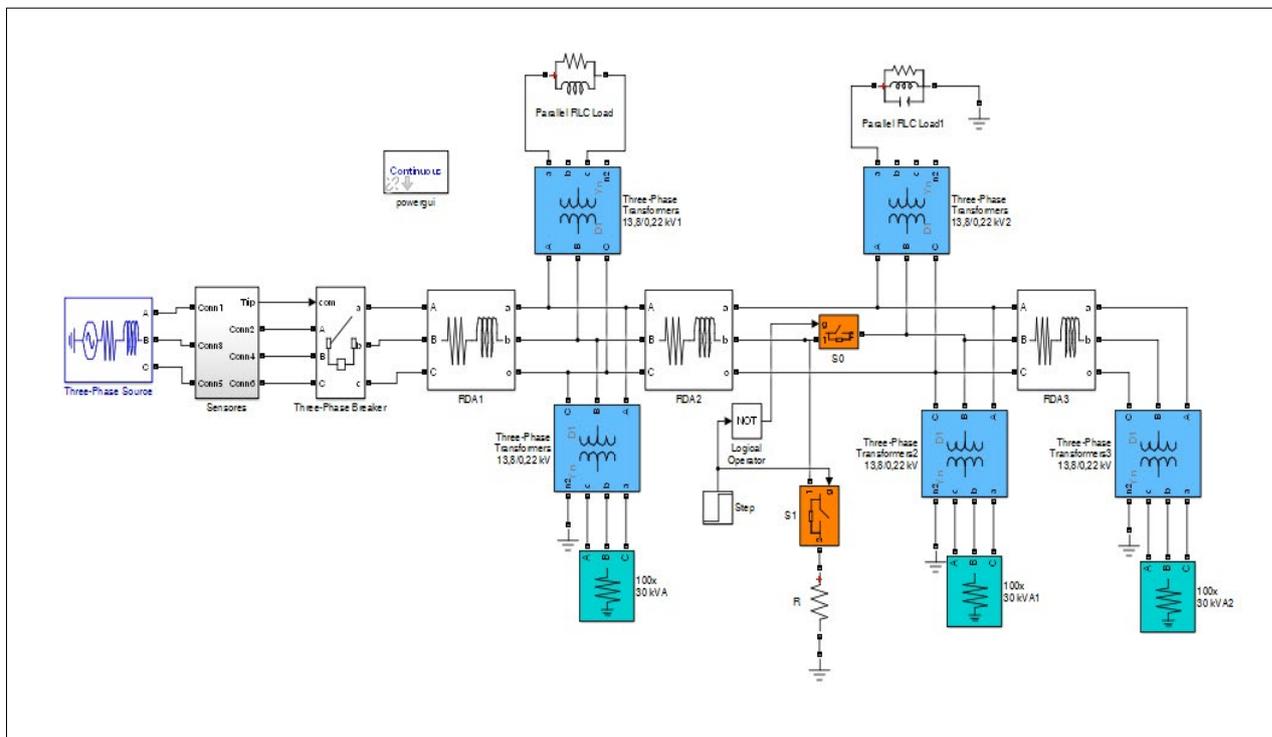


Figura 20 ▼

Configuração para simular uma rede de distribuição com cargas desequilibradas.

Fonte: dados da pesquisa

As formas de onda de corrente da rede, antes da aplicação da falta, indicam o desequilíbrio nas amplitudes e nas fases das correntes. Em $t = 0,3s$, a falta foi aplicada na Fase B, e observa-se que a FAI aumenta o desequilíbrio na rede. As correntes na saída do alimentador são apresentadas na Figura 20, e a fase entre as correntes A e C é apresentada na Figura 21.

O gráfico do valor eficaz da corrente de sequência zero, antes e após a aplicação da FAI, para valores de resistências de falta de 1 kΩ, 2 kΩ e 20 kΩ, é apresentado na Figura 22 (página seguinte).

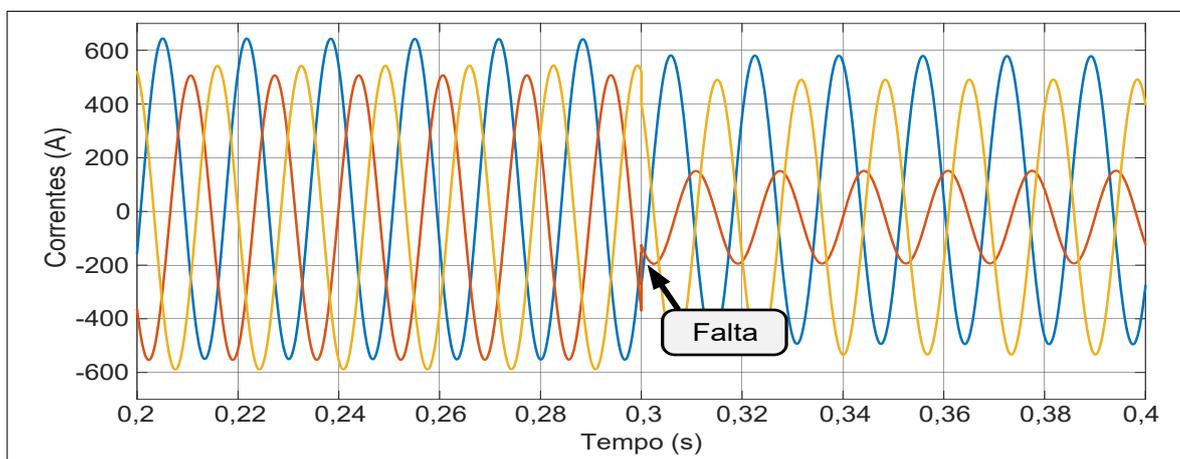


Figura 21 ▼

Fase entre as correntes das Fases A e C na rede de distribuição com cargas desequilibradas, antes e após a FAI.

Fonte: dados da pesquisa

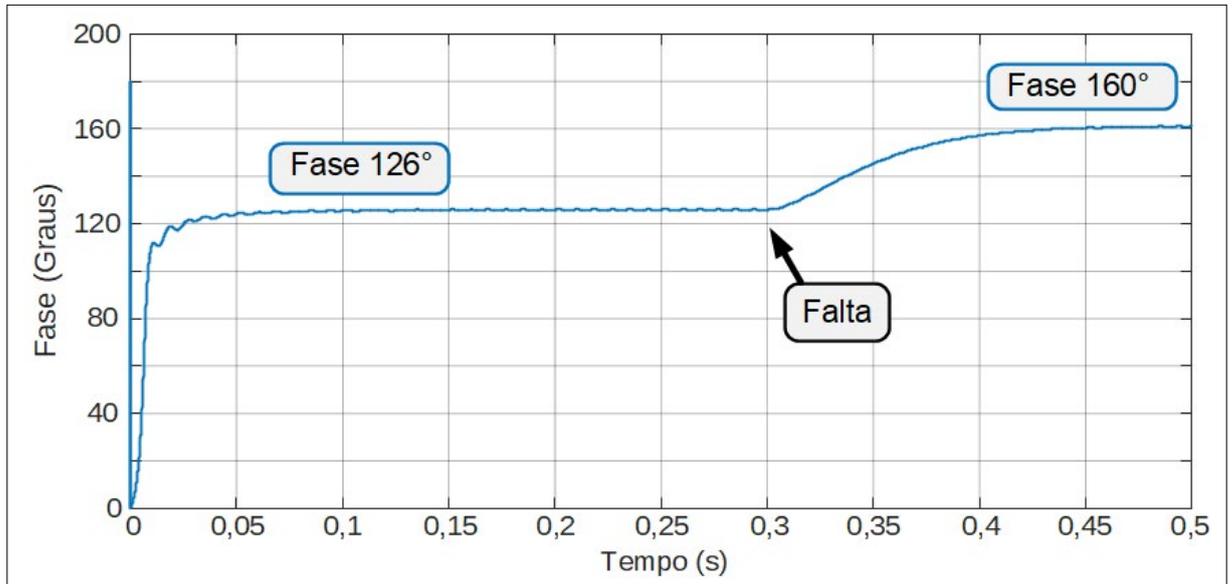
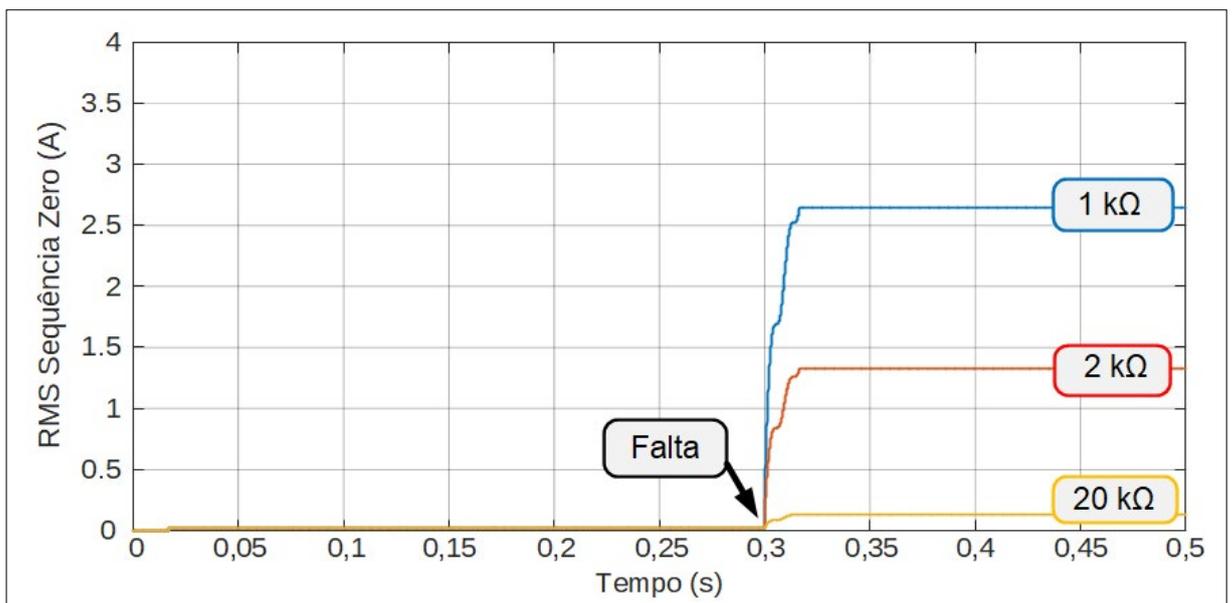


Figura 22 ▼

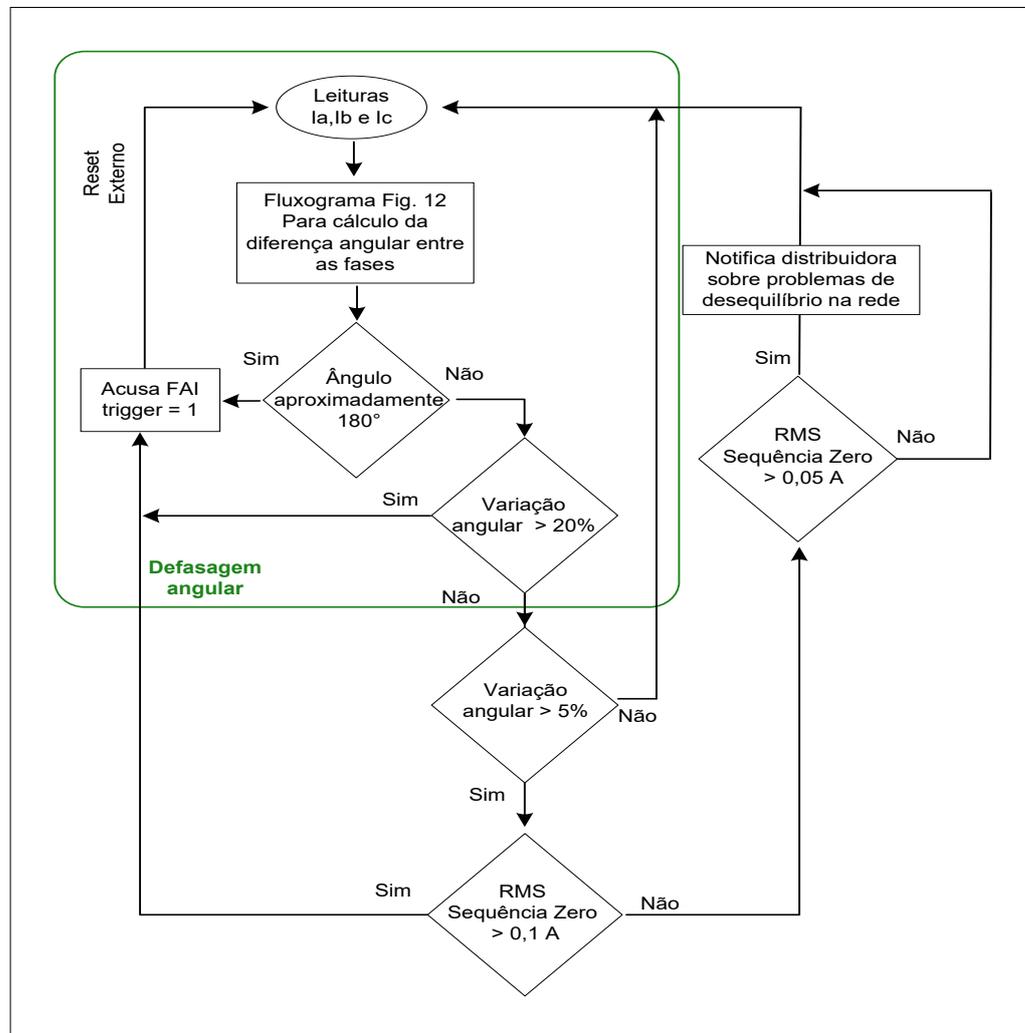
Valor eficaz da componente de seqüência zero das correntes do alimentador, antes e após a ocorrência da FAI

Fonte: dados da pesquisa



Com base nesses resultados, é possível estabelecer novas regras para o algoritmo em questão, adotando-se novos valores para a variação de fase e de valor eficaz da componente de sequência zero. O algoritmo, então, passa a ter as especificações apresentadas na Figura 23, i.e, o sistema admite variação de mais ou menos 5% de desequilíbrio e detecta FAI para resistências de falta de até 80 kΩ, o que atende de forma suficiente a Tabela 1.

Figura 23 ►
Fluxograma atualizado do algoritmo.
Fonte: elaborado pelos autores



No Quadro 1, mostra-se a assertividade do método apresentado, ou seja, a detecção e a atuação no sistema de proteção, considerando a aplicação de FAIs nos trechos RDA1, RDA2 e RDA3. Considerando o nível de desequilíbrio de fase permitido em até 20%, a técnica apresentada não detecta FAI no trecho da rede RDA3, isso quando se considera apenas a defasagem angular (parte destacada em verde no fluxograma), mas detecta FAI em qualquer ponto da rede, fases A, B e C, nos trechos RDA1 e RDA2.

Quadro 1 ►
Assertividade do método.
Fonte: dados da pesquisa

	Trecho					
	RDA1		RDA2		RDA3	
Detecta falta nas fases (A, B e C)	A	S	A	S	A	N
	B	S	B	S	B	N
	C	S	C	S	C	N

Inserindo o cálculo do valor eficaz da componente de sequência zero quando a variação de fase é maior do que 5% e adotando-se um valor acima de 0,1 A como falta, apresenta-se a assertividade por meio do Quadro 2 (S – detecta FAI; N – não detecta FAI). Agora, com o algoritmo completo, a FAI é detectada em todo o trecho da rede de distribuição em análise. Quando a corrente de sequência zero tem valor entre $0,05 A_{RMS}$ e $0,1 A_{RMS}$, o sistema emite um alerta para a concessionária verificar possível problema de desequilíbrio em sua rede. Para valores abaixo de $0,05 A_{RMS}$, o sistema não aponta FAI, como medida de se evitar falsos desligamentos por erros de medição e/ou ruídos nas aquisições das correntes de fase.

Quadro 2 ▶
Assertividade do método.
Fonte: dados da pesquisa

	Trecho					
	RDA1		RDA2		RDA3	
Detecta falta nas fases (A, B e C)	A	S	A	S	A	S
	B	S	B	S	B	S
	C	S	C	S	C	S

A combinação entre a análise fasorial e o valor RMS da componente de sequência zero permite diversas configurações, e essa análise deve ser feita para os alimentadores de cada empresa de distribuição de energia. Inserindo-se o valor da componente de sequência zero, o sistema pode ser ainda mais restritivo com relação ao defasamento angular permitido, i.e., 4% ou 3%. Assim, o sistema pode iniciar o cálculo da componente de sequência zero quando esse limite for ultrapassado.

5 Conclusões

A partir do estudo realizado, é evidente que a falta de alta impedância é um problema que gera grande preocupação para a sociedade e para as concessionárias de energia elétrica, devido aos riscos que ela impõe. As proteções do sistema de distribuição atuam apenas para sobrecorrentes, impossibilitando a identificação de condutores rompidos em contato com o solo, visto que as correntes de falta possuem magnitudes, muitas vezes, extremamente reduzidas, as quais podem não sensibilizar esses dispositivos.

Neste artigo, o método de identificação pelo monitoramento dos ângulos dos fasores de corrente foi utilizado. Por meio dele, é possível observar defasamentos angulares não usuais entre as fases remanescentes ao condutor rompido, além do uso da transformada discreta de Fourier para a obtenção do módulo e da fase desses fasores com a inserção do valor eficaz da componente de sequência zero para o aumento de assertividade.

Observa-se que os níveis para a atuação (i.e., *thresholds*) perante as FAIs devem ser obtidos pela análise do alimentador de cada empresa de distribuição, verificando, assim, os níveis esperados de defasagem angular naturais ao sistema que não indicam falta e, também, do valor eficaz da componente de sequência zero.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da inserção dessa técnica de detecção das FAIs em FPGA. Nesse contexto, o uso do dispositivo FPGA integrado às modelagens no MatLab/Simulink® possibilita vasta criação de funções lógicas e análise eficiente feita por um hardware dedicado, além de ser um possível dispositivo de proteção a ser implantado em um sistema de distribuição. Utilizar FPGA nesse tipo de aplicação é atrativo, pois é possível analisar, paralelamente, o comportamento das correntes. Além

disso, esse uso possibilita a inserção de protocolos de comunicação; trata-se de uma tecnologia emergente no cenário de distribuição de energia.

Os desafios tecnológicos para tornar a solução viável industrialmente estão em produzir um sensor de baixo custo autorrealimentável que possa ser conectado na rede elétrica e confeccionar um hardware que seja facilmente incorporado (*plug and play*) ao sistema de proteção existente.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

AFONSO, J.; FREITAS, M.; MARTINS, J. p-q theory power components calculations. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2003, Rio de Janeiro. **Proceedings** [...]. Rio de Janeiro: IEEE, 2003. v. 1, p. 385-390. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2003.1267279>.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PRODIST**: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Revisão 10. Brasília, DF: ANEEL, 2017. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em: 15 maio 2021.

BRITO, M.; SAMPAIO, L.; MELO, G.; CANESIN, C. A. Three-phase tri-state buck–boost integrated inverter for solar applications. **IET Renewable Power Generation**, v. 9, n. 6, p. 557-565, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0072>.

CHAKRABORTY, S.; DAS, S. Application of smart meters in high impedance fault detection on distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 3, p. 3465-3473, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2828414>.

CHOLLOT, Y.; MECREANT, J.; LEBLOND, D.; CUMUNEL, P. New solution of fault directional detection for MV fault passage indicators. **IET CIRED – Open Access Proceedings Journal**, v. 2017, n. 1, p. 1326-1329, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0382>.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

ENERGISA. **Norma de Distribuição Unificada NDU-006**: critérios básicos para elaboração de projetos de redes de distribuição em aéreas urbanas. Revisão 5.0, errata 11/04/2022. João Pessoa: Energisa, 2022. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%3%a9cnicas/NDU%20006%20-%20Crit%3%a9rios%20B%3%a1sicos%20para%20Elabora%3%a7%3%a3o%20de%20Projetos%20de%20>

[Redes%20de%20Distribui%3%a7%3%a3o%20A%3%a9reas%20Urbanas%20V5.pdf](#). Acesso em: 8 nov. 2022.

ERSOY, O. K. A comparative review of real and complex Fourier-related transforms. **Proceedings of the IEEE**, v. 82, n. 3, p. 429-447, Mar. 1994. DOI: <https://doi.org/10.1109/5.272147>.

FARIAS, P. E.; MORAIS, A. P.; CARDOSO JUNIOR, G.; ROSSINI, J. P. Fault location in distribution systems: a method considering the parameter estimation using a RNA online. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 12, p. 4741-4749, Dec. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7817005>.

GERA, A. E. The relationship between the Z-transform and the discrete-time Fourier transform. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 44, n. 2, p. 370-371, Feb. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/9.746268>.

GONZALES, C.; TANT, J.; GERMAIN, J. G.; RYBEL, T.; DRIESEN, J. Directional, high-impedance fault detection in isolated neutral distribution grids. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 33, n. 5, p. 2474-2483, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2808428>.

GUO, H.; SITTON, G. A.; BURRUS, C. S. The quick Fourier transform: an FFT based on symmetries. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 46, n. 2, p. 335-341, Feb. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1109/78.655419>.

HAGHIFAM, M. R.; SEDIGHI A. R.; MALIK, O. P. Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection. **IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution**, v. 153, n. 3, p. 359-367, May 2006. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20045224>.

LAAKSONEN, H.; HOVILA, P. Method for high-impedance fault detection. **IET CIRED – Open Access Proceedings Journal**, v. 2017, n. 1, p. 1295-1299, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0308>.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

MICHALIK, M.; REBIZANT, W.; LUKOWICZ, M.; LEE, S.-J.; KANG, S.-H. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 4, p. 1793-1802, Oct. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874581>.

MILIOUDIS, A. N.; ANDREOU, G. T.; LABRIDIS, D. P. Enhanced protection scheme for smart grids using power line communications techniques – Part I: detection of high impedance fault occurrence. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 4, p. 1621-1630, Oct. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2208987>.

MYINT, S.; WICHAKOOL, W.; SANTIPRAPAN, P. A simple high impedance detection method based on phase displacement and zero sequence current for grounded distribution systems. *In: IEEE PES-ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE (APPEEC)*, 2018, Kota Kinabalu. **Proceedings** [...]. Kota Kinabalu: IEEE, 2018. p. 118-122. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2018.8566323>.

OGATA, K. **Discrete time control systems**. 3. ed. Londres: Pearson, 2001.

OLIVEIRA, C. C. B.; SCHMIDT, H. P.; KAGAN, N.; ROBBA, E. J. **Introdução a sistemas elétricos de potência: componentes simétricas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2000.

PENTEADO NETO, R. A. **Sistemas para detecção de falta de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3128>. Acesso em: 15 maio 2021.

UNSLAM, C.; FAR, B. **Digital system design with FPGA: implementation using Verilog and VHDL**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2017.

ZAMANAN, N.; SYKULSI, J. The evolution of high impedance fault modeling. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP)*, 16., 2014, Bucharest. **Proceedings** [...]. Bucharest: IEEE, 2014. p. 77-81. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2014.6842852>.

ZHANG, Z.; ZHOU, X.; WANG, X.; WU, T. Research on high-impedance fault diagnosis and location method for mesh topology constant current remote power supply system in cabled underwater information networks. **IEEE Access**, v. 7, p. 88609-88621, July 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926220>.