

Características de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas de Distribuição em Galhos de Castanhola.

André P. Leão*. Maria Emília L. Tostes *. João Paulo A. Vieira**. Ubiratan H. Bezerra*.
 Marcelo C. Santos***. Ádrea L. de Sousa **. Wesley R. Heringer**.
 Murillo A. M. Cordeiro**. Juan Carlos H. Paye **. Lucas de Paula A. Pinheiro***.

*Centro de Eficiência Energética da Amazônia - CEAMAZON, Universidade Federal do Pará - UFPA, Pará, Brasil (e-mail: leaoap2017@gmail.com, tostes@ufpa.br, bira@ufpa.br);

** Grupo de Sistemas de Energia e Inovação - GSEI, Universidade Federal do Pará - UFPA, Pará, Brasil (e-mail: jpavieira@ufpa.br, adrealsousa@gmail.com, riderheringer@gmail.com, murilloaugustocordeiro@gmail.com, juancarloshuaquisaca@gmail.com);

*** Equatorial Energia, Pará, Brasil (e-mail: marcelo.costa@equatorialenergia.com.br, lucas.pinheiro@equatorialenergia.com.br).

Abstract: The main characteristic of a high impedance fault (HIF), a recurrent failure in aerial distribution networks, is the low magnitude of the current produced, which makes it difficult to detect and locate it by the equipment commonly used for protection, leaving the conductor energized, that makes possible the occurrence of fires and the risk of death. Records of HIF characteristics in trees are a gap in the literature, which makes it difficult to develop algorithms and methods that can facilitate its detection and localization. This study presents details of the characteristics of HIF voltages and currents in Castanhola tree branches, the result of experimental tests carried out in a laboratory designed and assembled for HIF simulation in aerial distribution networks, with the capture of these oscillographs performed by a relay commercial protection.

Resumo: A principal característica de uma falta de alta impedância (FAI), falha recorrente em redes aéreas de distribuição, é a baixa magnitude de corrente produzida, o que torna difícil sua detecção e localização pelos equipamentos comumente utilizados para proteção, ficando o condutor energizado, o que possibilita a ocorrência de incêndios e o risco de mortes. Registros das características da FAI em árvores é uma lacuna na literatura, a qual dificulta o desenvolvimento de algoritmos e métodos que possam facilitar sua detecção e localização. Este estudo apresenta detalhes das características de tensões e correntes de FAI em galhos de árvore do tipo Castanhola, resultado de testes experimentais realizados em laboratório projetado e montado para simulação de FAI em redes aéreas de distribuição, tendo sido a captura dessas oscilografias realizada por um relé de proteção comercial.

Keywords: High impedance fault; Aerial distribution networks; Chains characteristic of HIF; Experimental HIF tests on tree branches.

Palavras-chaves: Falta de alta impedância; Redes aéreas de distribuição; Correntes características de FAI; Testes experimentais de FAI em galhos de árvores.

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de uma falta de alta impedância (FAI) nos sistemas de distribuição de média tensão tem como principal característica a baixa magnitude de corrente, o que a torna quase imperceptível aos equipamentos de proteção atuais (Marxsen. 2015). O contato de galhos de árvores com um ou mais condutores energizados também é considerada uma FAI, que neste caso, se estabelece sem que necessariamente ocorra o rompimento do condutor, o que diminui consideravelmente a magnitude da corrente de falta que ainda assim é capaz de provocar a queima do galho. Como os equipamentos de proteção não detectam a FAI, o condutor permanece energizado, favorecendo a ocorrência de incêndios com prejuízos financeiros de elevadas proporções, a perda de vidas de pessoas e animais. Quando uma FAI ocorre em redes aéreas de distribuição rurais, onde à

predominância da topologia radial com alimentadores de grande extensão e que cruzam longos trechos desabitados, a localização deste defeito é ainda mais dificultada (Elkalashy et al. 2006).

No estado da arte desta falta não foram encontrados registros de características específicas das correntes de FAI em galhos de árvores, principalmente de eventos ocorridos em redes aéreas de distribuição e registrados por seus relés de proteção, o que também é raro para as outras superfícies (Cordeiro. 2019). Muitas características das correntes de FAI em outras superfícies (areia, seixo, asfalto, etc.) foram obtidas em testes experimentais com a utilização de dispositivos como osciloscópios e registradores digitais de perturbação (Santos. 2006; Marxsen. 2015; Elkalashy et al. 2006; Masa. 2012), mas o uso de um relé de proteção comercial favorece a redução de custos, já que para a

detecção e localização da FAI não seria preciso a troca dos equipamentos, mas a inserção de algoritmos especialistas, capazes de identificar as características das FAI em árvores permitindo, por exemplo, uma poda preventiva, que já evitaria faltas futuras.

Este estudo apresenta características específicas de correntes de FAI em galhos de uma árvore de Castanhola, resultado de testes experimentais realizados em um laboratório projetado e montado para realização experimental de FAI, simulando a ocorrência em redes aéreas de distribuição, sendo as formas de ondas das tensões e correntes geradas nos testes registradas por um relé de proteção comercial.

2. FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

A falta de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica é uma falha recorrente onde o condutor primário energizado, rompido ou não, entra em contato com uma superfície com alta resistividade elétrica, como árvore, asfalto, areia ou grama. Geralmente ocorre em sistemas de distribuição com tensões de 4 kV até 34,5 kV e devido à alta impedância, a corrente elétrica de falta possui uma baixa amplitude, variando de 0 A até menos de 100 A (Hou. 2007; Nakagomi. 2006; Tengdin et al. 1996). Contudo, Cordeiro *et al.* (2019) mostra oscilografias reais de FAI ocorrida em uma rede de média tensão na qual a corrente chega a 190,5 A. A Tabela 1 mostra valores típicos de corrente de falta em sistema de 12,5 kV para diferentes materiais, mas não apresenta valores para galhos de árvores. Santos (2016) por sua vez, informa que cogitou realizar testes com árvores, mas desistiu por dificuldades operacionais.

Tabela 1. Valores típicos de corrente de falta em sistema de 12,5 kV para diferentes materiais

Superfícies	Correntes (A)
Asfalto seco ou areia seca	0
Areia molhada	15
Grama seca	25
Grama Molhada	50
Concreto armado	75

Fonte: Adaptado Tengdin, 1996.

A ordem de grandeza dessa corrente não produz um aumento substancial na corrente do sistema e é semelhante a transientes oscilatórios na rede, como conexão de cargas e chaveamento de banco de capacitores. Por conseguinte, não é suficiente para sensibilizar os sistemas de proteção de sobrecorrente convencionais, como fusíveis e relés, permanecendo o defeito por tempo indeterminado (Adamiak et al. 2006; Nakagomi. 2006; Santos et al. 2013). O contato ou queda do condutor em vias públicas, ou construções, pode provocar queimaduras, eletrocussão e até morte de seres vivos, além de causar aquecimento e combustão de materiais, devido ao alto potencial elétrico (Nakagomi. 2006; Tengdin. 1996).

Para que uma FAI ocorra em galhos de árvores, não necessariamente precisa haver o rompimento e queda do condutor primário, podendo haver tão somente o contato de um galho com o condutor energizado. Neste caso, existem basicamente três possibilidades: o contato do galho com um condutor primário energizado (monofásica), com dois condutores (bifásica) ou com os três condutores (trifásica), como é mostrado na Fig.1. A maior ocorrência deste tipo de falta é monofásica, sendo que na bifásica o tempo necessário para que o galho pegue fogo é reduzido significativamente (Marxsen. 2015).

A ocorrência de arco elétrico é outra característica bastante presente em FAI. Ele é resultado dos espaços de ar devido ao contato não firme entre o condutor energizado e a superfície de alta resistividade ou lacunas na própria superfície (Tengdin. 1996). O ar é um bom isolante para uma pequena distância e uma pequena diferença de potencial. Ao aumentar essa diferença de potencial, a resistência elétrica do ar diminui e a partir de um certo limiar, ocorre o rompimento desse dielétrico e o ar torna-se um condutor. Isso acontece quando o campo elétrico acelera os elétrons livres e com energia cinética suficiente, tais elétrons irão liberar novos elétrons ao colidirem e ionizarem moléculas de ar, que por sua vez irão colidir e ionizar outras moléculas de ar, criando um fenômeno de avalanche. Assim, o arco elétrico é a condução de corrente de forma contínua. Contudo, isso não ocorre de forma imediata, sendo comum que antes ocorra um centelhamento, que é uma série rápida de rompimentos momentâneos do dielétrico (Nakagomi. 2006).

A corrente de FAI possui características que a distingue de outras falhas, principalmente devido ao arco elétrico, além da baixa amplitude (Nakagomi. 2006; Nam et al. 2001; EPRI. 1982):

- Não linearidade: A curva característica da tensão em função da corrente é não linear, e ocasiona harmônicos da 3ª a 10ª ordem, aproximadamente;
- Assimetria: A corrente de falta possui diferentes valores de pico para o semiciclo positivo e negativo, e promove o aparecimento de harmônicos de ordem par da fundamental;
- Intermittência: Descontinuidade momentânea da corrente, e provoca o surgimento de um espectro de harmônicos de alta frequência;
- *Buildup*: Variação progressiva da corrente a cada semiciclo, e provoca harmônicos intercalados;
- *Shoulder*: Instantes de constância entre o *buildup*.

Tais características estão mostradas na Fig.2, ressaltando-se que as mesmas dependem das condições geométricas, espaciais, ambientais e elétricas do sistema. Como consequência, as grandezas elétricas envolvidas nessa falha possuem comportamento aleatório (Kaufmann e Page. 1960).

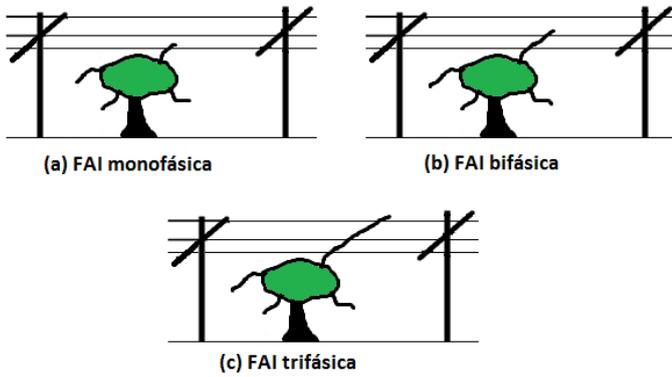


Fig. 1 Possibilidades de FAI por contato em condutores.

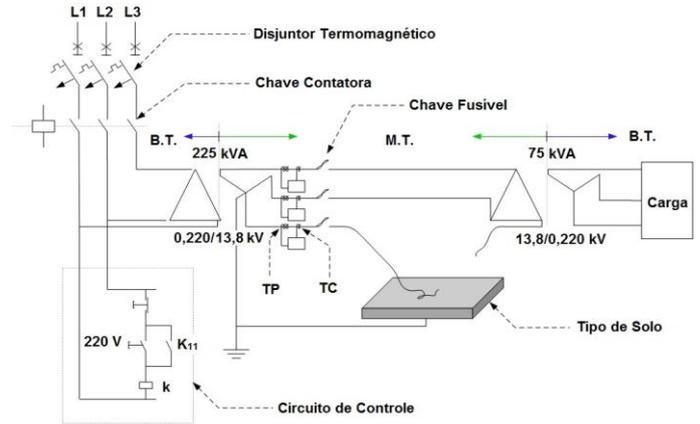


Fig. 3 – Projeto do LabFAI.

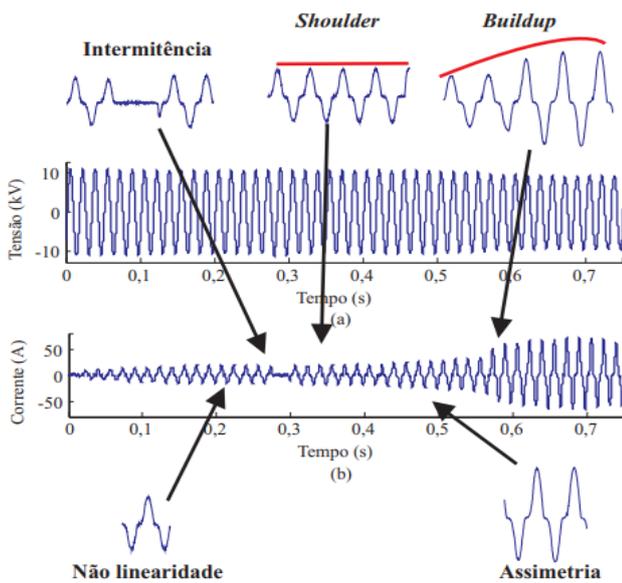


Fig. 2 – Oscilografia real de uma FAI: (a) Tensão sem afundamentos (b) Corrente de FAI contendo as principais características. Fonte: Nam et al. (2001)

3. LABORATÓRIO PARA TESTES EXPERIMENTAIS DE FAI EM REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO

Para a realização de testes experimentais de FAI foi realizado o projeto e a montagem do laboratório para Testes Experimentais de FAI em Redes Aéreas de Distribuição (LabFAI) no Laboratório de Alta Tensão (LEAT) da Universidade Federal do Pará (UFPA), tendo este Laboratório sido previsto no P&D ANEEL FAI, o qual tem o objetivo desenvolver um Localizador de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas de Distribuição. O projeto e a estrutura atual do LabFAI podem ser vistos nas Fig.3 e 4, respectivamente.



Fig. 4 – Estrutura física atual do LabFAI.

Conforme estabelecido no projeto, o LabFAI é alimentado por um circuito do LEAT em baixa tensão (220 V) e corrente de 400 A, e função da relação de Transformação do Trafo de 225 kVA, sua máxima corrente em alta tensão está limitada máximo de 6 A. Para garantir a não atuação do disjuntor de proteção do circuito alimentador, o relé foi parametrizado com correntes limites para fases em 5 A e 4,5 A para o neutro. Apesar desta limitação, considerando a alta impedância das superfícies, muitos testes puderam ser realizados sem maiores dificuldades, sendo utilizado o relé comercial SEL 751 para proteção da rede e registro das oscilografias, o qual registra 32 amostras por ciclo e 65 ciclos em cada evento, cedido pela Equatorial Pará.

4. CARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES E CORRENTES DE FAI EM GALHOS DE CASTANHOLA

Dentre os diversos testes experimentais que poderiam ser realizados no Laboratório de FAI, optou-se em iniciar os experimentos com galhos de árvores, escolha motivada pela grande diversidade de espécies na região Amazônica, onde se localiza a UFPA, e pela pouca literatura que trata das características das tensões e correntes de FAI em galhos (Marxsen. 2015; Elkalashy et al. 2007; Elkalashy et al. 2008). A relativa simplicidade para simulação deste tipo de FAI no

laboratório montado foi outro fator favorável nesta escolha. Importa observar que o conhecimento destas características é informação essencial na grande maioria de métodos utilizados para modelagem, detecção e localização de FAI (Ghaderi et al. 2017, Nam et al. 2001, Santos. 2006, Marxsen. 2015, Elkalashy et al. 2006, Masa. 2012).

A significativa presença de árvores de Castanhola na cidade de Belém do Pará e o fato delas atingirem alturas superiores aos 8 a 10 metros utilizados nas redes de distribuição de média tensão (Nakagomi. 2006), altura usada em grande parte das redes aéreas de distribuição da concessionária local Equatorial Pará, financiadora do projeto P&D ANEEL intitulado “Localização de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas de Distribuição”, foram algumas das razões que motivaram sua escolha como a primeira árvore a ser estudada.

4.1 Condições e Critérios dos Testes de FAI em Castanhola

A temperatura no LEAT, quando da realização dos testes, era de 31,5 °C e a umidade relativa de 73,4%. Tais dados são citados para efeito de registro, uma vez que não é possível o controle destes parâmetros naquele ambiente. Visando garantir que as condições habituais dos galhos estivessem intactas para simulação das FAI, utilizaram-se galhos de Castanhola cortados na mesma data em que os testes ocorreram.

Os testes foram realizados com a rede equilibrada e sem carga, sendo utilizado o condutor da fase “C” íntegro, ou seja, não houve a “simulação” de rompimento deste cabo. Nestas condições, duas possibilidades básicas foram consideradas: I – Galho (1) próximo ao condutor, mas não encostado; II – Demais Galhos (2,3 e 4) encostando-se ao condutor. Para a segunda condição, ainda foram verificadas as influências do tempo de ocorrência da FAI e da variação da distância linear entre o ponto de contato com o condutor energizado e o ponto do galho conectada a terra. Para todas as condições, estando o cabo íntegro, a corrente de FAI é aquela que passa pelo galho e vai para a terra, a qual foi medida pelo Relé 751 SEL através da corrente de terra (IG).

I – Galho 1 próximo ao condutor, mas não encostado.

No Teste 1 foi estabelecida em 0,5 metros a distância linear entre o ponto próximo ao condutor energizado e o ponto do galho conectada a terra, sendo estabelecido um tempo limite de 15 segundos para o teste. A Fig. 5(a) apresenta o posicionamento do galho de Castanhola próximo ao condutor “C” que foi energizado para simulação da FAI, e a Fig. 5 (b) registra a distância linear entre o ponto próximo ao condutor energizado e o ponto do galho conectada a terra.

A tensão e corrente de FAI geradas quando o LabFAI foi energizado são apresentadas na Fig. 6 e a curva característica VxI , plotada para um ciclo do regime permanente, é vista na Fig. 7.

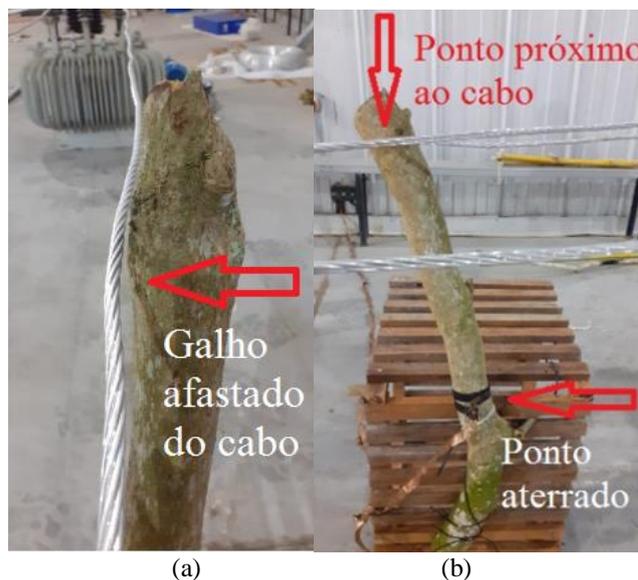


Fig. 5 – Galho de Castanhola (a) Próximo ao cabo. (b) Ponto do galho aterrado.

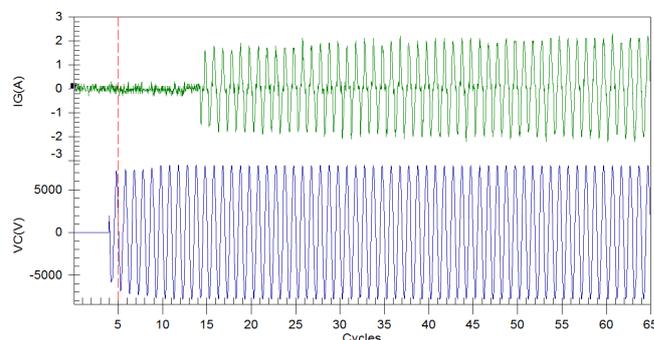


Fig. 6 – Corrente e Tensão da FAI do galho próximo ao cabo – Teste 1.

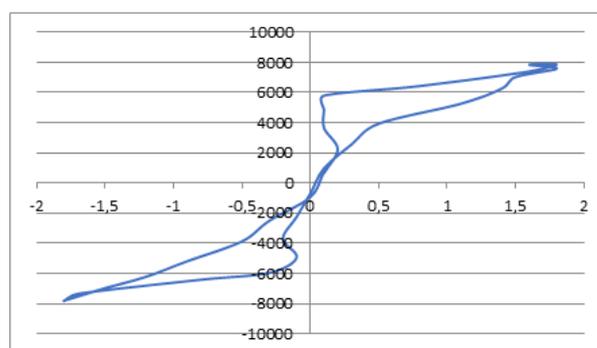


Fig. 7 – Curva característica VxI da FAI.

A curva característica obtida para um ciclo final da oscilografia desta FAI reflete a não linearidade e assimetria da resistência do galho em regime permanente (Nam et al. 2001, Santos. 2006). Esta curva é muito semelhante à curva do arco apresentada por Elkalashy et al. (2007), demonstrando que nesta condição a corrente que passa pelo galho é a corrente do arco elétrico.

Verificou-se que foram necessários quase 14 ciclos do teste para que houvesse o início do arco elétrico e apenas 13 segundos para que a corrente atingisse 6,3 A, fazendo com que o relé desligasse a rede, antes de atingido o tempo limite definido para o teste, que era de 15 segundos. A corrente provocou a queima do galho.

Nos detalhes do regime permanente das oscilografias da Fig. 6, vistos na Fig. 8, verifica-se a linearidade e simetria na forma de onda da tensão, onda sem distorções e tamanhos iguais nos semiciclos positivo e negativo. Por outro lado, ficam evidentes as distorções na forma de onda da corrente e as assimetrias nos seus semiciclos.

A Fig. 9 demonstra que o crescimento gradual da corrente, sendo a tensão constante, o que evidencia que a dissipação da resistência total do galho ocorre de forma quase linear.

II – Galhos encostando-se ao condutor.

Para a realização dos testes nesta nova condição, foram utilizados os galhos 2, 3 e 4, todos inicialmente intactos, sendo variados os tempos de duração dos testes e a distância linear entre o ponto de contato com o condutor energizado e o ponto do galho conectado a terra. Em função da FAI no Teste 1 ter ocasionado o desligamento do LabFAI em 13 segundos, definiu-se que o tempo total de testes para cada um dos galhos seria de 8 segundos, divididos conforme Tabela 2.

Tabela 2. Condições testadas nos galhos de Castanhola encostados no condutor energizado

Galho	Teste	Tempo Previsto(s)	Distância Linear(m)
2	2	5	0,5
2	3	3	0,5
2	4	1	0,5
3	5	5	1,0
3	6	3	1,0
3	7	1	1,0
4	8	5	1,5
4	9	3	1,5
4	10	1	1,5

A tensão e corrente de FAI no Teste 2 são vistas na Fig. 10, onde a corrente teve seu início em fase com a tensão, imediatamente após a energização do LabFAI. A curva característica obtida para um ciclo do regime permanente (Fig. 11) demonstrou relativa linearidade, quando comparada a curva característica da Fig. 7.

Devido à queima provocada no galho pela passagem da corrente, a impedância da árvore ficou reduzida, diferentemente do que ocorre em outras superfícies de alta impedância como o concreto, onde o calor produzido pela corrente pode gerar “fulguritos”, uma resistência diferenciada que surge ao longo dos caminhos de ionização no interior do solo, aumentando a impedância no ponto de contato no objeto (Nakagomi. 2006; Leão et al. 2019).

Nos detalhes do regime permanente das oscilografias da Fig.10, vistos na Fig.12, permanecem as distorções na forma de onda da corrente e as assimetrias nos seus semiciclos, mesmo com o crescimento da amplitude da corrente.

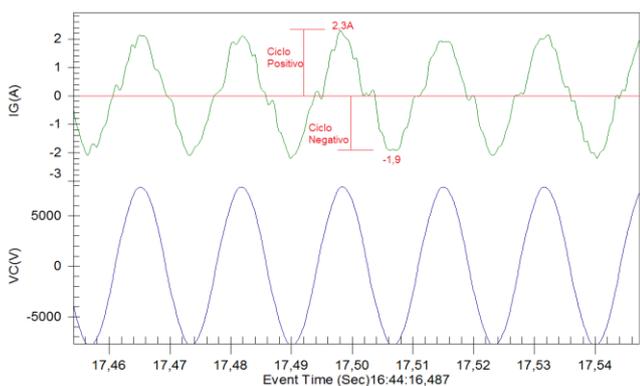


Fig. 8 – Distorções e assimetria Teste 1.

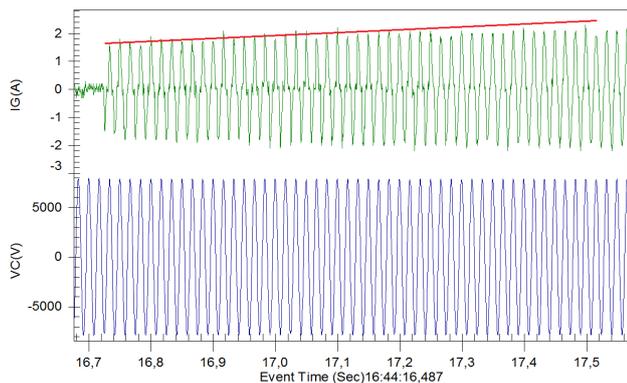


Fig. 9 – Crescimento gradual da corrente.

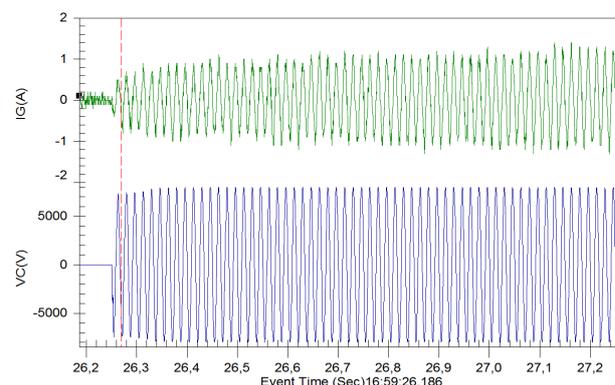


Fig. 10 – Corrente e Tensão da FAI do Teste 2.

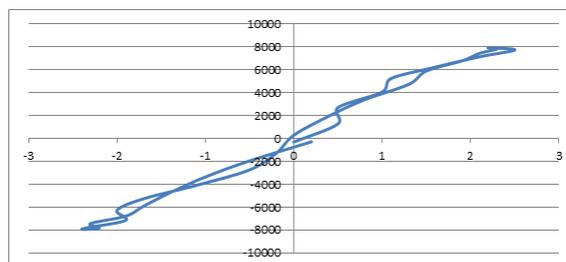


Fig. 11 – Curva característica $V \times I$ da FAI do Teste 2.

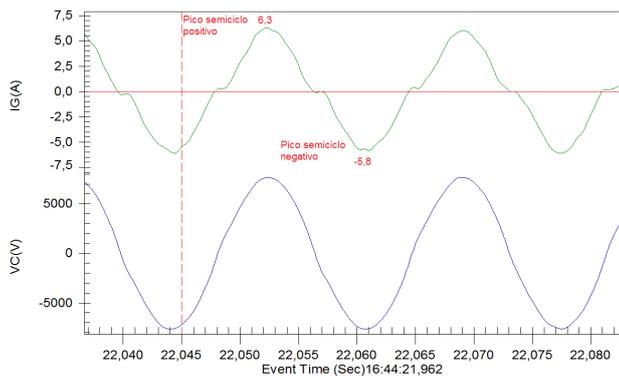


Fig. 12 – Distorções e assimetria Teste 2.

Os Testes 3 e 4 utilizaram o mesmo galho do Teste 2. A redução dos tempos previstos na Tabela 2 visava evitar a dissipação total da resistência do galho de forma prematura, mesmo assim, em ambos os testes, o relé atuou antes dos tempos previstos.

As oscilografias das correntes destes testes, Figuras 13 e 15, respectivamente, demonstram tempos muito reduzidos para que as correntes atingissem o valor limite de 5 A. Por outro lado, os detalhes das Figuras 14 e 16, evidenciam que a resistência em regime permanente tornou-se praticamente linear.

Nos Testes 5, 6 e 7, a distância linear entre o ponto de contato com o condutor energizado e o ponto do galho conectado a terra foi aumentado para 1,0 metro, ficando a corrente reduzida a valores inferiores a 1,5 A. No Teste 5, estando o galho intacto, o comportamento da tensão e da corrente de FAI, vistos na Fig.17, foram similares aos verificados no Teste 2, mas com redução da amplitude da corrente, devido ao aumento da resistência total do galho. Nos detalhes do regime permanente dessas oscilografias, vistos na Fig.18, são visíveis as distorções na forma de onda da corrente e as assimetrias nos seus semiciclos, mesmo com o decrescimento da amplitude da corrente.

Nos Testes 6 e 7, houve uma pequena variação na amplitude média da corrente durante os testes, sendo os detalhes das correntes em regime permanente vistos nas Figuras 19 e 20, respectivamente. São visíveis as distorções na forma de onda da corrente e as assimetrias nos seus semiciclos.

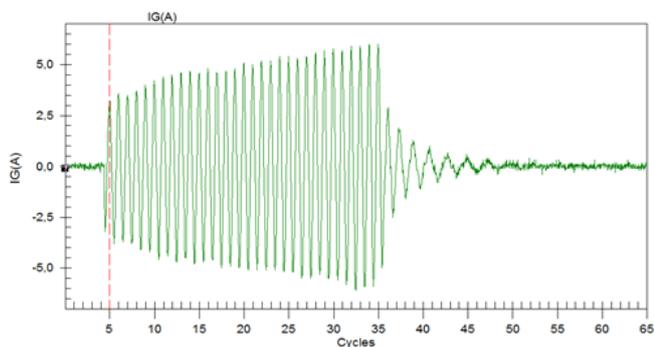


Fig. 13 – Oscilografia da corrente de FAI do Teste 3.

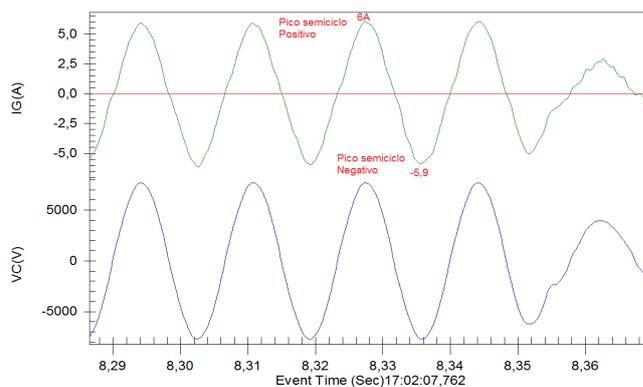


Fig. 14 – Distorções e assimetria Teste 3.

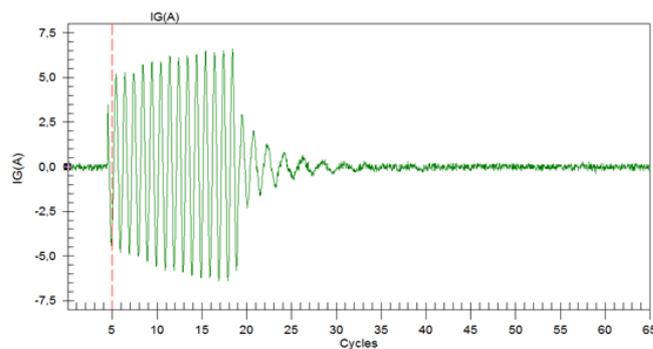


Fig. 15 – Oscilografia da corrente de FAI do Teste 4.

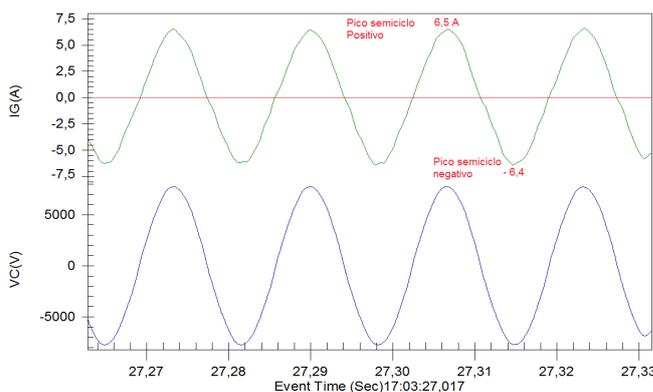


Fig. 16 – Distorções e assimetria Teste 4.

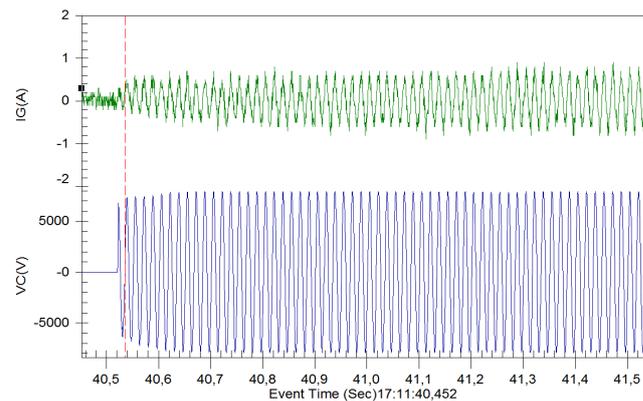


Fig. 17 – Corrente e Tensão da FAI do Teste 5.

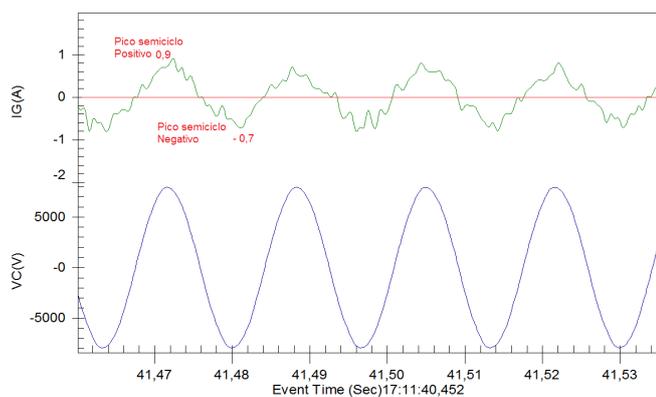


Fig. 18 – Distorções e assimetria Teste 5.

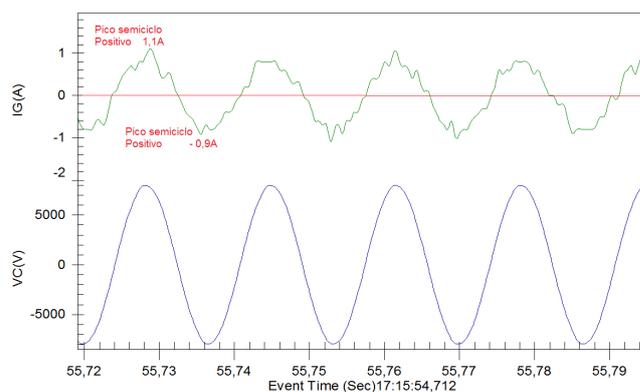


Fig. 20 – Distorções e assimetria Teste 7.

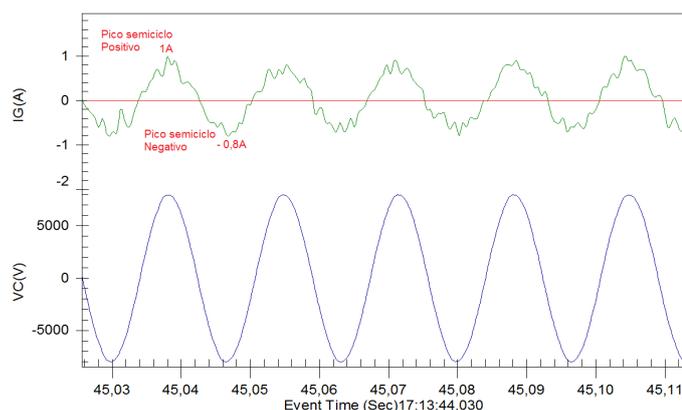


Fig. 19 – Distorções e assimetria Teste 6.

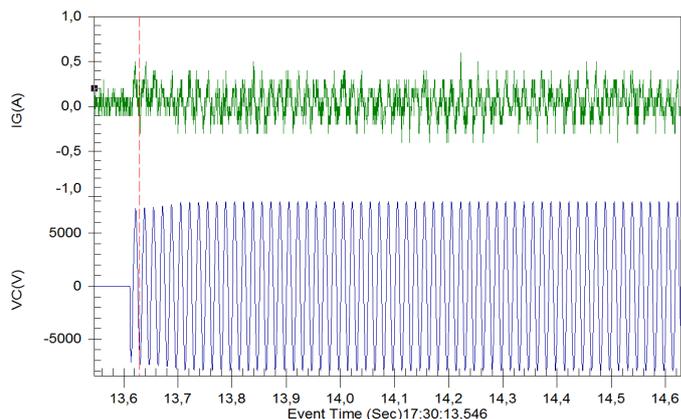


Fig. 21 – Corrente e Tensão da FAI do Teste 8.

Nos Testes 8, 9 e 10, a distância linear entre o ponto de contato com o condutor energizado e o ponto do galho conectado a terra foi aumentado para 1,5 metros, o que praticamente interrompeu o fluxo de corrente no galho, sendo registrados apenas ruídos na corrente, conforme demonstra a Fig. 21.

5. CONCLUSÕES

Em nenhum dos testes realizados com galhos de Castanhola foi verificada a ocorrência de intermitência na corrente da FAI, sendo esta característica ineficaz para modelagem ou identificação deste tipo de evento.

Nos testes onde houve o registro da passagem de corrente, poucos foram os instantes de constância desta (*shoulders*), mas o *buildup* esteve sempre presente, ficando mais evidente quanto menor era a resistência total do galho em teste.

A não linearidade foi uma característica presente em quase todos os testes em que houve corrente, assim como a assimetria, com diferentes valores de pico para o semiciclo positivo e negativo. A dissipação da resistência do galho, devido a sua queima pela passagem da corrente, a exemplo do ocorrido no Teste 4, minimizou drasticamente a presença destas características (Fig.16).

As características da FAI em galhos de Castanhola, obtidas através de testes experimentais e registradas através de um relé comercial, são inéditas em toda a literatura e possibilitarão o desenvolvimento de modelos mais específicos para este tipo de falta, permitindo sua detecção e a localização. Em cidades com Belém do Pará, onde a presença deste tipo de árvore é relevante, a aplicação desta pesquisa pode resultar tanto na redução de custos operacionais da Distribuidora pela identificação e localização de FAI em sua rede aérea de distribuição, quanto pela detecção eventual que possibilite a realização de podas preventivas, evitando sua ocorrência e principalmente a perda de vidas humanas.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa só foi possível devido ao aporte financeiro da CAPES e da parceria com a CELPA, através do P&D FAI, sem os quais a mesma não seria possível. Agradecemos ainda a TRAEI Ind. e Com. de Transformadores Elétricos do Pará.

REFERÊNCIAS

Adamiak, M., Wester, C, Thakur, M. & Jensen, C. (2006). *High impedance fault detection on distribution feeders*. Protection & Control Journal, Ontario, p. 25-31.

- Cordeiro, M. A. M., Heringer, W.R., Paye, J. C. H., Vieira, J. P. A., Sousa, A. L., Leão, A. P., Farias, P. E., Wontroba, A., Júnior, G. Cardoso e Santos, M. C.. (2019) *Validation of a high impedance fault model for overhead distribution networks using real oscillography data*. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION – CLAGTEE, 13, Santiago.
- Elkalashy, N., Lehtonen, M. Lehtonen, Darwish, H., Izzularab, M. and Taalab, A. (2006) *Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in MV Networks*. Accepted at IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation and published at IEEE/PES, Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006, Apr 2007, Atlanta, Georgia, USA
- Elkalashy, N. I. et al. (2008) *DWT-based detection and transient power direction-based location of high-impedance faults due to leaning trees in unearthed MV networks*. IEEE Transactions on Power Delivery, [Piscataway], v.23, n.1, p.94-101, Jan.
- EPRI. (1982). “*EPRI Report: Detection of arcing faults on distribution feeders*”, EPRI Final Rep. EL-2767, Palo Alto, CA, USA, Tech. Rep.
- Fanucchi, R. (2014) *A detecção e a localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição utilizando transformadas wavelets e redes neurais artificiais*. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Ghaderi, A., Ginn III, H. L. and Mohammadpour, H. (2017). *A. High impedance fault detection: A review*. Elect. Power Syst. Res., vol. 143, pp. 376–388, 2017.
- HOU, D. (2007). *Detection of high-impedance faults in power distribution systems*. In: ANNUAL CLEMSON UNIVERSITY POWER SYSTEMS CONFERENCE, 6, Clemson.
- Kaufmann, R.H. & Page, J.C. (1960). *Arcing Fault protection for low-voltage power distribution systems – nature of the problem*. AIEE Transactions on Power Apparatus System, v.79, p.160 – 167, December.
- Leão, A. P., Tostes, M. E. L., Vieira, J. P. A., Bezerra, U. H., Cordeiro, M. A. M., Heringer, W.R., Paye, J. C. H. e Santos, M. C. (2019). *Use of a Resonant Source for Experimental Tests of High Impedance Faults at Medium Voltage Levels*. In: Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE, 13, 2019, Santiago.
- Masa, A. V., Maun, J. C., Werben, s. (2012). *Incorporation of data-mining in protection technology for high impedance fault detection*. IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, California, EEUU.
- Marxsen, T. (2015). *Vegetation conduction ignition test report—Final*. Dept. Econ. Develop. Jobs Transport Resour., Marxsen Consulting Pty Ltd., Sydney, Australia.
- Nakagomi, R. (2006) *Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição*. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Nam, S. R., Park, J. K., Kang, Y. C.; Kim, T. H. (2001). *A modeling method of a high impedance fault a distribution system using two series time-varying resistances in emtp*. IEEE PES Summer Meeting.
- Santos, W., Souza, B., Brito, N. D., Costa, F., and Paes Jr., M. (2013). “*High impedance faults: From field tests to modeling*”, *J. Control, Autom. Elect. Syst.*, vol. 24, no. 6, Sep.
- Santos, W (2016). *Identificação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição*. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Tengdin, J. et al. (1996). *High impedance fault detection technology*. Report of PSRC Working Group D15, mar.