

Harmonic Analysis of High-Impedance Fault Experimental Current Waveforms Using Fast Fourier Transform

Ádrea Lima de Sousa*, João Paulo Abreu Vieira*, Murillo Augusto de Melo Cordeiro*, André Pinto Leão*, Juan Carlos Huaquisaca Paye*, Adriano Peres de Moraes**, Ghendy Cardoso Junior**, Marcelo Costa Santos***

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Pará, Brasil (Tel: 55-91-98452-8288; e-mail: adrealsousa@gmail.com, jpavieira@ufpa.br, murilloaugustocordeiro@gmail.com, leaop2017@gmail.com, juancarloshuaquisaca@gmail.com)

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil (Tel: 55-55-99714-0050; e-mail: adriano@ctism.ufsm.br, ghendy@ufsm.br)

***Gerência de Centro Operações, Executivo de Operação, Equatorial Energia, Belém, Brasil (Tel: 55-91-988714487; e-mail: marcelo.costa@equatorialenergia.com.br)

Abstract: High impedance faults (HIFs) detection in overhead distribution networks have been a major challenge for utility engineers for a long time. The current flowing to ground path is so low that conventional protection does not detect HIFs. The problem becomes more critical when HIFs occur in rural feeders with many single-wire earth return networks, since the neutral protection is usually set above the normal unbalance current of the circuit to avoid its undue actuation, limiting the sensitivity of this protection for single phase-to-ground faults. Methods based on harmonic content analysis for HIF detection stand out for their simplicity, practicality, and ease of implementation. However, so that such methods do not present reliability issues, the harmonic indices thresholds need to be well adjusted, reconciling dependability and security of the HIF detection function. This paper presents a study of the harmonic components presents in the HIF current waveforms, obtained through experimental tests in a 13,8 kV distribution network, using Fast Fourier Transform. The study analyzed the harmonic components of the current waveforms recorded on a SEL-751 relay in 74 FAI events.

Resumo: A detecção de faltas de alta impedância (FAI) em redes aéreas de distribuição têm sido um desafio enorme há muito tempo para engenheiros de distribuidoras. A corrente que percorre o caminho pela terra é tão baixa que a proteção convencional não detecta eventos de FAI. O problema se torna mais crítico quando eventos de FAI ocorrem em alimentadores rurais com grande quantidade de ramais monofásicos com retorno pela terra, pois a proteção de neutro geralmente está ajustada acima da corrente de desequilíbrio normal do circuito para evitar atuações indevidas, limitando a sensibilidade dessa proteção para eventos de curto-circuito fase-terra. Métodos baseados em análise do conteúdo harmônico para detecção de eventos de FAI se destacam pela simplicidade, praticidade e facilidade de implementação. Contudo, para que tais métodos não apresentem problemas de confiabilidade, os limiares dos índices harmônicos precisam ser bem ajustados, conciliando disponibilidade e segurança da função detecção de FAI. Este artigo apresenta um estudo das componentes harmônicas presentes nas formas de onda de correntes de FAI, geradas experimentalmente em uma rede de distribuição de 13,8 kV, usando a Transformada Rápida de Fourier (do inglês: Fast Fourier Transform - FFT). O estudo analisou as componentes harmônicas das formas de onda de corrente registradas em um relé SEL-751 em 74 eventos de FAI.

Keywords: High impedance faults; HIF experimental tests; HIF detection; Overhead distribution networks; Harmonic analysis; Fast Fourier Transform.

Palavras-chaves: Faltas de alta impedância; Testes experimentais de FAI; Detecção de FAI; Redes aéreas de distribuição; Análise harmônica; Transformada Rápida de Fourier.

1. INTRODUÇÃO

As faltas de alta impedância são um grande desafio para engenheiros de proteção de sistemas de distribuição em

decorrência da sua complexidade e aleatoriedade. Uma FAI ocorre quando um condutor entra em contato com objetos que limitam a corrente de falta a níveis não detectáveis pelo sistema de proteção convencional (Stewart, 1979; Hou, 2007;

Tengdin et al. 1996). Como consequência, por não ser sanada rapidamente, a FAI promove potencial risco à vida e patrimônios (Naka, Siqueira, 1992).

No Brasil, algumas características do sistema de distribuição favorecem a ocorrência deste tipo de defeito, como: rede radial, altamente ramificada, rede aérea convencional, rede uniterrada na subestação, grande abrangência de área e a presença de cargas monofásicas (Mamede, Mamede, 2013; Silva, 1992; Roberts et al. 2001; Oliveira, 2006).

Entre as técnicas de detecção desenvolvidas na literatura, há aquelas que utilizam a composição harmônica de baixa frequência da corrente de falta, conforme visto em Kim e Russell (1998), Aucoin e Russell (1987), Torres et al. (2014), Soheili et al. (2016), Lima (2016) e Wontroba (2020). Contudo, para determinar a viabilidade do uso de um detector na qual monitora o espectro harmônico, é necessário familiarizar-se com o comportamento deste em correntes de FAI em diferentes configurações e superfícies (Aucoin e Russell, 1987).

Kim e Russell (1988) realizaram um estudo estatístico de FAI com arco em solo úmido e seco, em dois locais diferentes. Os autores sugerem o aumento relativo da amplitude dos harmônicos pares e o incremento relativo do 8º harmônico como bons candidatos para discriminar uma condição de FAI com arco do estado normal. O trabalho abrange até o 20º harmônico, entretanto não foi avaliado o efeito do tamanho e localização do banco de capacitores inserido nos testes.

Russell et al. (1988) examinam o comportamento de harmônicos e inter-harmônicos em correntes de eventos de FAI e de operações de chaveamento comuns em redes de média tensão. Os autores concluíram que os inter-harmônicos podem distinguir as FAIs de chaveamento de banco de capacitores, e as frequências harmônicas indicam aumento confiável na magnitude durante as condições FAI, porém não são imunes a operações de comutação e banco de capacitores. A contribuição original deste trabalho é comparar as FAIs com eventos comuns que produzem distorção na forma de onda da corrente. Apesar de avaliar uma grande quantidade de testes, estes foram realizados apenas em solo seco, úmido e arenoso.

Emanuel et al. (1990) apresentam análise de conteúdo harmônico gerado por FAI em solo arenoso. Para o alimentador em estudo, monitorar a corrente de fase ao invés da corrente de neutro é mais apropriado quando é usada a corrente de 3º harmônico para detectar o arco. O uso do 2º harmônico na detecção permite a melhor identificação de arcos de menor amplitude quando comparado ao 3º harmônico. O trabalho se destaca por ter clientes residenciais primários conectados ao alimentador submetido aos testes, todavia estes foram realizados em apenas um tipo de superfície.

Kawady et al. (2009) verificam as propriedades harmônicas de diferentes casos de FAI com arco em uma rede de baixa tensão. Os testes de FAI são ensaiados com cargas estáticas e dinâmicas conectadas à rede, e com o condutor em contato com as superfícies também pelo lado da carga. Os resultados destacaram que as correntes fortemente distorcidas nessas redes devido à grande quantidade de cargas que utilizam

equipamentos eletrônicos de potência podem representar um verdadeiro obstáculo na detecção. Em contrapartida, não implementaram testes com o condutor intacto.

O propósito deste trabalho é avaliar a magnitude dos harmônicos presentes nas correntes de FAI ensaiadas em laboratório, calculadas por meio da FFT, e comparar com os níveis de harmônicos abordados na literatura de detecção de FAI. Foram analisadas 74 oscilografias de FAI do tipo shunt e shunt-série com rompimento de cabo pelo lado da fonte. As superfícies de contato usadas nos testes shunt-série foram areia branca molhada, grama molhada, areia branca seca, concreto seco, concreto de lama vermelha seco, todos esses sobre terra local, e terra local seca. Para os testes shunt, foram utilizados galhos de bambu, castanhola, ipê roxo e mangueira. Os resultados obtidos ajudam a perceber melhor as propriedades destas falhas e a supervisionar os próximos passos para obter um detector de falhas prático, versátil e de baixo custo.

Para atingir este objetivo, o trabalho foi organizado em: seção 2 contém a teoria da falta de alta impedância, seção 3 mostra como os testes foram realizados, seção 4 contém os resultados obtidos da análise e a seção 5 apresenta as conclusões.

2. FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

As FAIs são um tipo de falha muito comum nas redes de distribuição de energia elétrica. Esse distúrbio ocorre quando um condutor da rede de distribuição entra em contato com uma superfície de alta resistência elétrica, como árvores, concreto, grama, terra, areia etc (Stewart, 1979; Iurinic, 2016; Aucoin, Jones, 1996). Segundo Wester (1998), entre 5% e 20% de todas as faltas que acontecem no sistema de distribuição são do tipo alta impedância.

Geralmente, ocorrem em sistemas de distribuição primária com tensões de 4 kV até 34,5 kV, sendo a corrente elétrica de baixa amplitude, variando entre 0 A a 100 A (Hou, 2007; Tengdin et al. 1996). A Tabela 1 mostra os valores típicos de corrente de FAI em diferentes superfícies em um sistema de 12,5 kV.

Tabela 1. Valores típicos de corrente de FAI em diferentes superfícies. Fonte: adaptado de Russell, Chinchali (1989).

Superfícies de contato	Corrente (A)
Asfalto seco	0
Areia seca	0
Concreto (não armado)	0
Areia molhada	15
Grama seca	25
Grama molhada	50
Concreto armado	75

2.1 Características de FAI

Apesar das FAIs ocorrerem de diversas maneiras, possuem características similares no geral. A principal dessas é a presença de arco elétrico, independente de qual superfície está em contato com o condutor energizado (Russell, 1989).

O arco elétrico surge devido ao elevado potencial dos sistemas elétricos de distribuição e o condutor energizado não manter um contato elétrico firme com a superfície, havendo lacunas de ar entre os dois, e lacunas de ar abaixo do solo. A presença do arco elétrico produz características peculiares na forma de onda da corrente de FAI, presentes na Fig. 1, as quais são:

- Não-linearidade: A não-linearidade entre a corrente de FAI e a tensão no ponto da falta ocorre por conta da não-linearidade da resistência do arco elétrico. A corrente é interrompida e iniciada a cada meio ciclo de rede na passagem da corrente por zero, o que provoca interrupção e reignição dessa (Nakagomi, 2006). Tal distorção também varia conforme o tipo de solo e provoca o surgimento de harmônicos de baixa frequência na corrente de falta, com predominância dos harmônicos de ordem ímpar, em particular de 3ª e 5ª ordem (Nakagomi, 2006; Santos, 2016).
- Assimetria: Consiste no semiciclo positivo maior em módulo quando comparado ao semiciclo negativo, em decorrência da diferença de mobilidade dos portadores de carga positivos e negativos. Esta é responsável pelos harmônicos de ordem par (Nakagomi, 2006; Ghaderi et al. 2017);
- Intermitência: É uma descontinuidade momentânea da corrente, provocada pela extinção e reignição do arco por um determinado período, resultando no surgimento de componentes alta frequência (Nakagomi, 2006);
- Buildup: É o período em que há o crescimento da envoltória da corrente em função do tempo (Nakagomi, 2006)
- Shoulder: É o intervalo em que ocorre a estabilização da envoltória da corrente durante o buildup (Nam et al. 2001). Esse, em conjunto com o buildup, promovem inter-harmônicos (Russell, Chinchali, 1989).

Além dessas características, a amplitude da corrente e a intermitência variam aleatoriamente (Parise et al. 1993).

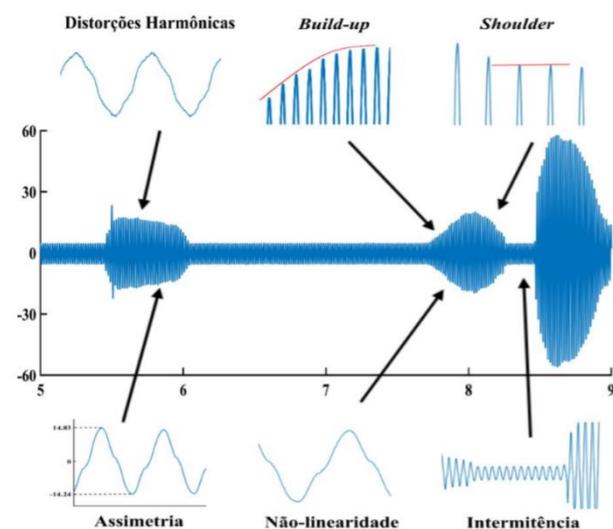


Fig. 1 Características da forma de onda de uma FAI. Fonte: Lima (2016).

2.2 Tipos de FAIs

As FAIs podem ser shunt-série ou shunt (Silva, 1992). A falta shunt-série ocorre quando há o rompimento, queda e contato do condutor primário energizado com superfícies de baixa condutividade, o que pode interromper a corrente de carga (Balsler et al. 1986; Silva, 1992). O rompimento acontece de forma que o condutor tenha contato pelo lado da fonte ou da carga ou em ambos os lados (Iurinic, 2016).

A falta shunt acontece quando há contato do condutor energizado com objetos como galhos de árvore, animais ou construções. Não há o rompimento do cabo e a carga continua sendo suprida, no entanto existe uma impedância que conecta uma ou mais fases à terra ou entre fases sem terra. (Balsler et al. 1986; Iurinic, 2016; Silva, 1992).

2.3 Dificuldades na detecção de FAIs

A corrente drenada por uma FAI tende a ser muito menor que a corrente de uma falta franca, não produzindo aumento substancial na corrente do sistema, e geralmente é da mesma ordem de grandeza da corrente gerada por outros fenômenos na rede, como religamento de cargas e chaveamento de banco de capacitores, o que dificulta os ajustes do sistema de proteção por sobrecorrente (Stewart, 1979; Adamiak et al. 2006).

O sistema de aterramento adotado por grande parte das distribuidoras nas redes de média tensão no Brasil é o aterramento sólido, com o neutro uniaterrado somente na subestação, com ou sem a presença do condutor neutro acompanhando as fases. Caso a rede não possua ramal monofásico com retorno pela terra (MRT), ao ocorrer uma falta fase-terra, apenas a corrente de defeito é conduzida à subestação pela terra, não há correntes residuais de retorno, somente correntes parasitas capacitivas e ruídos (Roberts et al. 2001; Costa, 2012; Sato, Freitas, 2015). Porém, essa dinâmica é modificada com a presença dos MRTs.

Os MRTs podem ser conectados diretamente à rede primária, sem acompanhamento do neutro. São responsáveis por alimentarem cargas monofásicas (fase-terra), como é o caso de áreas rurais (Roberts et al. 2001; Costa, 2012; Sato, Freitas, 2015). A presença desses exige que o pick-up de neutro temporizado seja ajustado para valores na faixa superior aos valores normais (Mamede, Mamede, 2013). Desse modo, existem pontos cegos na proteção, que podem resultar em condições de risco para população e funcionários/prestadores de serviço da concessionária de distribuição (Oliveira, 2006).

Dado que a maioria das FAIs são fase-terra (Russell, 1982), essa falta se torna problemática para o sistema de distribuição. Muitas vezes as distribuidoras tomam conhecimento da ocorrência dessas por meio de informações oriundas de consumidores (Souza, 2017; Lima, 2016).

Ao cair um condutor energizado ao solo, todos os consumidores alimentados por esse serão prejudicados pela falta de energia. Dessa forma, quanto maior o tempo de identificação de FAIs pela concessionária, maior será o tempo

em que os condutores energizados ficam expostos à população e animais. Já em áreas rurais, devido à baixa densidade de consumidores, as FAIs podem permanecer por dias, o que impacta nos índices DEC e FEC (Souza, 2017; Lima, 2016). Assim, ficam claros os motivos de investimentos e preocupação por parte das distribuidoras quanto à ocorrência de FAIs.

2.4 Detecção de FAIs por composição harmônica da corrente

Alguns trabalhos na literatura utilizam o espectro harmônico como gatilho para a detecção de FAIs, o que significa que são definidos limiares para definir o que são eventos de FAI ou não. Nesse tópico serão apresentados níveis de harmônico de trabalhos que serão usados para comparação com os resultados obtidos.

Segundo Liu et al. (2016), a 3ª ordem de harmônico é a mais significativa e é responsável por 5% a 30% da corrente total de FAI, como mostra a Fig. 2. No trabalho de Lima (2016), o espectro harmônico é extraído com a Transformada de Fourier de Tempo Curto (do inglês: Short-Time Fourier Transform - STFT), e é utilizada a amplitude do 2º, 3º e 5º harmônico e a fase do 3º harmônico no algoritmo de detecção. Ainda segundo Lima (2016), a presença de harmônicos pares, principalmente do 2º harmônico, é um indicativo de FAI. Após o 3º harmônico, o 5º harmônico é predominante durante esse fenômeno.

Wontroba (2020) define para o seu algoritmo de detecção que a porcentagem do 3ºh/1ºh deve maior que 3% e a soma dos harmônicos ímpares deve ser maior que a dos pares. A ferramenta usada para obter os resultados foi a FFT. Torres et al. (2014) usa a Transformada Discreta de Fourier (do inglês: Discrete Fourier Transform - DFT) para avaliar se a corrente de 3º harmônico é maior que a soma dos harmônicos pares e menor que a soma dos harmônicos ímpares.

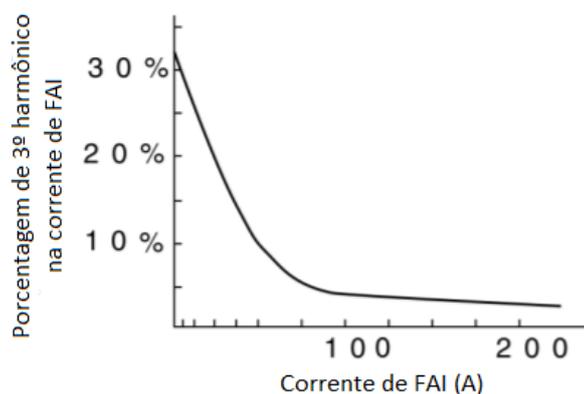


Fig. 2 Relação de terceiro harmônico na corrente de FAI. Fonte: adaptado de Liu et al. (2016).

3. TESTES EXPERIMENTAIS DE FAI

O laboratório para testes experimentais de FAI (LE-FAI) fica localizado no Laboratório de Alta e Extra Alta Tensão (LEAT) da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém-PA, e é financiado pela EQUATORIAL PARÁ através do P&D FAI.

O LE-FAI é composto por um transformador trifásico de 225 kVA - 220 V/13,8 kV, um relé de proteção, uma contatora, botoeiras, disjuntores, elos fusíveis, LEDs sinalizadores, cabos, TPs, TCs, um transformador trifásico de 75 kVA - 13,8 kV/220 V e as diferentes superfícies de contato como objetos de teste. O diagrama trifilar é mostrado na Fig. 3.

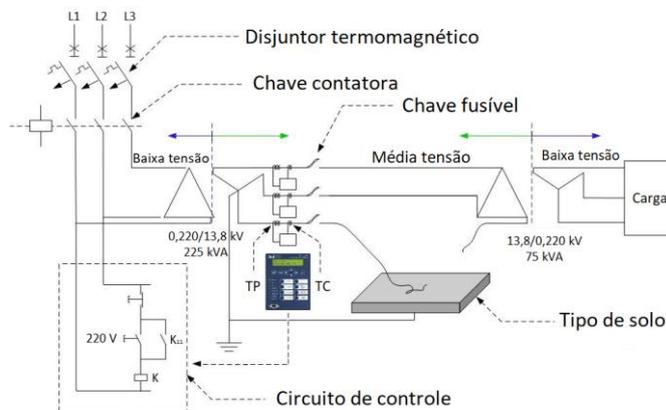


Fig. 3 Diagrama trifilar do LE-FAI. Fonte: Autoria própria.

Foram realizados testes shunt-série e shunt na fase denominada de C, e na Tabela 2 consta a quantidade de cada teste. A terra local usada embaixo de algumas superfícies foi retirada do solo próximo às instalações do LEAT. Mais detalhes de como foram realizados os testes podem ser encontrados em Leão et al. (2020). A Fig. 4 mostra os testes realizados com areia branca molhada e galho de castanhola.

Tabela 2. Casos testados em cada superfície. Fonte: autoria própria.

Superfícies de contato	Quantidade de testes
Bambu	17
Castanhola	18
Ipê roxo	8
Mangueira	6
Concreto seco	4
Concreto de lama vermelha	2
Gramma molhada	1
Areia molhada	6
Areia seca	5
Terra seca	7

4. ANÁLISE HARMÔNICA

A FFT foi aplicada a cada ciclo das correntes de FAI oriundas dos testes, por 10 ciclos. É realizada a média aritmética do resultado dos dez ciclos para se obter o resultado final para cada teste. O método foi aplicado aos ciclos posteriores à energização do transformador, visto que esta inicia juntamente com o teste de FAI. O código foi implementado via software MATLAB e tal método de obter o espectro harmônico foi adotado por simplificar os cálculos, visando uma futura aplicação em algoritmo de detecção de relés digitais.

Transformada Rápida de Fourier é o nome dado a um conjunto de algoritmos que computam a DFT com esforço computacional reduzido. Em comparação com a Transformada Discreta de Wavelet (do inglês: Discrete Wavelet Transform -

DWT), a FFT possui as desvantagens de ter maior complexidade algorítmica e maior tempo de processamento. Somado a isso, a resolução tempo/frequência da DWT possibilita uma série de análises diferenciadas em relação à resolução em frequência da FFT, uma vez que insere a possibilidade de localização temporal juntamente com a localização de frequência (Shirado et al. 2015).

No entanto, a DWT possui uma variada gama de filtros, particularmente desenvolvidos para problemas específicos. Caso não se tenha conhecimento das características do problema em estudo, uma escolha arbitrária da família de filtros pode acarretar em grandes perdas de partes significativas do sinal (Shirado et al. 2015).

Ao comparar a FFT com a STFT, a resolução tempo/frequência desta última ferramenta depende da escolha do tipo e do tamanho da janela selecionada. Caso a janela seja muito estreita, a precisão de frequência é perdida totalmente. As FFTs são mais genéricas uma vez que não tem tal especificidade em cada problema e não há a necessidade de escolha de tipo e tamanho de janela, porém deve ser aplicada a um sinal estacionário com um número inteiro de ciclos (Lima, 2016; Shirado et al. 2015). A generalidade da FFT foi o motivo da escolha dessa ferramenta neste trabalho.



(a) Areia branca molhada (b) Galho de castanhola

Fig. 4 Testes experimentais de FAI. Fonte: Autoria própria.

4.1 Componentes harmônicos de FAI do tipo shunt

Entre os 74 testes avaliados, 49 correspondem a FAIs shunt. As Fig. 5, 6 e 7 apresentam o conteúdo harmônico presente em testes realizados em bambu, ipê roxo e mangueira, respectivamente. A Tabela 3 apresenta a média da porcentagem do 2º, 3º e 5º harmônico em relação à componente fundamental e a média da porcentagem do 3º harmônico em relação à corrente total.

Considerando os valores apresentados na Tabela 3, a presença da 5ª ordem de harmônico é a predominante após a 3ª ordem nos testes com galho de bambu e mangueira. A média da razão 3ºh/1ºh é maior que 3% para todos os galhos testados, contudo 9 dos testes apresentaram tal razão abaixo de 3%. Esse nível é usado no método de detecção de Wontroba (2020). A média da razão do harmônico de 3ª ordem pela corrente total dos testes com galho de bambu está abaixo do intervalo indicado por Liu et al. (2016).

Tabela 3. Média da porcentagem do 2º, 3º e 5º harmônico em relação à componente fundamental e a média da porcentagem do 3º harmônico em relação à corrente total para os testes shunt. Fonte: autoria própria.

Superfícies de contato	2ºh/1ºh (%)	3ºh/1ºh (%)	3ºh/corrente total (%)	5ºh/1ºh (%)
Bambu	1,93	3,84	3,62	2,07
Castanhola	8,28	9,08	6,24	7,99
Ipê roxo	11,92	12,57	9,41	9,39
Mangueira	10,49	12,05	7,97	11,64

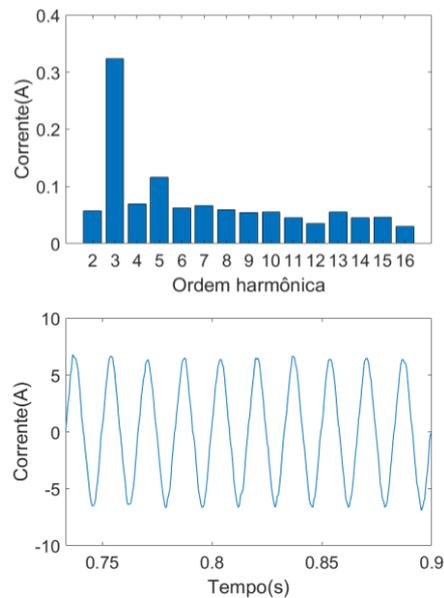


Fig. 5 Conteúdo harmônico e corrente de FAI com galho de bambu. Fonte: Autoria própria.

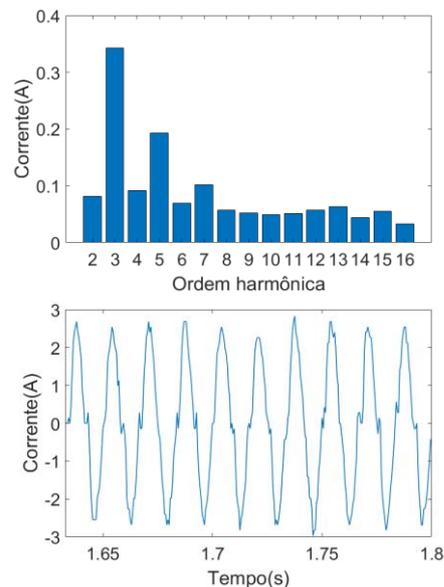


Fig. 6 Conteúdo harmônico e corrente de FAI com galho de ipê roxo. Fonte: Autoria própria.

A razão do harmônico de 3ª ordem pela fundamental ficou entre 0,81% e 5,61% para os testes em galho de bambu, 1,83% e 28,06% para os testes em galho de castanhola, 6,54% e 20,4% para os testes em galho de ipê roxo e 2,9% a 17,15%

para os testes em galho de mangueira. Logo, a corrente no galho de bambu apresenta o nível de 3º harmônico menos expressivo.

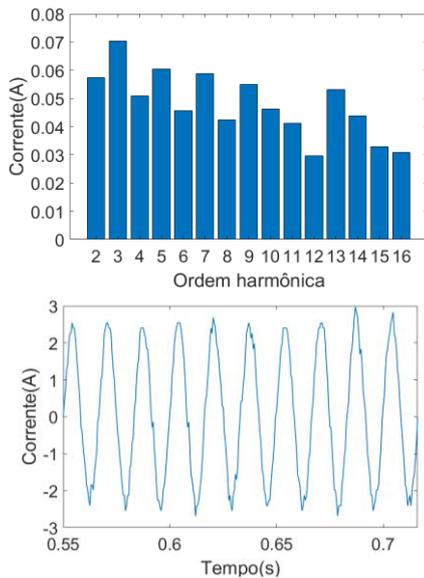


Fig. 7 Conteúdo harmônico e corrente de FAI com galho de mangueira. Fonte: Autoria própria.

4.2 Componentes harmônicos de FAI do tipo shunt-série

Entre os 74 testes avaliados, 25 correspondem a FAIs shunt-série. As Fig. 8, 9 e 10 apresentam o conteúdo harmônico presente em testes realizados em concreto seco, grama molhada e areia branca seca, respectivamente. A Tabela 4 apresenta a média da porcentagem do 2º, 3º e 5º harmônico em relação à componente fundamental e a média da porcentagem do 3º harmônico em relação à corrente total.

Tabela 4. Média da porcentagem do 2º, 3º e 5º harmônico em relação à componente fundamental e a média da porcentagem do 3º harmônico em relação à corrente total para os testes shunt-série. Fonte: autoria própria.

Superfícies de contato	2ºh/1ºh (%)	3ºh/1ºh (%)	3ºh/corrente total (%)	5ºh/1ºh (%)
Concreto seco	5,53	14,22	11,91	8,70
Concreto de lama vermelha seco	7,23	10,47	7,53	7,60
Grama molhada	4,84	25,70	21,17	2,78
Areia branca molhada	44,94	48,08	17,78	24,56
Areia branca seca	3,20	8,19	7,33	3,92
Terra seca	6,15	6,63	4,85	7,15

Considerando a média dos parâmetros apresentados na Tabela 4, a presença da corrente do 5º harmônico é a predominante após a corrente do 3º harmônico nos testes com concreto seco,

concreto de lama vermelha seco e areia branca seca. A média da razão 3ºh/1ºh é maior que 3% para todas as superfícies testadas, no entanto 2 dos testes com terra seca apresentaram tal razão abaixo de 3%. A média da razão do harmônico de 3ª ordem pela corrente total dos testes com terra seca está abaixo da porcentagem indicada por Liu et al. (2016).

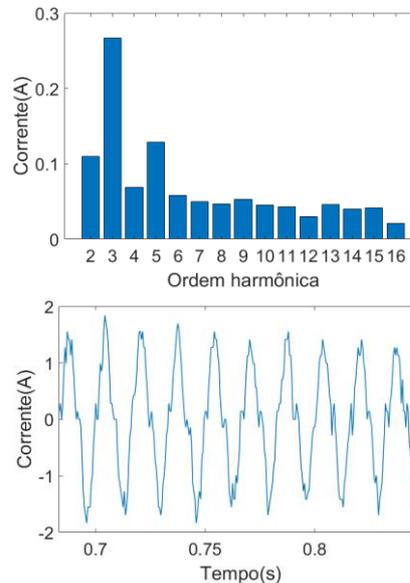


Fig. 8 Conteúdo harmônico e corrente de FAI com concreto seco. Fonte: Autoria própria.

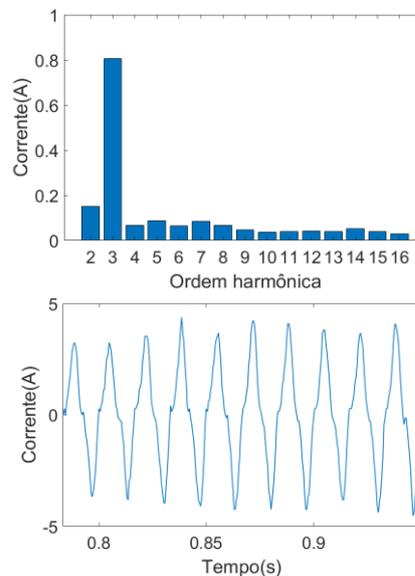


Fig. 9 Conteúdo harmônico e corrente de FAI com grama molhada. Fonte: Autoria própria.

A razão da corrente de 3º harmônico pela fundamental ficou entre 6,45% e 20,58% para os testes em concreto seco, 7,9% e 13,04% para os testes em concreto de lama vermelha seco, 23,11% a 61,86% para os testes em areia branca molhada, 3,26% e 13,62% para os testes em areia branca seca, e 2,4% e 13,5% para os testes em terra seca. O 3º harmônico é mais significativo nas superfícies molhadas. Dessa forma, a corrente na terra seca apresenta o nível de 3º harmônico menos expressivo.

Para ambos os tipos de teste, o que se verifica é uma variação significativa do conteúdo harmônico a depender do tipo de superfície e de sua condição (seca ou molhada). O conteúdo harmônico de 3ª ordem é mais significativo nos testes shunt-série quando comparado aos testes shunt, o que explica a dificuldade de detectar FAIs em galhos de árvore baseando-se apenas nos níveis das correntes harmônicas. No geral, a 3ª ordem de harmônico é uma boa candidata na detecção, dado que na maioria dos testes tal harmônico está acima de 3%. O 2º harmônico tem magnitude maior que o 5º harmônico em 43,2% dos testes.

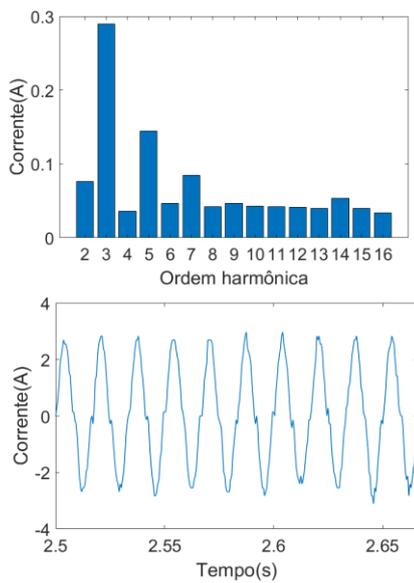


Fig. 10 Conteúdo harmônico e corrente de FAI com areia branca seca. Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 contém a média da soma dos conteúdos harmônicos pares e ímpares. Foram somados os harmônicos ímpares de 3ª a 9ª ordem e pares de 2ª a 8ª ordem. Apenas na superfície areia branca molhada que a média da soma dos harmônicos ímpares não é maior que a média da soma dos harmônicos pares. Esse critério é usado no método de detecção de Wontroba (2020).

Tabela 5. Média da soma dos conteúdos harmônicos pares e ímpares. Fonte: autoria própria.

Superfícies de contato	Somas dos harmônicos pares (A)	Somas dos harmônicos ímpares (A)
Bambu	0,24	0,39
Castanhola	0,23	0,31
Ipê roxo	0,23	0,36
Mangueira	0,23	0,25
Areia branca molhada	1,40	1,17
Areia branca seca	0,22	0,40
Concreto seco	0,22	0,32
Gramma molhada	0,35	1,02
Concreto de lama vermelha seco	0,21	0,27
Terra seca	0,22	0,24

Em 73% dos testes, a soma dos harmônicos pares é menor que a soma dos harmônicos ímpares. Entretanto, em mais de 40% dos testes com galho de castanhola, concreto de lama vermelha, areia branca molhada e terra seca, a soma dos harmônicos pares é maior que a soma dos harmônicos ímpares. Assim, o uso da comparação dessa soma de harmônicos não se mostra muito eficiente em identificar FAIs em todos os tipos de superfície apresentados.

5. CONCLUSÕES

O estudo do conteúdo harmônico presente nas correntes de falta de alta impedância é de extrema importância para se entender o comportamento do fenômeno, tendo em vista que pesquisas recentes na área da detecção utilizam essa como elemento de detecção. Assim, é imprescindível um conhecimento sólido e variado para a definição de limiares que sejam eficazes e detectem todos os tipos de FAI. O método de detecção desenvolvido pela Schwitzer Engineering Laboratory (SEL) utiliza harmônicos de ordem ímpar e inter-harmônicos, frisando a importância desse estudo (Hou, 2007).

A maioria dos testes experimentais realizados possuem valores de harmônicos condizentes com os presentes na literatura. Os que não possuem, não seriam possíveis de serem detectados em algoritmos que se baseiam em harmônicos. Verificou-se que os testes experimentais com galhos de bambu e com terra seca apresentaram os mais baixos níveis de 3º harmônico. Isso impulsiona que sejam realizados mais testes com as superfícies em questão para verificar quais fatores afetam esses valores e com que frequência ocorrem, para que então esses limites sejam ajustados.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi possível devido ao suporte financeiro da CAPES e a parceria com o Grupo Equatorial, através do P&D ANEEL, que possibilitou a montagem da estrutura referida para a realização dos testes. Agradecemos também à TRAEI Ind. e Com. de Transformadores Elétricos do Pará.

REFERÊNCIAS

- Adamiak, M., Wester, C., Thakur, M. and Jensen, C. (2006). High impedance fault detection on distribution feeders. *Protection & Control Journal*, pp 25-31.
- Aucoin, B. and Russell, B. (1987). Detection of distribution high impedance faults using burst noise signals near 60Hz. *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 2, pp. 342-348.
- Aucoin, B., and Jones, R. (1996). High impedance fault implementation issues. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 139-148.
- Balsler, J., Clements, K. and Lawrence, D. (1986). A microcomputer-based technique for detection of high impedance faults. *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 1, pp. 252-258.
- Costa, D. (2012). *Viabilidade técnica-econômica para a utilização de condutor neutro em redes elétricas de distribuição rural*. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

- Emanuel, A., Cyganski, D., Orr, J., Shiller, S. and Gulachenski, E. (1990). High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, p. 676–686.
- Ghaderi, A., Ginn III, A. and Mohammadpour, H. (2017). High impedance fault detection: A review. *Electric power systems research*, vol. 143, pp. 376-388.
- Hou, D. (2007). Detection of high-impedance faults in power distribution systems. *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, pp. 85-95.
- Iurinic, L. (2016). *Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: Uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Kawady, T. A. Taalab, A. E. and Elgeziry, M. (2009). Experimental investigation of high impedance faults in low voltage distribution network. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-6.
- Kim, C. J. and Russell, B. D. (1998). Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders. *Electric Power Systems Research*, vol. 14, pp. 219-225.
- Leão, P. A., Tostes, L. M., Vieira, A. J., Bezerra, H. U., Santos, M., Sousa, Á. L., Heringer, W., Cordeiro, M., Paye, J. and Pinheiro, L. (2020). Projeto e montagem de laboratório para testes experimentais de faltas de alta impedância em redes aéreas de distribuição. *XXIII Congresso Brasileiro De Automática*.
- Lima, M. E. (2016). *Proposição de um método de detecção de FAI baseado nos componentes harmônicos de baixa frequência*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Liu, J., Dong, X., Chen, X., Tong, X., Xhang, X. and Xu, S. (2016). *Fault location and service restoration for electrical distribution systems*. John Wiley & Sons, Singapore.
- Mamede, J. F. and Mamede, J. (2013). *Proteção dos sistemas elétricos de potência*. LTC, Rio de Janeiro.
- Naka, H. and Siqueira, M. (1992). Faltas de Alta impedância de distribuição: diagnóstico/soluções. *Seminário nacional ne distribuição de energia elétrica*.
- Nakagomi, M. R. (2006). *Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Nam, S. R., Park, J. K., Kang, Y. C. and Kim, T. H. (2001). A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP. *Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 1175-1180.
- Oliveira, A. D. (2006). *Faltas de alta impedância: Detecção e localização de rompimentos de condutores em circuito primário de redes aéreas de distribuição baseado em desequilíbrio de tensão*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Parise, G., Grasselli, U. and Di Luozzo, V. (1993). Arcing fault in sub-distribution branchcircuits. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 8, pp. 580-583.
- Roberts, J., Altuve, H. and Hou, D. (2001). Análise dos métodos de proteção contra faltas à terra nos sistemas da distribuição aterrados, não aterrados e compensados. *Schweizer Engineering Laboratories*.
- Russell, B. (1982). Detection of arcing faults on distribution feeders. *EPRI Report*.
- Russell, B. Chinchali, R. and Kim, C. (1988). Behavior of low frequency spectra during arcing fault and switching events. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, pp. 1485-1492.
- Russell, B. and Chinchali, R. (1989). Digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 132-140.
- Russell, B. (1989). IEEE tutorial course: detection of downed conductors on utility distribution systems. *IEEE Winter Power Meeting*, vol. 5, p. 48.
- Santos, W. (2016). *Identificação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.
- Sato, F. and Freitas, W. (2015). *Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica*. Elsevier, Rio de Janeiro.
- Shirado, W. Moreira, M. Palma, J. Borbon Júnior, S. (2015). *Estudo comparativo entre algoritmos das transformadas discretas de Fourier e Wavelet*. *Revista brasileira de computação aplicada*, vol. 7, pp. 97-107.
- Silva, R. P. (1992). *Técnica alternativa para a detecção de falta de alta impedância*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Soheili, A., Sadeh, J., Lomei, H. and Muttaqi, K. (2016). A new high impedance fault detection scheme: Fourier based approach. *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1-6.
- Souza, F. (2017). *Identificação de faltas de alta impedância por análise de características cicloestacionárias*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Stewart, J. (1979). Detecting high impedance faults. *Fotocópia de periódico desconhecido*, pp. 48–51.
- Tengdin, J., Westfall, R. and Stephan, K. (1996). High impedance fault detection technology. *Report of PSRC Working Group D*, vol. 15, pp. 1996.
- Torres, V., Guardado, J., Ruiz, H. and Maximov, S. (2014). Modeling and detection of high impedance faults. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 163–172.
- Wester, C. G. (1998). High impedance fault detection on distribution systems. *Rural Electric Power Conference Presented at 42nd Annual Conference*, pp. c5-1.
- Wontroba, A. (2020). *Metodologia de detecção e classificação de faltas de alta impedância em redes de distribuição: Implementação em Hardware e Validação por meio de Simulação Digital em Tempo Real*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.