

Projeto e Montagem de Laboratório Para Testes Experimentais de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas de Distribuição.

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: jpvieira@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: This article presents the design and assembly of a laboratory for experimental tests of high impedance fault (HIF) in Overhead distribution networks. Experimental HIF tests in a medium voltage three-phase electrical installation can be used to determine characteristics and, therefore, mathematical models of HIF. The laboratory can also be used to validate HIF detection methods introduced as a function in protection relays. The laboratory consists essentially of a 225 kVA - 220 V / 13.8 kV three-phase transformer, a protection relay, a contactor, circuit breakers, fuse links, cables, TPs, TCs, a 75 kVA - 13.8 three-phase transformer kV / 220 V, electrical loads, and the different contact surfaces as test objects. In this article, the main characteristics of HIFs were raised, for different contact surfaces, through experimental tests carried out at the High and Extra High Voltage Laboratory (LEAT) at the Federal University of Pará (UFPA), in Belém-PA.

Resumo: Esse artigo apresenta o projeto e a montagem de um laboratório para testes experimentais de falhas de alta impedância (FAI) em redes aéreas de distribuição. Testes experimentais de FAI em uma instalação elétrica trifásica de média tensão podem ser usados para determinar características e, por conseguinte, modelos matemáticos de FAI. O laboratório pode também ser usado para validação de métodos de detecção de FAI introduzidos como função em relés de proteção. O laboratório é composto essencialmente por um transformador trifásico de 225 kVA - 220 V/13,8 kV, um relé de proteção, uma contatora, disjuntores, elos fusíveis, cabos, TPs, TCs, um transformador trifásico de 75 kVA - 13,8 kV/220 V, cargas elétricas, e as diferentes superfícies de contato como objetos de teste. Nesse artigo, as principais características de FAIs foram levantadas, para diferentes superfícies de contato, por meio de testes experimentais realizados no Laboratório de Alta e Extra Alta Tensão (LEAT) da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém-PA.

Keywords: High impedance fault (HIF); Overhead distribution networks; HIF experimental testing.

Palavras-chaves: Falta de alta impedância (FAI); redes aéreas de distribuição; testes experimentais; características de FAI.

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de uma falta de alta impedância (FAI) nos sistemas de distribuição de média tensão tem como uma de suas principais características a baixa magnitude de corrente, o que a torna quase imperceptível aos equipamentos de proteção atuais (Marxsen. 2015). Uma FAI pode ocorrer entre condutores energizados, a exemplo de um galho de árvore que se encosta simultaneamente entre condutores da rede de distribuição, mas na maioria das vezes envolve um caminho para a terra. Nesta última condição, um condutor primário faz contato elétrico indesejado com uma superfície como asfalto, calçada, grama ou outro objeto que restringe o fluxo da corrente de falta a um nível abaixo do detectável de forma confiável pelos dispositivos convencionais de

sobrecorrente, o que diversas vezes deixa o condutor energizado na superfície do solo, interrompendo o fornecimento de energia e representando um perigo para o público (Tengdin et al. 1996).

Dentre os critérios da qualidade da energia elétrica exigidos no Brasil pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL através dos Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico – PRODIST – Módulo 8 (ANEEL. 2018), são estabelecidos indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica ligados a duração e frequência de interrupção. A Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) calcula a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora de uma Concessionária, sendo esta duramente

penalizada quando os limites estabelecidos para este índice são ultrapassados.

Visando a diminuição na duração das interrupções e dos custos causados pelas FAIs, as distribuidoras do setor elétrico têm investido no desenvolvimento de soluções que dinamizam a restauração de energia, sendo imprescindível para alcançar este objetivo uma descrição detalhada do evento, que possibilite realizar um diagnóstico. No contexto de sistemas de energia elétrica, isso se traduz na execução de estágios de detecção, classificação e localização do evento. Alguns pesquisadores, na busca por mais informações da FAI, realizaram testes experimentais em circuitos ligados a rede elétrica física (Santos et al. 2013; Marxsen. 2015), muitos outros, contudo, devido as dificuldades para a realização de experimentos práticos, têm optado por simulações computacionais, como forma de também contornarem o problema das interrupções. Quanto ao estado da arte, este é um tópico recente e de importância crescente (Chan & Yibin. 1998, Lazkano et al. 2000, Moreto. 2005, Yang et al. 2007).

A impossibilidade de interrupções frequentes nas redes de distribuição das Concessionárias de energia no Brasil (ANEEL. 2018) para a realização de testes experimentais de FAI e a pequena quantidade de registros na literatura de oscilografias reais de FAIs na distribuição, como as registradas por Cordeiro et al. (2019), estimularam o projeto e a montagem do Laboratório para Testes Experimentais de FAI em Redes Aéreas de Distribuição. A apresentação deste laboratório é o objeto do presente artigo.

2. FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

A falta de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica é uma falha muito comum na qual o condutor primário energizado, rompido ou não, entra em contato com uma superfície com alta resistividade elétrica, como um galho de árvore, asfalto, areia ou grama, etc. Geralmente ocorre em sistemas de distribuição com tensões de 4 kV até 34,5 kV e devido à alta impedância do contato, a corrente elétrica de falta possui uma baixa amplitude, variando de 0 A até menos de 100 A (Hou. 2007, Nakagomi. 2006, Tengdin, J. et al. 1996). Contudo, Cordeiro *et al.* (2019) mostra oscilografias reais de FAI na qual o pico de corrente chega a 200 A. A Tabela 1 mostra valores típicos de corrente de falta em sistema de 12,5 kV para diferentes materiais.

A corrente da fase sob defeito, resultante de uma FAI, apresenta valores pequenos em sua magnitude e comportamento transitório parecido com eventos transitórios

Tabela 1. Valores típicos de corrente de falta

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.

típicos de redes de distribuição, como chaveamentos de cargas e banco de capacitores. Por conseguinte, a magnitude da corrente da FAI não é suficiente para sensibilizar os sistemas de proteção de sobrecorrente convencionais, como fusíveis, religadores e relés. Nesse caso, o defeito permanece no sistema de distribuição por tempo indeterminado (Adamiak et al. 2006, Nakagomi. 2006, Santos et al. 2013). Defeitos de fabricação ou poeira na superfície de isoladores também são causadores de FAIs. Caso o poste em questão não esteja aterrado e esteja sobre superfícies de alta impedância, haverá uma fuga de corrente que também não será detectada pelo sistema de proteção (Fanucchi. 2014).

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). Segundo estudos jurídicos, há fundamentos que apontam a responsabilidade parcial ou integral das concessionárias dos serviços públicos de energia elétrica a respeito de danos causados por FAIs. Vale ressaltar que a justiça brasileira é mais propensa a condenar as concessionárias julgadas a pagarem multas indenizatórias às vítimas desses casos (Nakagomi. 2006). Por outro lado, a ocorrência desses casos prejudica a imagem da concessionária e impacta nos seus indicadores de qualidade (Farias. 2017).

Quando a FAI ocorre com o rompimento e queda do condutor primário, existem três possibilidades: contato do condutor(es) primário(s) em superfície de alta impedância somente do lado fonte, somente do lado da carga ou de ambos os lados, como é mostrado na Fig.1. Outra característica da FAI, quando há a presença de corrente, é o arco elétrico (Aucoin and Jones. 1996). Esse é resultado dos espaços de ar devido ao não contato 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 certo limiar, ocorre o rompimento desse dielétrico e o ar torna-se um condutor. O rompimento ocorre quando o campo elétrico acelera os elétrons livres. 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,

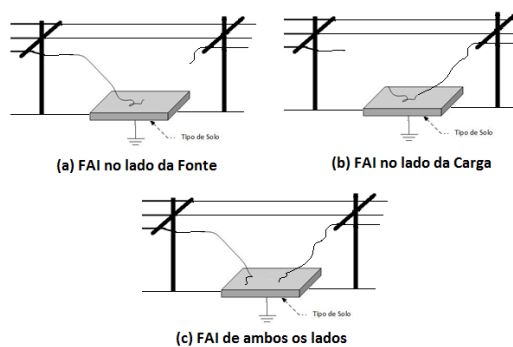


Fig. 1 Possibilidades de FAI por rompimento de cabo.

criando um fenômeno de avalanche. Assim, o arco elétrico é a condução de corrente de forma contínua. Contudo, isso não ocorre de forma imediata, é comum que antes ocorra um centelhamento, que é uma série rápida de rompimentos momentâneos do dielétrico (Nakagomi. 2006).

A corrente gerada possui outras 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;
- Intermitência: 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, sendo as mesmas dependentes das condições geométricas, espaciais, ambientais e elétricas do sistema. Como consequência, as grandezas elétricas envolvidas nessa falha possuem comportamento aleatório (Kaufmann e Page. 1960).

3. PROJETO DO LABORATÓRIO PARA TESTES EXPERIMENTAIS DE FAI

A realização de diversos testes de FAI sem o comprometimento de índices importantes da Concessionária local, a exemplo do DEC, motivou o projeto e a montagem de um laboratório para testes experimentais de FAI em redes aéreas de distribuição, como o objetivo de registrar as diversas características da FAI já registrados na literatura em várias superfícies, sendo o primeiro estágio para a descoberta de aspectos únicos deste tipo de falta, estando sua montagem

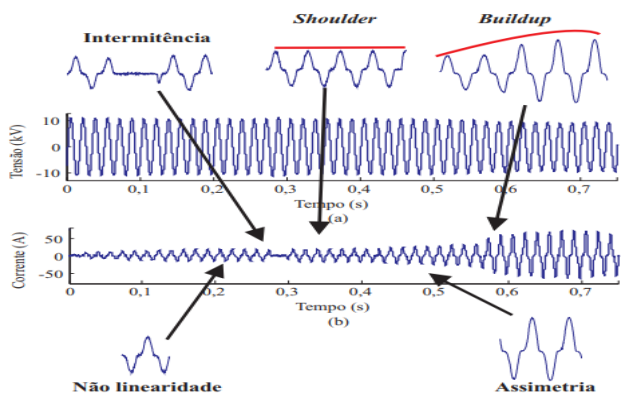


Fig. 2 – Oscilografia real de uma FAI: (a) tensão sem afundamentos (b) corrente de FAI contendo as principais características. Fonte: Nam et al. (2001)

prevista no projeto de P&D ANEEL intitulado “Localizador de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas de Distribuição”.

O projeto do laboratório experimental se iniciou observando o fato da grande maioria das Redes de Distribuição no Brasil serem do tipo aéreas e multiterradas, com o sistema supridor nos níveis de 13,8 kV, 23,1 kV ou 34,5 kV, alimentando transformadores de distribuição em ligação Delta na média tensão e Y aterrada na baixa tensão. A configuração e o nível de tensão de entrega ao cliente final dependem do padrão utilizado pela Concessionária.

Considerando que o propósito do laboratório é poder reproduzir a maior quantidade e tipos de FAIs, viabilizando avaliar inúmeras condições e critérios, muitas deles não abordados em outros experimentos laboratoriais de FAI já documentados (Leão et al. 2019, Santos et al. 2013, Marxsen. 2015, Elkalashy et al. 2006), optou-se por construir uma rede trifásica multiterrada, onde será possível simular FAIs:

- Monofásicas, bifásicas e até trifásicas;
- Com cabos íntegros ou rompidos;
- Com a Rede de Distribuição com carga e sem carga;

Ocorram do lado da fonte, da carga ou em ambos os lados, simultaneamente.

O projeto elétrico do laboratório experimental de FAI (LE-FAI) é mostrado na Fig. 3. A Tabela 2 apresenta os equipamentos e materiais previstos para a construção do laboratório, considerando sua montagem na área de testes do LEAT e alimentação por um dos circuitos da subestação geral, em baixa tensão. Para segurança operacional nos testes, optou-se pelo acionamento remoto do LE-FAI, a partir da área de acompanhamento de testes em alta tensão no LEAT (Leão et al. 2019), motivo pelo qual se inseriu uma Contatora trifásica no início do seu circuito.

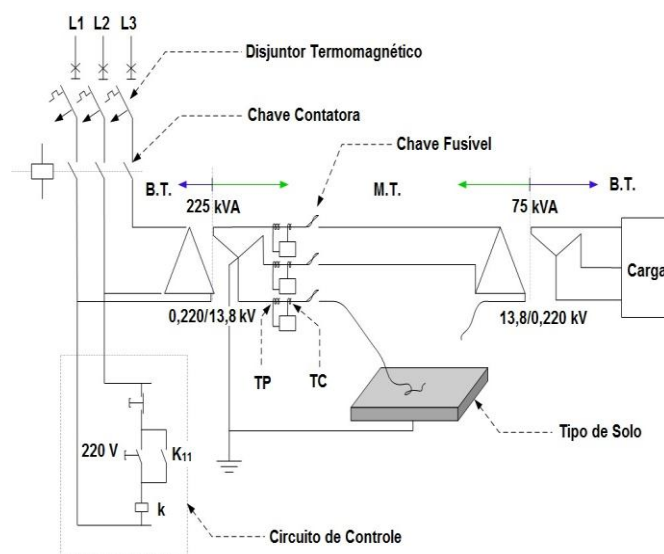


Fig. 3 – Projeto Elétrico do Laboratório Experimental de FAI.

Tabela 2. Equipamentos e Materiais do LE-FAI

Equipamentos e Materiais	Quant.
Contatora	01 Und
Transformador de 225KvA	01 Und
Chaves Fusíveis	03 Und
TCs	04 Und
TPs	04 Und
Relé	01 Und
Condutores	15metros
Transformador de 75 KvA	01 Und

A seguir, são apresentadas as características elétricas dos equipamentos e materiais do LE-FAI.

3.1 Contator: Contator trifásico WEG – CWM. Corrente nominal ($U_e \leq 440V$) de 400A, tensão de comando de 100-240 V 50/60 Hz ou 100-220V DC. 3 contatos principais NA. Contatos auxiliares: 2 NA e 2 NF.

3.2 Transformador de 225KvA: Relação de transformação e ligação: 0,220/13,8 kV (Δ -Y). Impedância de 4,18%.

3.3 Chaves Fusíveis: Tensão máxima de 15 kV, Corrente nominal de 300 A, porta fusível de 100 A, capacidade de interrupção assimétrica de 10 kA. Foram utilizados elos fusíveis de 15 kV e 8K.

3.4 TCs: 03(três) TCs de medição nas fases com relação de transformação 10:1. Tensão máxima de 15 kV. Frequência de 60 Hz. Exatidão 0,3C50. Corrente no primário de 50x100 A e no secundário de 5 A; 01(Um) TC de proteção no neutro com relação de transformação 5:1. Tensão máxima de 15 kV. Frequência de 60 Hz. Exatidão 10 a 100. Corrente no primário de 25 A e no secundário de 5 A.

3.5 TPs: 03(três) TPs de medição nas fases com relação de transformação 120:1. Tensão máxima de 15 kV. Frequência de 60 Hz. Exatidão 0,5P200. Tensão no primário de 13,8 kV e no secundário de 115 V.

3.6 Relé de Proteção: O relé utilizado é da fabricante SEL, Série 751(SEL.2019), o qual possui diversas de funções de proteção e é muito utilizado nos sistemas de distribuição da Concessionária local – CELPA. A proposta inicial era utilizar apenas a oscilografia que ele gera, mas devido as características do LE-FAI e visando o aumento da proteção da rede, tornou-se necessária a utilização das funções de proteção 50/51 - instantânea e temporizada, respectivamente, tanto de fase como de neutro. O SEL 751 possui uma taxa de amostragem de 32 amostras por ciclo. Essa taxa de amostragem é considerada elevada para captura de eventos de curtos de baixa impedância e demonstrou boa reprodução nas oscilografias dos testes de FAI. A relevância do LE-FAI utilizar um modelo de relé de proteção que as concessionárias possuem nas suas SE's, está na possibilidade de que os testes experimentais, reproduzindo as FAIs em condições semelhantes às que ocorrem na realidade, sejam registradas pelos dispositivos que deveriam proteger o sistema, mas que atualmente sequer conseguem identificar estas FAIs. Para garantir o registro das oscilografias pelo Relé, foi

estabelecido o Trip mínimo de 0,5A, para correntes na alta tensão, fazendo com que a própria corrente de partida do Trafo de alimentação da LE-FAI acione os registros pelo relé.

3.7 Condutores: Cabo de alumínio, CA, sem alma, 2 AWG, capacidade de corrente a 75 °C de 207 A, resistência elétrica CC a 20 °C 0,8567, área de 33,64 mm².

3.8 Transformador de 75 kVA: Relação de transformação e ligação: 13,8/0,220 kV (Δ -Y). Impedância de 3,68%.

4. MONTAGEM DO LABORATÓRIO PARA TESTES EXPERIMENTAIS DE FAI

Após a aquisição dos equipamentos e materiais do projeto, e o recebimento do Transformador de 225 kVA que foi adequado para o mesmo através de parceria com a empresa TRAEI Ind. e Com. de Transformadores Elétricos do Pará, iniciou-se a montagem física da LE-FAI, posicionando os transformadores “fonte” e “carga”, os TCs e TPs, as Chaves Fusíveis e os cabos da rede.

Foram iniciadas as conexões elétricas com a instalação da Contatora, a qual controla a alimentação do Trafo de 225 kVA, em baixa tensão, o qual recebe 220V em Delta e fornece 13.8 kV em Y aterrado. O terminal neutro deste Trafo, para maior precisão de medição, foi conectado em série ao TC cuja relação de transformação é de 5:1 e posteriormente aterrado. Os terminais de potencial foram ligados às respectivas Chaves fusíveis e posteriormente conectados em série com TCs, cuja relação de transformação é 10:1, seguindo a alimentação da rede. Os TPs foram ligados em paralelo a todas as fases do Trafo de 225 kVA, sendo a relação de transformação destes 120:1. A montagem física do laboratório experimental de FAI (LE-FAI) é mostrada na Fig. 4(a, b e c).

A utilização de Relé digitais nas subestações para a proteção de redes de distribuição é fato que se tornou corriqueiro, porém o uso destes em pesquisas que buscam identificar e caracterizar FAIs é algo inédito (Leão et al. 2019, Santos et al. 2013, Santos. 2016, Marxsen. 2015, Elkalashy et al. 2006).



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 – Montagem Elétrica do Laboratório Experimental de FAI.

Apesar da taxa de amostragem do Relé 751 utilizado ser de 32 amostras por ciclo, considerada baixa quando comparada com as taxas de registradores digitais que chegam a 256 amostras por ciclo, ressalta-se que a detecção e localização de uma FAI poderão vir a ocorrer a partir das oscilografias registradas por dispositivos deste tipo, principalmente em sistemas radiais de distribuição onde o único ponto de captura de dados é o Relé. Ressalta-se ainda que Santos (2016) obteve oscilografias com 256 amostras por ciclo para levantamento de curvas de FAIs, mas optou por utilizar apenas 32 amostras por ciclo, dentre as 256 registradas.

Devido à limitação de corrente do circuito do LEAT utilizado para alimentação do LE-FAI, estabelecida por seu disjuntor de proteção em 400A e considerando a relação de transformação do Trafo de 225KVA, estabeleceu-se em 6A o limite operativo para as correntes de FAI dos testes, implicando na necessidade de utilização das funções 50/51 do Relé 751 da SEL, além da sua oscilografia já prevista, visando assim evitar a atuação indesejada do disjuntor geral de baixa tensão do circuito que alimenta o LE-FAI. Mesmo com esta limitação na corrente de FAI, as oscilografias dos testes realizados constataram a presença de várias

características de FAI nas correntes registradas, conforme serão demonstradas posteriormente.

5. TESTES E RESULTADOS NO LE-FAI

Foram realizados testes com diversas superfícies de alta impedância para verificar o funcionamento dos dispositivos de comando, os limites práticos de atuação da proteção, bem como a capacidade de captura de oscilografias pelo relé, já que não foram encontrados registros da utilização deste com esta finalidade, e a confirmação de que as correntes obtidas apresentariam características de FAI.

Para direcionar o caminho da corrente de FAI nos testes em algumas superfícies, foi projetada e construída uma caixa (C - 67cm x L - 28cm x A - 12 cm) com fundo impermeável, acima do qual foram postas placas de alumínio recobertas com cobre, estabelecendo desta forma que a superfície em teste seja o dielétrico entre o cabo rompido e o sistema de aterramento do LEAT, quando da utilização deste dispositivo, o qual é apresentado na Figura 5.

São apresentadas a seguir as correntes registradas em alguns testes experimentais realizados, onde foram registradas as todas as principais características de FAI.

5.1 Testes em amostra de Concreto

Os testes realizados com um bloco de concreto seco, posicionado sobre a terra seca, apresentaram correntes nulas (Tengdin, J. et AL. 1996), mas quando a terra estava úmida e o bloco molhado, pode-se verificar a presença de *Shoulder* (Nam et al. 2001), visto na Fig. 06.



Fig. 5 – Caixa de Testes.

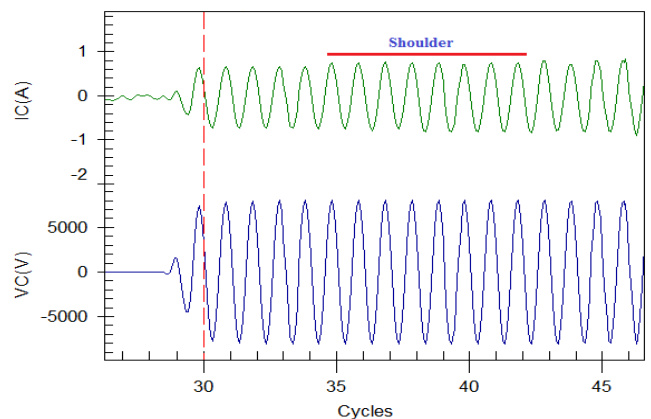


Fig. 6 – *Shoulder* registrado em Teste experimental de FAI em bloco de concreto sobre a terra local úmida.

5.2 Testes em amostra de Concreto de Lama Vermelha

Também foram realizados testes com um bloco de concreto experimental, produzido com rejeito de mineração local chamado “lama vermelha”, que estando seco e posicionado sobre a terra seca apresentaram correntes nulas, mas quando a terra estava úmida e o bloco molhado, verificou-se na corrente a presença de *Não Linearidade* (Nam et al. 2001), vista na Fig. 07.

5.3 Testes em amostra de Grama Molhada

Nos testes realizados com grama molhada sobre a terra úmida, verificou-se na corrente a presença de *Buildup*, *Shoulder*, *Não Linearidade* e *Assimetria* (Nam et al. 2001), vistas na Fig. 08.

5.4 Testes em amostra de Seixo Molhado

Nos testes realizados com seixo molhado sobre a terra úmida, verificou-se na corrente a presença de *Intermitência* (Nam et al. 2001), vista na Fig. 09.

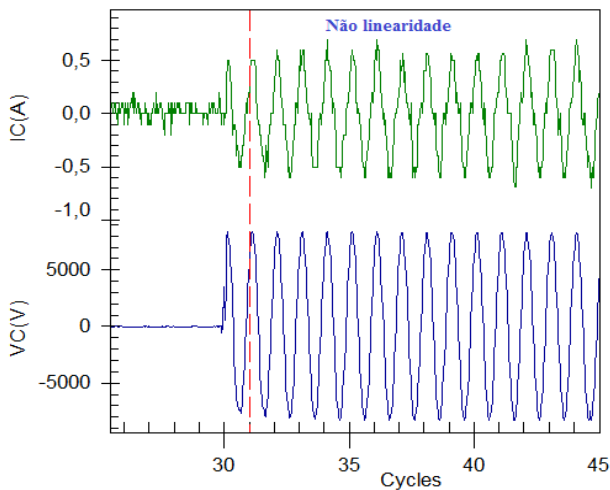


Fig. 7 – *Não Linearidade* registrada em Teste experimental de FAI em bloco de concreto de lama vermelha molhado.

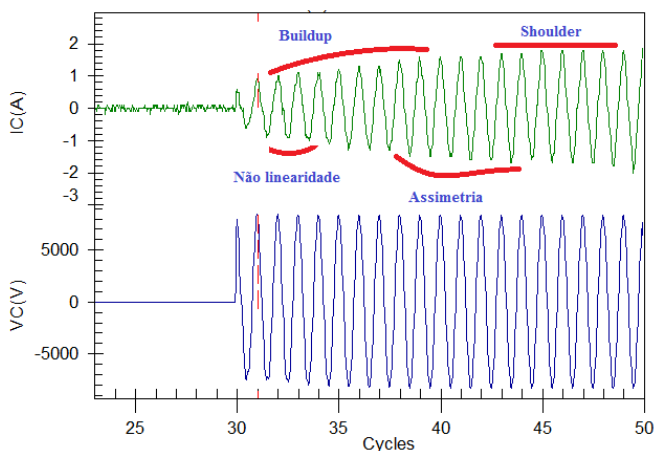


Fig. 8 – *Buildup*, *Shoulder*, *Não Linearidade* e *Assimetria* registrados em Teste experimental de FAI em grama molhada sobre a terra local úmida.

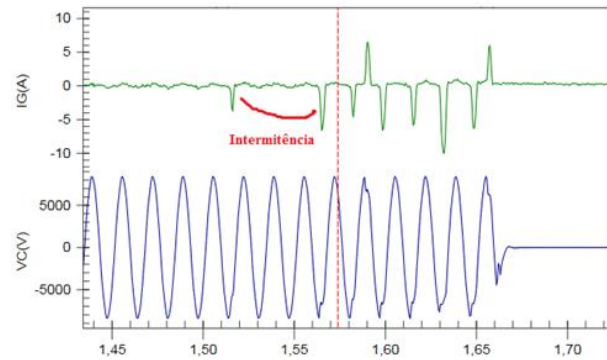


Fig. 9 – *Intermitência* registrada em Teste experimental de FAI em seixo molhado sobre a terra local úmida.

Desta forma, todas as principais características de uma FAI já foram obtidas nos testes realizados na estrutura projetada e montada para esta finalidade.

6. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos, confirma-se que o laboratório apresentado neste trabalho é uma estrutura adequada à realização de testes experimentais de FAI, capaz de simular a ocorrência deste tipo de falta em redes aéreas de distribuição e de realizar o registro adequadamente das tensões e correntes de FAI, bem como de suas características.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Adamiak, M. et al. *High impedance fault detection on distribution feeders*. Protection & Control Journal, Ontario, p. 25-31, abr. 2006.
- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico – PRODIST - Módulo 8, Versão 2018.
- Aucoin, B.M., and Jones, R.H.: *High impedance fault detection implementation issues*, IEEE Trans. Power Delivery, 1996, 11, (1), pp. 139-148
- Chan, D. T. W., & Yibin, X. (1998). A novel technique for high impedance fault identification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(3), 738-744.
- Cordeiro, M. et al. *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, 2019, 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, PSCE2006, 27 Oct-1 Nov 2006, Atlanta, Georgia, USA
- EPRI, "EPRI Report: Detection of arcing faults on distribution feeders", EPRI Final Rep. EL-2767, Palo Alto, CA, USA, Tech. Rep., 1982
- Fanucchi, R. *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, 2014.
- Farias, P. E. *Método para Estimação da Distância de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Diferentes Tipos de Solo*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2017
- Hou, D. *Detection of high-impedance faults in power distribution systems*. In: Annual Clemson University Power Systems Conference, 6, 2007, Clemson.
- Kaufmann, R.H., Page, J.C. *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 1960.
- Lazkano, A., Ruiz, J., Aramendi, E., & Leturiondo, L. A. (2000). A new approach to high impedance fault detection using wavelet packet analysis. Harmonics and quality of power, 2000. In *Proceedings of Ninth International Conference* (Vol.3, pp. 1005–1010).
- 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. *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.
- Marxsen, T. "Vegetation conduction ignition test report—Final," Dept. Econ. Develop. Jobs Transport Resour., Marxsen Consulting Pty Ltd., Sydney, Australia, 2015.
- Moreto, M. (2005). *High impedance faults location in power distribution systems: a methodology based on artificial neural networks*. Master's thesis. Federal University of Rio Grande do Sul. (in Portuguese).
- Nakagomi, R. *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, 2006.
- Nam, S. R., Park, J. K., Kang, Y. C.; Kim, T. H. *A modeling method of a high impedance fault a distribution system using two series time-varying resistances in emtp*. IEEE PES Summer Meeting, 2001.
- Santos, W., Souza, B., Brito, N. D., Costa, F., and Paes Jr., M. (2016). "High impedance faults: From field tests to modeling", *J. Control, Autom. Elect. Syst.*, vol. 24, no. 6, Sep.2013.
- 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, 2016.
- SEL-751 Feeder Protection Relay. Directional Overcurrent, Arc-Flash Detection, and High-Impedance Fault Detection. https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Data%20Sheets/751_DS_20181207.pdf?v=20190218-144115. Consultado em 12.12.2019.
- Tengdin, J. et AL. *High impedance fault detection technology*. Report of PSRC Working Group D15, mar. 1996.
- Yang, M. T., Guan, J. L., & Gu, J. C. (2007). *High impedance faults detection technique based on wavelet transform*. International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering, 1(3), 143–147.