DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2151

Estudo complementar do uso de uma Fonte Ressonante para testes experimentais de Faltas de Alta Impedância em Níveis de Média Tensão.

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**********.**

* Universidade Federal do Pará – UFPA, Centro de Eficiência Energética da Amazônia – CEAMAZON, BR (Tel: 55-91-98834-3255; e-mail: leaoap2017@gmail.com)
** Universidade Federal do Pará – UFPA,Centro de Eficiência Energética da Amazônia – CEAMAZON, BR (Tel: 55-91-98116-6285; e-mail: tostes@ufpa.br)
*** Universidade Federal do Pará – UFPA, Grupo de Sistemas de Energia e Inovação - GSEI, BR (Tel: 55-91-98205-1245; e-mail:jpavieira@ufpa.br)
**** Universidade Federal do Pará – UFPA, Centro de Eficiência Energética da Amazônia – CEAMAZON, BR (Tel: 55-91-98133-1443; e-mail: bira@ufpa.br)
***** Equatorial Energia, BR (Tel: 55-91-98183-7155; e-mail: marcelo.costa@equatorialenergia.com.br)
****** Universidade Federal do Pará – UFPA, Grupo de Sistemas de Energia e Inovação - GSEI, BR (Tel: 55-91-98452-8288; e-mail: adrealsousa@gmail.com)
******* Universidade Federal do Pará – UFPA, Grupo de Sistemas de Energia e Inovação - GSEI, BR (Tel: 55-91-98561-2977; e-mail: riderheringer@gmail.com)
******** Universidade Federal do Pará – UFPA, Grupo de Sistemas de Energia e Inovação - GSEI, BR (Tel: 55-91-98240-2971; e-mail: murilloaugustocordeiro@gmail.com)
********* Universidade Federal do Pará – UFPA, Grupo de Sistemas de Energia e Inovação - GSEI, BR (Tel: 591 78781899; e-mail: juancarloshuaquisaca@gmail.com)
**************Equatorial Energia, BR (Tel: 55-91-98183-7155; e-mail: lucas.pinheiro@equatorialenergia.com.br)

Abstract: The high impedance fault (HIF) is characterized by the contact of a cable energized in high or medium voltage on a high impedance surface, producing an insufficient current to sensitize the protection devices leaving the system energized, which can cause several damages and even deaths of animals and humans. The practical experiences that replicate the HIF are useful for a better understanding of its characteristics, making obtaining them experimentally an arduous task. This work presents considerations and experimental results of the complementary analysis of the feasibility of using a Resonant Source (RF) in a high voltage laboratory, already proposed as a tool for experimental studies of HIF due to the good results initially obtained there. In this article, conclusive results are presented about the possibility of recording the HIF oscillographs produced by the FR and the continuity of its use in these studies.

Resumo: A falta de alta impedância (FAI) é caracterizada pelo contato de um cabo energizado em alta ou média tensão em uma superfície de alta impedância, produzindo uma corrente insuficiente para sensibilizar os dispositivos de proteção deixando o sistema energizado, podendo causar vários danos e até mortes de animais e seres humanos. As experiências práticas que replicam a FAI são úteis para uma melhor compreensão de suas características, sendo a obtenção experimental destas uma tarefa árdua. Este trabalho apresenta considerações e resultados experimentais da análise complementar da viabilidade do uso de uma Fonte Ressonante (FR) em um laboratório de alta tensão, já proposta como ferramenta para estudos experimentais de FAI devido aos bons resultados inicialmente nela obtidos. Neste artigo são apresentados resultados conclusivos sobre a possibilidade de registro das oscilografias de FAI produzidas pela FR e da continuidade do uso desta nestes estudos.

Keywords: Electrical Distribution Systems; High impedance faults; Protection of Electric Power Systems; Resonant Source.

Palavras-chaves: Sistemas de Distribuição Elétrica; Faltas de alta impedância; Proteção de Sistemas de Energia Elétrica; Fonte Ressonante.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia são passives da ocorrência de diversas falhas. Um tipo em especial chamada, falta de alta impedância (FAI), é uma causa constante de preocupação e pesquisa, principalmente em redes de distribuição aéreas. A FAI acontece quando há o contato de um condutor energizado do circuito da rede primária com uma superfície de alta resistência elétrica como árvore, asfalto, concreto, areia, grama, seixo, etc., podendo expor a

população ao risco de choque elétrico, comprometer a integridade de equipamentos do sistema, causar graves danos à bens materiais e florestas. Este problema ocorre tipicamente em redes aéreas de distribuição rurais, devido predominantemente à topologia radial, com alimentadores de grande extensão e que cruzam longos trechos desabitados (Santos et al, 2013).

São dois os tipos de FAI, a ativa e a passiva. Uma FAI passiva é caracterizada pela inexistência de arco elétrico, quando o condutor não fornece nenhuma indicação da presença de energia, sendo mais difícil sua detecção e localização. Algumas soluções são apresentadas na literatura com base na análise de desequilíbrio de fase (Balser et al, 1986) e outras com a utilização de Lógica Fuzzy (Monsef et al, 1997; Jota and Jota, 1998). A FAI ativa, por sua vez, registra a presença de um arco elétrico no fim do cabo partido (Aucoin and Jones, 1996). São propostas na literatura técnicas para sua detecção a partir das freqüências harmônicas e não harmônicas geradas pelo arco (Sultan et al, 1994; Russell and Chtnchali, 1989; Mamishev et al, 1996); a utilização do espectro de baixa frequência da corrente (Emanuel and Gulachenski, 1990); a variação incremental de potência harmônica de ordem par (Kwon et al, 1991); as variações de energia em uma faixa específica de frequência (Kim and Russel, 1988); a corrente RMS com harmônicos específicos (Sheng and Rovnyak, 2004); os coeficientes Wavelet das correntes de linha (Lai et al, 1991); Técnicas de Mineração de Dados (Masa et al, 2012), entre outros.

A detecção e localização de uma FAI são importantes problemas de proteção e ainda não resolvidos, especialmente em redes de média tensão (MT) de estrutura mista com linhas aéreas e multiaterradas. Identificar uma FAI em redes de distribuição de média tensão (MT) não é corriqueiro, já que a corrente é muito baixa, por vezes menor que a corrente de carga do alimentador, a depender da rede e do seu tipo de aterramento (Michalik et al, 2006). Buscando a diminuição na duração das interrupções e dos custos ocasionados pelas FAI, as distribuidoras do setor elétrico têm investido no desenvolvimento de soluções que automatizem a restauração de energia, sendo relevante, para este propósito, terem 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. Em termos de estado da arte, este é um tópico recente e de importância crescente (Chan and Yibin, 1998; Lazkano et al, 2000; Moreto,2005; Yang et al, 2000).

A impossibilidade do comprometimento de índices relevantes de qualidade que as distribuidoras precisam atender, a exemplo do DEC e FEC (ANEEL, 2018), os impactos causados pela ocorrência de FAI nas redes de distribuição e os riscos envolvidos nas operações com condutores vivos de altas tensões, são fatores complicadores da reprodução deste evento na rede real para estudos mais detalhados das suas características de corrente e tensão. A realização de testes experimentais de FAI requer a mobilização de consideráveis recursos humanos e materiais, o que em parte justifica a pequena quantidade de trabalhos práticos (Santos et al, 2013; Emanuel and Gulachenski, 1990; Carpenter et al, 2005; Masa et al, 2012), se comparados aos estudos feitos através de simulação computacional (Santos, 2016; Santos et al, 2017; Balser et al, 1986; Jota, 1996; Jota and Jota, 1998; Michalik et al, 2006; Kwon et al, 1991; Sheng and Rovnyak, 2004; Lai et al, 1991; Chan and Yibin, 1998; Lazkano et al, 2000; Moreto,2005; Yang et al, 2000).

Este artigo apresenta os resultados de estudos complementares de testes experimentais de FAI usando uma fonte ressonante, aplicando níveis de tensão, compatíveis a níveis de tensão operativa de redes de distribuição, sobre objetos de alta resistência elétrica. Nas experiências foram aprofundados os estudos das condições técnicas da fonte ressonante, quanto a sua capacidade de reproduzir as principais características de FAI como assimetria, não linearidade, buildup, shoulder e intermitência (Santos et al, 2013), tendo em vista que o tripé de estudo de uma FAI – alta tensão, alta impedância e baixa corrente – já foi confirmado em testes realizados com a FR (Leão et al,2019). O estudo verificou a possibilidade de registro das oscilografias das correntes da FAI produzidas pela FR através da utilização de equipamentos externos a mesma, uma vez que o terminal de controle da FR não oferece esta opção e a obtenção destas formas de ondas ser determinante para a continuidade do uso da fonte ressonante em estudos com este tipo de falta.

2. FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

A falta de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica é uma falha comum e ocorre quando um condutor energizado da rede primária, que pode estar rompido ou não, faz contato elétrico com uma superfície de alta resistência elétrica como asfalto, areia, galho de árvore ou grama, etc. Geralmente acontece 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. Em FAI ocorridas em alimentadores de MT, é comum a existência de arcos elétricos com características específicas como comprimentos de apenas centímetros, correntes abaixo de uma centena de ampères, impedâncias predominantemente resistivas e superfícies de contato não homogêneas. A Tabela 1 mostra valores típicos de corrente de falta em sistema de 12,5 kV para diferentes materiais.

A reduzida magnitude e o comportamento transitório da corrente de FAI a tornam semelhante a eventos transitórios típicos de redes de distribuição, como chaveamentos de cargas e banco de capacitores, sendo tais similaridades um complicador na sua detecção (Masa et al, 2012). Os sistemas de proteção de sobrecorrente convencionais como fusíveis, religadores e relés, não são sensibilizados por corrente de magnitudes tão baixas, ocasionando a permanência do defeito no sistema de distribuição por tempo indeterminado (Adamiak el al., 2006, Nakagomi. 2006, Santos et al. 2013). Quando o contato ou queda do condutor ocorre em via pública, ou em construções, pode provocar queimaduras, eletrocussão e até morte de seres vivos, além de poder causar

aquecimento e combustão de materiais, devido ao alto potencial elétrico (Nakagomi. 2006,Tengdin. 1996).

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 ocorrência destes eventos prejudica a imagem da concessionária e impacta nos seus indicadores de qualidade (Farias, 2017), havendo ainda fundamentos jurídicos que apontam a responsabilidade parcial ou integral das concessionárias dos serviços públicos de energia elétrica em decorrência dos danos causados por FAI, sendo a justiça brasileira propensa a condenar as concessionárias julgadas a pagarem multas indenizatórias às vítimas desses casos (Nakagomi. 2006).

Mesmo possuindo similaridades com eventos transitórios típicos de redes de distribuição, a corrente de FAI possui características próprias que a distingue de outras falhas, principalmente devido ao arco elétrico, além da baixa amplitude, que são (Nakagomi. 2006, Nam et al. 2001, EPRI. 1982). Estas características são listas abaixo e ilustradas na figura 1:

- 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.

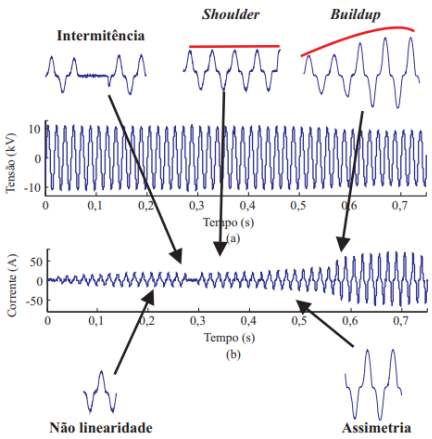
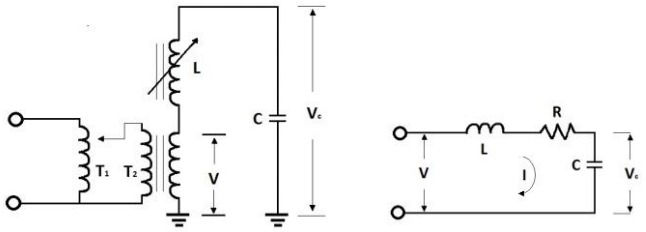


Fig. 1 Oscilografia real de uma FAI: (a) tensão sem afundamentos (b) corrente de FAI contendo as principais características. Fonte: Nam et al. (2001)

A ocorrência destas características, contudo, depende 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. A FONTE RESSONANTE (FR) DO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO (LEAT)

A fonte ressonante (FR) é normalmente utilizada para testes de capacitância realizados em transformadores, buchas, cabos, etc., onde é aplicado o princípio da ressonância na frequência nominal (60Hz) para obtenção altas tensões sobre os dispositivos em teste. Um esquema simplificado típico de um teste de ressonância em série é apresentado na figura 2 (a). O autotransformador variável T_1 controla a excitação do transformador T_2, o qual fornece tensão para o circuito ressonante e isola da linha o objeto em teste. O Capacitor **C** representa a capacitância do objeto que está sendo e há uma capacitância em paralelo, como divisor de tensão. O indutor **L** representa o reator variável, o qual tem sua reatância ajustada para coincidir com a impedância capacitiva de **C**, fazendo com que o circuito entre em ressonância.



(a) (b)

Fig. 2 – (a) Esquema simplificado de um Teste Série b) Circuito Equivalente da FR.

O circuito equivalente para o sistema série ressonante, assumindo que o transformador de excitação não apresenta perdas, é visto na figura 2 (b), neste circuito todas demais perdas entre os componentes reativos e capacitivos são representadas pela resistência em série R**.**

Quando o circuito está em operação e entra em ressonância, a reatância indutiva torna-se igual à reatância capacitiva (X_L=X_C), de onde se pode deduzir que Q = wL/R = 1/wRC, sendo o parâmetro Q chamado de Fator de Qualidade do circuito ressonante, o qual fica na faixa de 50 a 80 para cargas com altos valores capacitivos. Na ressonância, a corrente (I) observada no circuito está em fase com a tensão do transformador, pois as tensões sobre o reator e o capacitor se anulam e a tensão aplicada sobre a resistência igual a tensão da Fonte (V). O Laboratório de Alta Tensão (LEAT) da Universidade Federal do Pará (UFPA) possui uma Fonte Série Ressonante Hipotronics – Modelo MSR800-8M0-131AF, cujas características dos reatores e do transformador de excitação são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Características Elétricas Individuais Dos Reatores da Fonte Ressonante.

Tensão	400 kV
Corrente	10 A
Potência	400 kVA
Faixa de Variação	3.3nF – 66.3nF @ 60Hz
Excitação Máxima de Tensão	30 kV
Diâmetro do Anel contra Corona	3045mm 119.9 in.
Nível do Óleo	82,45 mm abaixo da referência @25º C
Refrigeração	ONAN – 01 hora máxima, 50% ciclo de trabalho

Tabela 3. Características do Transformador de Excitação

Modelo	EXC30-300-3135-1
Faixas de Entrada	0-3135 V @ 0-96 A
Faixas de Saída Tap 1 Tap 2 Tap 3	30 kV, 300kVA, 10 A 20 kV, 200kVA, 10 A 10 kV, 300kVA, 30 A
Tipo	Transformador à óleo/ Secundário Variável
Comprimento	1238 mm
Largura	1334 mm
Altura	1153 mm
Peso	1675 kg
Volume de Óleo	550 litros
Refrigeração	ONAN

Duas perspectivas da FR podem ser observadas na figura 03 (a) e (b), onde são identificadas os seus componentes.

A configuração atual da FR utiliza a associação em série dos dois módulos de reatores, a qual possibilita que sejam realizados testes com aplicações de tensões até 800 kV, correntes máximas de 10 A e Potência nominal de 8000 kVA. Nestas condições, para a frequência de 60hz, a faixa de sintonia do reator equivalente fica entre 1,7 e 33,2 nF, podendo ser testados objetos com capacitâncias variando entre 0 e 28,2nF.

A configuração atual da FR utiliza a associação em série dos dois módulos de reatores, a qual possibilita que sejam realizados testes com aplicações de tensões até 800 kV, correntes máximas de 10 A e Potência nominal de 8000 kVA. Nestas condições, para a frequência de 60hz, a faixa de sintonia do reator equivalente fica entre 1,7 e 33,2 nF, podendo ser testados objetos com capacitâncias variando entre 0 e 28,2nF.

O controle da FR é realizado através do seu Terminal de Operação OT248, cuja imagem é apresentada na figura 4. Nele é possível estabelecer os limites de tensão a serem aplicados no objeto de teste, podendo variar de 0 kV até os respectivos valores máximos de TAP ou condições do circuito. Pode-se ainda definir previamente o tempo de duração do teste e o modo de operação "Auto Tuning", opção na qual o controle do sistema busca ajustar automaticamente o circuito para operar em ressonância. Diversos testes que podem ser realizados na FR e várias são as funções disponíveis através do Terminal OP248, contudo, não existe neste terminal, nem em outro dispositivo da FR o registro das oscilografias das tensões e correntes verificadas do circuito, nem a possibilidade de obtenção desses dados através de saídas dedicadas para esta finalidade. Devido a esta limitação, inicialmente foram realizados testes usando apenas os recursos originalmente disponíveis (Leão et al, 2019). Os testes de FAI na FR visando o registro das oscilografias por equipamentos externos são mostrados neste artigo.

(a) (b)

Fig. 3 – Fonte Ressonante do LEAT a) Vista de dentro da sala de Operação b) Vista na área de testes. Fonte: Autor

Fig. 4 – Terminal de Operação OT248 da Fonte Ressonante. Fonte: Leão,2019

4. CARACTERÍSTICAS DE FAI OBTIDAS EM TESTES EXPERIMENTAIS COM A FR

Em testes experimentais de FAI na FR com um galho de árvore (Leão et al,2019), foram impostos ao galho diversos níveis de tensão, sendo obtidas correntes de baixa magnitude como as da Tabela 4. O valor de tensão alcançando foi superior a 8 kV (Fase-Neutro), correspondente a 13,8 kV em tensão de linha, nível comumente utilizado nas redes de distribuição, ficando a corrente sempre abaixo 1A. A estrutura física usada para os testes pode ser vista a figura 3.

Para garantir que apenas a impedância do galho estaria em prova, foi aterrada a base do galho (figura 5), fornecendo um caminho único para a corrente. O artigo ressalta que apesar da pequena magnitude da corrente produzida, quando comparada às correntes de eventos como uma falta franca, ela queimou o caminho por onde passou.

É informado que quando a tensão atingiu 8,49 kV o circuito estava em ressonância e a corrente de saída registrada era de 939,3mA, nesta condição, as reatâncias capacitivas e indutivas se anularam, restando apenas as resistências. Como a resistência elétrica do galho de árvore é muito maior que a resistência série do circuito equivalente "R" da figura 2 (b), é possível desprezá-la, estimando pela Lei de OHM a resistência do galho em aproximadamente 9,03 kΩ. Isto

confirmou que a falta esta ocorrendo em uma superfície de alta impedância. Os testes também comprovaram que a FR pode ser utilizada para impor inúmeros valores de alta tensão a objetos de prova e quando estas superfícies possuem impedâncias elevadas, as correntes são muito baixas, características relevantes de uma FAI (Michalik et al,2006).

Tabela 4. Tensões x Correntes em galho de árvore.

Seq.	Tensão (kV)	Corrente (mA)
1	0,937	84,28
2	1,93	337,2
3	2,73	513,8
4	5,8	517,8
5	8,49	939,3

Fig. 5 – Galho aterrado em testes de FAI na Fonte Ressonante. Fonte: Leão,2019

Em outros testes de FAI na FR com uma prova de concreto, feitos para avaliar quais os níveis de tensão a FR seria capaz de impor neste tipo de superfície, foi realizada a elevação gradual da tensão e acompanhado o crescimento da corrente, conforme a Tabela 5. Neles ocorreram o arco elétrico visto na figura 6 (a), tendo seu início em uma tensão inferior a 8 kV, ficando mais intenso com a elevação da mesma, havendo vitrificação na superfície do concreto (figura 6 b) quando a tensão atingiu valores superiores a 17 kV.

Tabela 5. Tensões x Correntes de FAI na FR em prova de concreto.

Ordem	Tensão (Kv)	Corrente (mA)	Ordem	Tensão (Kv)	Corrente (mA)
1	1,82	12,04	11	9,94	505,8
2	4,87	12,04	12	14,26	698,4
3	6,17	24,08	13	10,94	855
4	7,92	72,25	14	18,93	855
5	8,19	144,5	15	20,41	855
6	9,59	204,7	16	14,36	867
7	10	252,9	17	14,50	867
8	13,12	313,1	18	19,45	891
9	14,11	397,4	19	14,12	903,1
10	13,02	445,6	20	17,35	903,1

As características básicas da FAI como altos níveis de tensão, altas impedâncias e baixas correntes, foram confirmadas nos testes feitos na FR, havendo ainda a ocorrência do arco elétrico. Apesar dos resultados obtidos, não houve registro das oscilografias das tensões e correntes no circuito durante as FAI, já que este é um recurso que o Terminal de Operação OT248 não possui, ficando esta lacuna a ser preenchida para qualifica o uso da FR em testes experimentais de FAI.

(a) (b)

Fig. 6 – Testes de FAI na FR em prova de concreto. a) Ocorrência de arco elétrico b) Vitrificação na superfície do bloco. Fonte: Leão, 2019.

5. TESTES VISANDO O REGISTRO DAS OSCILOGRAFIAS DE FAI NA FR

As principais características da FAI apresentadas na figura 1 estão ligadas as formas de onda da corrente, por esta razão, o registro destas oscilografias durante a realização dos testes experimentais de FAI com a FR são indispensáveis. O conhecimento do comportamento real destas grandezas permite levantar as curvas características da FAI, sendo o registro dessas oscilografias ser inédito para muitas superfícies (Santos et al,2013, Masa et al,2012). A correta obtenção destas informações também possibilitará a criação de um banco de dados, a ser usado em estudos para identificação de assinaturas elétricas únicas da FAI em cada uma das diferentes superfícies a virão a ser testadas.

Visando o registro das oscilografias dos testes experimentais de FAI realizados na FR por equipamentos externos, já que este não é um recurso do Terminal de Operação OT248, buscou-se a utilização de equipamentos que tivessem precisão suficiente para captura dos dados dos eventos em estudo, estando disponível para esta finalidade um Analisador de Qualidade de Energia. Verificou-se, contudo, que devido aos elevados níveis de tensão e corrente aplicados pela FR, era indispensável à utilização de transformadores para proteção deste equipamento, possibilitando assim a medição e o registro das oscilografias desejadas. A configuração do sistema de testes experimentais de FAI na FR com a utilização do TP e do TC, os testes com o equipamento de medição (Analisador de Qualidade de Energia) e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

I – Testes com o Analisador de Qualidade de Energia para Registro de Oscilografias.

O equipamento analisador de qualidade de energia disponível consiste em um HIOKI modelo PW3198-90 (figura 7 a), que além de poder registrar oscilografias simultâneas de três (03) fases distintas e o neutro, é capaz de medir harmônicos, interharmônicos, supraharmônicos, transitórios, correntes de *inrush*, oscilações, afundamentos e elevações de tensão. O analisador consiste em um equipamento Classe A de acordo

com a IEC 61000-4-30 e Classe I de acordo com a IEC 61000-4-7. O funcionamento do equipamento descrito consiste na definição de níveis máximos para os distúrbios de QEE mencionados. Dessa forma, caso o analisador detecte alguma violação desses limites na medição efetuada, um evento será então armazenado dentro de uma janela de análise e sob uma determinada frequência de amostragem. Após a detecção do evento, o analisador permite que os dados sejam coletados e posteriormente analisados no *software* do equipamento ou outro *software* que forneça informação adicional em relação às características do sinal.

O analisador possui uma tensão máxima suportável de 600V AC, o que tornou necessária a utilização do TP (Tabela 6) para medição de Tensão. A medição de corrente é realizada através de um sensor tipo garra amperimétrica, sendo disponível o modelo HK-9694 (figura 7 b), cuja faixa de corrente é de 50A/5A, com precisão de 1A, sendo de 300V AC sua a máxima tensão nominal a terra, cujas características são vista na Tabela 7.

(a) (b)

Fig. 7 – (a) Analisador de QEE Hioky PW3198-90. (b) Garra Amperimétrica HK-9694. Fonte: Hioky, 2020 a e b.

Para garantir a integridade do analisador, tendo em vista sua capacidade de isolamento e as tensões aplicadas nos ensaios, apesar da corrente máxima fornecida pela FR na configuração estabelecida ser de 10A, decidiu-se por utilizar o TC (Tabela 6) em série com o "cabo rompido" do teste, garantindo um nível de tensão suportável pelo sensor de corrente. Importa observar que tanto o TP quanto o TC foram cedidos pela Equatorial Pará.

Tabela 6. Características do TP e do TC

TP	01	TC	01
Fabricante	ISOLET	Fabricante	Borteng
Classe de exatidão	0,5P200	Classe de exatidão	0,3C50
Tensão máxima	15 KV	Tensão máxima	15 KV
Frequência	60	Frequência	60 HZ
Tensão primária	13,8 KV	Corrente primário	100 A
Tensão secundária	115 V	Corrente Secundário	5 A
Potência térmica	400 VA	Uso	Externo
Grupo de ligação	1	-	-

Tabela 7. Características do Sensor HK-9694

Corrente de Medição Nominal	Máxima Corrente de Medição
5A AC	50 A (45 to 66 Hz)
Características da amplitude de frequência	Temperatura e umidade de operação
Dentro ±1% at 40 Hz - 5 kHz (Desvio da precisão de amplitude)	0°C até 50°C (32°F até 122°F), 80% RH ou menor (sem condensação)
Taxa de Saída	Precição de Amplitude
10 mV AC/ A	±0.3 % rdg. ±0.02 % f.s.
Diâmetro mensurável do condutor	Máxima Tensão Nominal a Terra
φ 15 mm (0.59 in) ou menor	300 V AC rms ou menor
Precição de Fase	Dimensões e massa
±2° (45 Hz to 5 kHz)	46 mm (1.81 in)W × 135 mm (5.31 in)H × 21 mm (0.83 in)D, 230 g (8.1 oz) Comprimento do Cabo 3 m (9.84 ft), Terminal de saída: BNC

Fonte: Adaptado Hioki, 2020 b.

A estrutura de testes foi montada com o TP em paralelo ao divisor capacitivo e o TC em série como cabo rompido, conforme a figura 8 (a) e (b), sendo os seus terminais secundários utilizados como acesso para o Analisador Hioky visando o registro das oscilografias da tensão e corrente. Os testes foram realizados na mesma prova de concreto já utilizado em testes anteriores (figura 6). Nestes testes, contudo, a tensão foi limitada em 15kV, por ser esta tensão máxima suportável pelos transformadores de medição, sendo o objetivo verificar ser o analisador seria capaz de registrar as formas de onda da tensão e da corrente da FAI produzida pela FR e então comparar as características das formas de onda da tensão e da corrente obtidas com as registradas na literatura. Porém, os registrados feitos pelo Hioky, a exemplo da oscilografia vista na figura 9 com a tensão na parte superior e a corrente na inferior, forneceram detalhes somente para a forma de onda da tensão, ficando os valores das correntes sem qualquer informação útil. Analisando os testes realizados anteriormente (Tabela 5), quando a tensão atingiu 14,12kV, a corrente registrada foi de apenas 903,1mA, logo, se considerar que a relação de transformação do TC utilizado é de 100:5, a corrente disponível no secundário do TC seria de apenas 45mA, muito abaixo da sensibilidade do sensor de corrente utilizado.

A tensão máxima registrada na prova de concreto nestes testes não ultrapassou 5kV, tendo ficado acima 17kV em testes anteriores. Para verificar a influência que cada um dos transformadores de medição utilizados, estes equipamentos foram testados individualmente com a FR.

a) b)

Fig. 8 – (a) Circuito de teste com TP em paralelo. (b) Circuito de teste TC em série e o Hioky. Fonte: Autor.

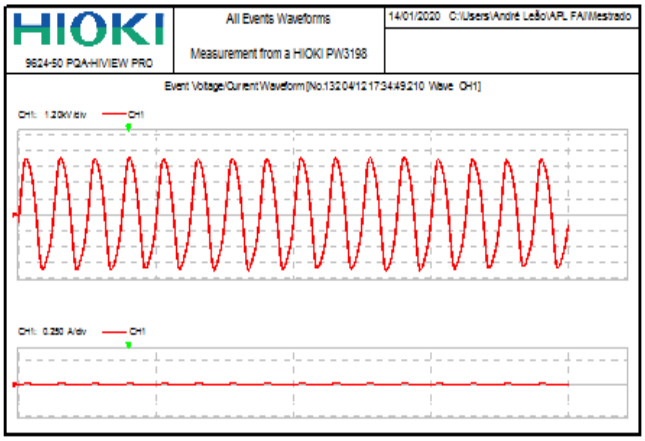


Fig. 9 – Oscilografias da tensão e corrente registradas pelo Analisador Hioky da FAI produzida pela FR sobre bloco de concreto no circuito de teste com TP, TC. Fonte: Autor.

Ficou constatado que a presença do TP, paralelamente ao divisor capacitivo, em nada comprometeu a operação, mas a inserção do TC em série, impactou na impedância equivalente do circuito e consequentemente na sua condição de ressonância, reduzindo os níveis das tensões que FR poderia atingir, as quais são requeridas para testes experimentais de FAI. A figura 10 ilustra o novo circuito equivalente da FR, agora com o TC em série, sendo L_{TC} a indutância do TC.

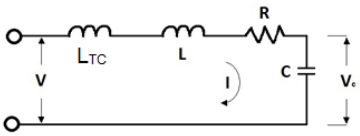


Fig. 10 – Circuito Equivalente com TC em série. Fonte: Autor.

Os testes com o analisador Hioky demonstraram que apesar deste equipamento aparentemente ter condições técnicas de registrar as formas de onda das tensões e correntes de uma FAI, quando elas são produzidas através da FR, torna-se indispensável o uso de transformadores de medição para a adequação dos níveis de tensão aos suportáveis pelo analisador, o que por sua vez compromete a ressonância da FR e impacta negativamente na capacidade de registro o analisador, tendo acesso apenas as oscilografias das tensões, já que os valores de correntes disponibilizados nos terminais secundários do TC ficaram muito abaixo da capacidade de medição do sensor de corrente utilizado. Importa observar que os impactos que a FAI provoca nos níveis de tensão da rede e nas suas formas de ondas são mínimos, mesmo na fase faltante, sendo o registro das características da forma de onda das correntes condições fundamentais para o estudo deste tipo de falta.

5. CONCLUSÃO

A FR certamente apresenta condições de simular parcialmente as características de uma FAI, contudo, por não possuir no equipamento de operação a disponibilidade do registro das oscilografias das tensões e correntes do circuito, requer para esta finalidade a inserção em série de TC, o qual compromete a ressonância do circuito e os níveis de tensão aplicáveis pela mesma, reduzindo significativamente a magnitude da já pequena corrente de FAI, e impossibilitando confirmação das características específicas dessas correntes. Por estas razões, fica desqualificado o uso da FR para testes experimentais de FAI.

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.

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, (I), pp. 139-148.

Balser, J., Clements, K.A., and Lawrence, D.J.: 'A microcomputer-based technique for detection of high impedance faults', *IEEE Trans. Power Delivery*, 1986, 1, (2), pp. 252-258

Carpenter, M. , Hoad, R. R., Bruton, T. D. , Das, R., Kunsman, S. A. and Peterson, J. M. "Staged-fault testing for high impedance fault data collection," *58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2005.*, College Station, TX, USA, 2005, pp. 9-17.

Chan, D. T. W. and 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.

Emanuel, A. E. and Gulachenski E. M. "High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: Contribution to the evaluation of the low frequency spectrum," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 2, pp. 676–686, Apr. 1990.

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.

Hioky, 2020 a. Analisador de Qualidade de Energia PW3198, disponível em: https://www.hioki.com/en/products/detail/?product_key=6503

Hioky, 2020 b. Garra Amperimétrica HK-9694, disponível em: https://www.hioki.com/en/products/detail/?product_key=5626

Jeerings, D. I., & Linders, J. R. (1989). Ground resistance-revisited. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *4*(2), 949–956.

Jota, F.G., Jota, P.R.S., "High-impedance fault identification using a Fuzzy reasoning system". IEEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, no. 06, pp. 656-661, 1998.

Kim, C.-J. and Russell B. D. "Harmonic behaviour during arcing faults on power distribution feedes," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 14, pp. 219–225, 1988.

Kwon,W. H., Lee,G. W., Park,Y. M., Yoon, M. C. and Yoo, M. H. "High impedance fault detection utilizing incremental variance of normalized even order harmonic power," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 6, no. 2, Apr. 1991.

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).

Lai, T. M., Snider, A., Lo, E. and Sutanto, D. "High impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 1, pp. 397–407, Jan. 2005.

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.

Mamishev, A.V., Russel, B.D., and Benner, C.L.: Analysis of high impedance faults using fractal techniques', *IEEE Trans. Power Systems*, 1996, 11, (l), pp. 435-440

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. 2012.

Monsef, H., Ranjbar, A.M. and Jadid, S. 'Fuzzv rule- based expert system for a power system fault diagnosis;, *IEEE Proc. Gem Transm. Distrib.*, 1997, 144, (2), pp. 186-192

Michalik, M., Rebizant, W., Lukowicz, M., Lee, S.-J. and Kang, S.-H.. "Highimpedance fault detection in distribution networks with use of waveletbased algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 4, pp. 1793–1802, Oct. 2006.

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.

Russell, B.D. and Chtnchali, R.P.: 'A signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders', *IEEE Trans. Power Delivery*, 1989, 4, (I), pp. 132-140.

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.

Santos, W. C., Lopes, F. V., Brito, N. S. D. and Souza, B. A. "High-Impedance Fault Identification on Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 23-32, Feb. 2017.

Sheng, Y. and Rovnyak, S. M., "Decision tree-based methodology for high impedance fault detection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, pp. 533–536, Apr. 2004.

Sultan, A.F., Swift, G.W., and Fedirchuk, D.J.: Detection of arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry', *IEEE Trans. Power Delivery*, 1994, 9, (l),pp. 461470

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.

Yu, D. C. & Khan, S. H. (1994). An adaptive high and low impedance fault detection method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *9*(4), 1812–1821.