

Procedimento para Aquisição de Dados de Ultrassom Provenientes de Isoladores Poliméricos Energizados

Elias T. da Silva Júnior*, Francisco J. A. de Aquino[†], Ajalmar R. Rocha Neto[‡], Kaio J. A. Gurgel[§], Antônio E. R. M. de Oliveira[¶], A. D. Klein^{||}, F. M. da Silva^{**}, André Luis C. de Araújo^{††}

Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Email: elias@ifce.edu.br*, fcoalves.aq@gmail.com[†], ajalmar@gmail.com[‡], kaiojag@gmail.com[§], eebanorafael@gmail.com[¶], andre.klein@eletrobrasacre.com^{||}, fredson.silva@eletrobrasacre.com^{**}, andreluiz.ifce@gmail.com^{††}

Resumo—O transformador e os isoladores nas linhas de transmissão são os equipamentos alvo das maiores preocupações. Assim, busca-se a identificação precoce e correção de falhas nestes dispositivos. O trabalho apresentado neste artigo visa a desenvolver um procedimento experimental de aquisição de sinais de ultrassom emitidos por isoladores poliméricos energizados. Sabe-se pela literatura que tais informações podem ser usadas para diagnosticar falhas em isoladores. Foi desenvolvido um circuito eletrônico específico para captar e digitalizar os sinais ultrassônicos na faixa de 40 kHz. O sistema é composto de transdutor de ultrassom, circuito de tratamento do sinal, microprocessador para digitalização e armazenamento do sinal e software básico. Um protótipo foi construído e validado em campo com sinais emitidos por isoladores em diferentes graus de degradação. São mostrados resultados de dados capturados e sua interpretação.

Index Terms—isolador polimérico, ultrassom, efeito corona, monitoramento, diagnóstico.

I. INTRODUÇÃO

Em nossa sociedade, o fornecimento de energia elétrica é um serviço essencial. Quando ocorre alguma falha no sistema com a consequente falta de luz os prejuízos podem ser elevados. O isolador elétrico é um dos elementos sujeitos a falhas, que geralmente são causadas por problemas como umidade, poluição, fissuras e defeitos estruturais, dentre outros. Tais falhas são caracterizadas pela emissão de efeitos elétricos e sônicos que podem ser observados respectivamente por circuitos de captação de radiação eletromagnética e circuitos de detecção de ruídos ultrassônicos [1].

Na atualidade existe uma gama de equipamentos disponíveis comercialmente utilizados na inspeção instrumental das redes de distribuição, podendo-se citar termovisores, isolômetros, rádio frequência e ultrassom [2]. O grande problema verificado é que parte destes equipamentos foi desenvolvido para outras finalidades, principalmente para a aplicação em indústrias.

Os fenômenos elétricos e sônicos ocorrem de forma simultânea. Mais especificamente, os seguintes fenômenos podem ocorrer [3]:

- Arco elétrico: este fenômeno ocorre quando existe um fluxo de corrente elétrica através de espaçamentos em ar; uma descarga atmosférica é um bom exemplo.
- Efeito corona: este fenômeno ocorre quando o gradiente de tensão na superfície de um condutor elétrico (como uma linha aérea de distribuição de alta tensão) excede o valor limite, que é conhecido por gradiente crítico.
- Trilhamento elétrico (*tracking*): este fenômeno ocorre quando existem descargas incompletas, de caráter repetitivo, sobre superfícies isolantes. Em materiais orgânicos, normalmente esse fenômeno resulta em caminhos condutores devido à degradação associada com descargas contínuas e erosão.

Estes fenômenos podem ser modificados pela presença de umidade, chuva, salinidade, outros tipos de poluição, variação da temperatura ou pressão atmosférica, dentre outros. Todos esses efeitos podem ser simulados em laboratório e medidos simultaneamente por vários instrumentos.

Descargas parciais também podem gerar ruídos audíveis e ultrassônicos. Uma vantagem desse tipo de detecção é que ela é imune aos ruídos eletromagnéticos, mas não é imune aos ruídos acústicos presentes no ambiente, o que, por vezes, pode atrapalhar na captura e análise dos dados.

Para monitorar os fenômenos citados acima o trabalho apresentado neste artigo propõe um sistema computacional embarcado que faz a captura e armazenamento de sinais de ultrassom de isoladores poliméricos de 69 kV, utilizando sensores de baixo custo centrados na frequência de 40 kHz.

A razão para o estudo se focar nos isoladores poliméricos é que estes estão sendo cada vez mais empregados nos sistemas de transmissão e distribuição de energia, pois possuem algumas vantagens em relação aos isoladores de vidro, como menor custo no transporte e construção [4].

Este trabalho apresenta um equipamento para digitalização de dados de ultrassom de 40kHz emitidos por isoladores

Trabalho desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL sob o código de registro PD-0026-2013/2013.

A. D. Klein e F. M. da Silva trabalham na 'ELETROBRAS Distribuição Acre'

poliméricos energizados. O sistema foi desenvolvido especificamente para atender às necessidades do sistema elétrico. No final são apresentados e analisados dados capturados com o equipamento desenvolvido. O trabalho apresenta dois pontos de relevância: (1) a possibilidade de avaliar a relação entre as condições de isoladores em operação com a emissão de ultrassom, e (2) a disponibilidade de um equipamento portátil, de custo potencialmente baixo, que possa ser levado a campo para supervisão assistida ou automática de isoladores.

II. REVISÃO DA LITERATURA

As principais técnicas aplicadas na inspeção por instrumentos de redes de distribuição de energia elétrica são baseadas nos seguintes equipamentos: termovisor, ultrassom e radiofrequência [2]. A seguir, são apresentadas algumas das principais características destas técnicas.

A. Ultrassom

A tecnologia do ultrassom baseia-se em detectar ondas sonoras em frequências acima daquelas percebidas pelo sistema auditivo humano. Vale ressaltar que as principais fontes de sinais de ultrassom em redes de transmissão e distribuição são descargas parciais, efeitos corona e trilhamentos [5].

Ondas ultrassônicas são similares a ondas sonoras, uma vez que ambas se propagam em meios materiais. Entretanto, ondas ultrassônicas consistem de ondas sonoras de alta frequência inaudíveis a seres humanos e cuja frequência, em geral, é superior a 20kHz. Vale ressaltar que a faixa de som audível ao ser humano vai de 20Hz a 20kHz, mas que as frequências próximas aos extremos só são audíveis para seres humanos bem jovens ou com uma excelente capacidade auditiva.

A propagação de ondas sonoras pelo ar produz vibrações que mudam a densidade e a pressão (compressão e expansão) do ar ao longo da direção de propagação da onda. Estes padrões de variação de pressão podem ser detectados utilizando um 'detector de ondas', como mostrado na Figura 1.

A frequência e amplitude de ondas sonoras podem ser determinadas medindo-se as flutuações e as diferenças de pressão em ondas sonoras em propagação no ar. Como ondas ultrassônicas são ondas de alta frequência, a sensibilidade do dispositivo detector de ondas de alta frequência apresenta um papel importante na detecção de ondas ultrassônicas. Uma das formas mais difundidas de produzir um sensor sonoro para ondas ultrassônicas é baseada no princípio piezoelétrico, em que uma fina camada de material piezoelétrico, conectado a eletrodos em suas faces, gera sinais elétricos compatíveis com a variação da espessura deste tipo de material [6]. O sensor sonoro utilizado no experimento é baseado na aplicação do efeito piezoelétrico para a detecção de ondas ultrassônica.

O ruído ultrassônico gerado pode ser bastante complicado, formado por muitas componentes de frequência e ocupando uma ampla faixa, podendo chegar a MHz. Entretanto, [7] afirma que mesmo uma pequena descarga parcial produz um ultrassom que se propaga pelo ar e pode ser prontamente detectada por um sensor ultrassom piezoelétrico de 40kHz. Esta frequência tem ainda duas outras vantagens: os sensores

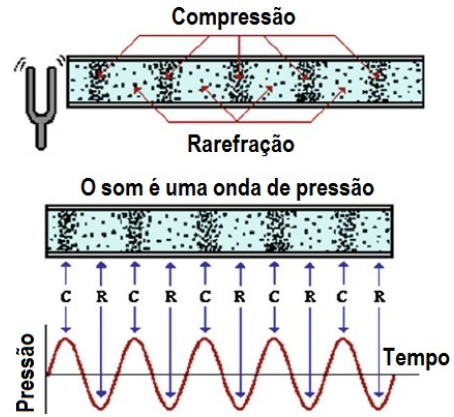


Figura 1. Padrões de variação de pressão e densidade. Adaptado de [6].

disponíveis no mercado possuem maior sensibilidade nesta faixa de frequência e é uma faixa de frequência relativamente livre de ruído ambiente.

Em [8] é utilizada a captura de dados por um instrumento (Ultraprobe 2000 mph) que desloca a frequência capturada para a faixa audível de 20Hz a 3kHz. São usados isoladores de vidro. A frequência capturada pelo instrumento pode estar entre 20kHz e 100kHz. Não é informada a frequência central do misturador que faz o deslocamento, mas o manual do equipamento sugere 40kHz para efeito corona.

B. Outras técnicas

O termovisor utiliza a transmissão de calor para verificar algum ponto de mudança de temperatura no isolador. A transmissão de calor é dada, geralmente, por três modos distintos: convecção, condução e radiação. A transferência de calor por condução e por convecção exigem a presença de um gradiente de temperatura em alguma forma de matéria. Por outro lado, a transferência por radiação térmica não necessita de um meio material. Por este motivo é considerada a forma mais adequada para o uso em diversos processos industriais de aquecimento, resfriamento e secagem. Por mais que a técnica utilizando termovisor seja bastante difundida, existem diversos pontos negativos a serem destacados. Em [9], os autores discutem sobre os resultados ineficientes que a técnica produz quando o estado do material do isolador não está suficientemente degradado. O termovisor apresenta limitações, portanto, produzindo resultados eficientes somente em situações onde se tem avançado estado de degradação do material.

Em [10] são apresentados dois algoritmos desenvolvidos e usados para a reconstrução de imagens obtidas de materiais isolantes, que apresentam falhas e em função destas um aquecimento. O equipamento usado para coletar as imagens é uma câmera infravermelha de alta resolução. Os resultados mostram a eficiência da técnica aplicada em amostras de materiais isolantes em laboratório.

Por fim, a técnica de radiofrequência consiste em captar o espectro de frequência emitido pelo equipamento quando este encontra-se em falha. As descargas parciais e corona, a partir

do ponto de sua geração, produzem ondas eletromagnéticas de frequências características. A radiação de campos eletromagnéticos no espaço é a forma mais eficiente de transmissão de energia e informação [11].

III. DESCRIÇÃO DO SISTEMA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.

A presente seção mostra a descrição do sistema de *hardware* e os procedimentos experimentais utilizados para realizar a captura dos dados de ultrassom provenientes do isolador quando o mesmo está energizado.

A. Descrição do Sistema.

O sistema proposto e implementado para a captação de sinal de ultrassom consiste de um transdutor ultrassom, um sistema de tratamento do sinal analógico e uma metodologia de amostragem e armazenamento da informação digital. As subseções abaixo explicam as características de cada sistema que compõe o protótipo. Na Figura 2 é possível visualizar um diagrama de blocos do sistema com os componentes já citados.

1) *Transdutor Ultrassom*: Para a conversão de sinais ultrassom em corrente elétrica foi utilizado o sensor de ultrassom MA40S4R, fabricado pela muRata. As características de tal sensor podem ser vistas abaixo:

- a faixa de frequência nominal utilizada é de 40 ± 1 kHz;
- a sensibilidade é de -63 ± 3 dB;
- o sensor tem uma diretividade de 80 graus. Vale ressaltar que nos ensaios foi verificado que uma mudança na direção do sensor ocasionava mudanças no sinal recebido;
- a faixa de temperatura suportada pelo sensor vai de -30 a $+85$ graus Celsius.

2) *Tratamento do Sinal*: A etapa de tratamento analógico do sinal consiste em amplificar o sinal de ultrassom captado pelo microfone sonar para níveis de tensão compatíveis com os valores máximos permitidos pelo conversor analógico-digital do sistema microcontrolado (0V a 3,3V). Isto vai permitir uma melhor exploração da resolução do conversor. A amplificação é feita com o uso de amplificadores operacionais em montagem não inversora, consistindo de quatro estágios de amplificação em cascata, de forma que o ganho total é de aproximadamente 2000 vezes, com resposta linear até 40 kHz.

Ruídos podem ser inseridos por diversas fontes, externas ou internas (como a própria fonte de alimentação do sistema). Para amenizar este efeito, foram inseridos circuitos de filtragem em dois dos quatro estágios de amplificação e na entrada de sinal. Os filtros foram dimensionados de tal maneira que as frequências que estão fora da região alvo (em torno de 40 kHz) sejam atenuadas. Os benefícios dos estágios de filtragem são evidentes. É possível ter sinais que são melhor entendidos por microcontroladores e serão mais facilmente tratados do que os sinais não filtrados repletos de ruídos externos.

3) *Aquisição de Dados*: O subsistema de amostragem e aquisição do sinal consiste de uma placa de desenvolvimento STM32F407 DISCOVERY, baseada em um microcontrolador ARM Cortex-M4F de 32 bits com 1 MB de memória de

programa, 192 KB de memória RAM e frequência de 168 MHz. A placa de desenvolvimento apresenta ainda 3 canais de conversão analógico-digital com resolução de 12 bits a uma taxa de até 2,4 milhões de amostras por segundo. Para esta aplicação, foi usada uma taxa de amostragem de 225 mil amostras por segundo, que é suficiente para a captura do sinal de ultrassom desejado. A cada captura, o conjunto de dados e armazenado na memória RAM da placa STM32F407. Em seguida é feita uma gravação em memória *Flash* na forma de um arquivo de texto. Cada captura recebe uma identificação única para que, posteriormente, seja analisado um conjunto de várias capturas. Todo este processo de transferência de dados do ADC para a memória *Flash* é controlado por um software executado no microcontrolador, usualmente denominado de firmware. Em resumo, este software aguarda um comando de ativação oriundo do controle remoto. Ao receber o comando ele ativa o conjunto DMA e ADC para a captura de 5000 pontos e armazenamento dos dados em memória RAM. Ao final deste processo, um novo arquivo é aberto na memória *Flash* e os dados capturados são gravados nele. O passo seguinte é retornar para o estado de espera por um novo comando do controle remoto, o que dará início a uma nova captura.

Como já foi dito, cada arquivo de dados contém 5000 amostras, o que implica numa duração de 22 ms com a taxa de amostragem adotada. Como a frequência da rede elétrica é de 60 Hz, estas 5000 amostras abrangem um pouco mais do que um ciclo completo de 16,67 ms. Este fato é importante, pois foi observado nos ensaios elétricos que os sinais de ultrassom gerados pelos isoladores ocorrem, na sua grande maioria, pelo menos uma vez a cada ciclo. Logo, se a captura fosse menor que um ciclo da rede, poderia ocorrer a não captura de um sinal de ultrassom emitido. A análise dos dados capturados e armazenados é realizada em uma etapa posterior, usando-se um pré-processamento e filtros digitais para a retirada de interferências, ruídos e da componente de 60 Hz.

Na Figura 2 se pode ver os componentes usados no processo de aquisição de dados e suas conexões. O microcontrolador ARM é responsável por programar o conversor Analógico-digital (ADC) para a taxa de amostragem desejada. Um canal de DMA (*Direct Memory Access*) é utilizado para garantir que o intervalo de amostragem entre cada um dos 5000 pontos seja constante. Ele copia diretamente 5000 leituras do ADC na memória RAM. O ARM faz a cópia destes pontos para um arquivo na memória *Flash*. O receptor infra-vermelho é utilizado para que se possa remotamente iniciar um processo de aquisição de dados. Assim, o sistema pode ser instalado em uma torre e acionado remotamente.

4) *Tratamento digital dos dados*: Todos os sinais fora da faixa de 38 a 42 kHz são indesejáveis. Foi projetado um filtro digital FIR para destacar a faixa desejada e reduzir as interferências. Este filtro é do tipo passa-faixa cuja resposta em frequência possui nulos em 0 Hz, 10 kHz, 64 kHz, 83,8 kHz e 112,5 kHz (metade da frequência de amostragem). Com isso, o ganho do filtro na faixa de interesse é praticamente plano e a interferência gerada pelo restante do circuito é eliminada.

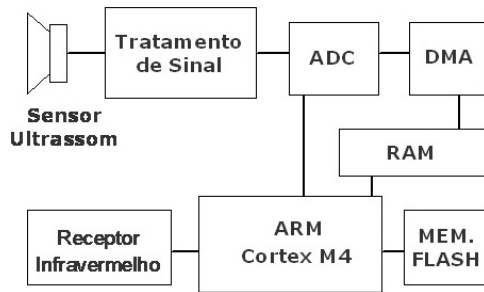


Figura 2. Diagrama de Blocos do Sistema de Aquisição

B. Procedimentos Experimentais

Durante os testes do sistema foi utilizado um osciloscópio digital Tektronix MDO4034. O protótipo e o osciloscópio faziam capturas simultâneas. Desta forma foi possível analisar os dois sinais *a posteriori* e confirmar que eles possuem as mesmas componentes. O osciloscópio fez ainda a gravação da corrente através do isolador, o que permite avaliar alguma condição de falha no isolador e associar com os níveis de ultrassom emitidos. Para confirmar a emissão de ultrassom pelo isolador foi utilizado um detector ultrassônico, modelo SDT-200.

O sistema proposto foi utilizado para captura de dados de ultrassom emitidos por seis isoladores para rede de 69 kV em diversas condições de deterioração. Os isoladores foram ensaiados nas condições: seco e contaminado com poluição salina (seca e úmida). Na Figura 3 é possível ver os isoladores utilizados no ensaio elétrico em questão.



Figura 3. Isoladores utilizados no ensaio

A Figura 4 mostra o diagrama do experimento e as conexões entre os diversos componentes utilizados. Os isoladores foram submetidos a tensões entre 40kV e 45kV.

Para os ensaios, os isoladores foram elevados por cabo, conectados ao terra pela parte superior e energizados pela fase, parte inferior do isolador. Para minimizar interferências, um cano metálico foi usado para envolver o cabo que liga o transformador ao isolador. A sequência para a realização do ensaio foi:

- submeter o isolador à tensão desejada;
- por meio do aparelho SDT-200, verificar se há a emissão característica para as condições físicas e elétricas;

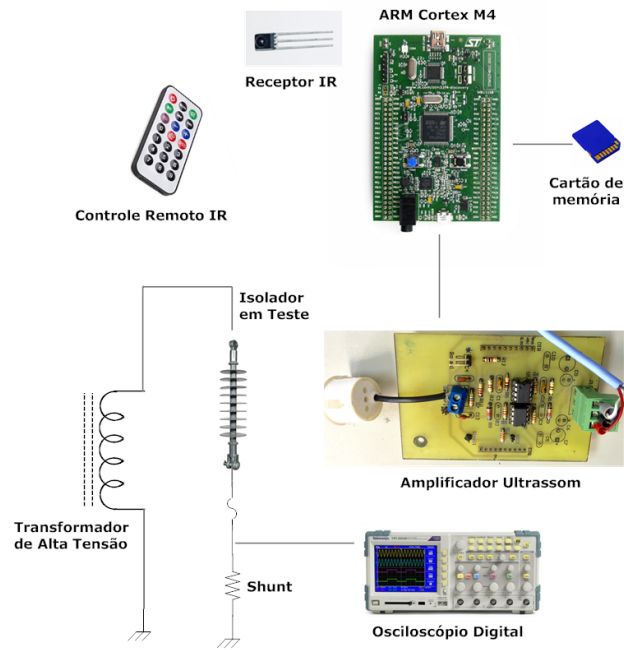


Figura 4. Diagrama do Experimento

- caso, por meio do aparelho SDT-200, seja detectada emissão de algum sinal sonoro peculiar, fazer a aquisição dos dados por meio do protótipo;
- passar para a próxima condição de teste e realizar todos os passos descritos acima.

Para os ensaios, a caixa do protótipo, com o transdutor ultrassônico, foi posicionada a 190 cm do isolador e direcionada para a conexão de fase, onde se observa maior intensidade de emissão de ultrassom. Esta distância garante segurança para a tensão envolvida e permite que uma intensidade de sinal adequada chegue ao transdutor ultrassônico. A Figura 5 mostra o protótipo colocado sobre uma estrutura de andaime. O sistema é alimentado por bateria e tem uma autonomia de aproximadamente 60 horas se forem realizadas 10 (dez) aquisições por minuto.



Figura 5. Caixa do Protótipo

IV. ALGUNS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os arquivos gravados pelo protótipo são do tipo texto, com extensão .CSV. Este tipo de arquivo pode ser facilmente aberto

por ferramentas de tratamento de sinais, como o Scilab. Essencialmente o arquivo contém uma coluna com a numeração da captura e outra coluna com o valor amostrado, separados por ponto-e-vírgula. Cada arquivo contém 5000 pontos (amostras). Estas amostras são processadas digitalmente, conforme os seguintes passos:

- normalização da amplitude do sinal capturado: $v_n(t) = v(t)/\max|v(t)|$;
- retirada do valor médio: $v_n(t) = v_n(t) - \text{mean}(v_n(t))$;
- filtragem digital por um filtro FIR do tipo passa-faixa de apenas 9 coeficientes, cuja resposta em frequência é apresentada na Figura 6.

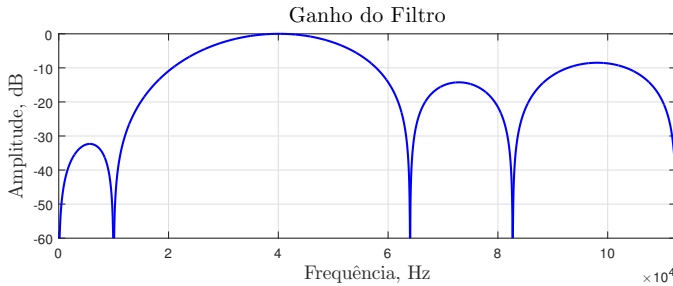


Figura 6. Ganho do filtro digital.

As figuras 7 a 9 mostram alguns dos dados capturados durante os ensaios. Nas três figuras, o gráfico da parte superior mostra um sinal no domínio do tempo, enquanto o gráfico inferior mostra o mesmo sinal no domínio das frequências. A Figura 7 apresenta o sinal emitido por um isolador velho, impregnado com poluição salina e molhado. Nesta situação, mesmo sob tensão nominal, ocorre o fenômeno de *flashover*, com emissão intensa de ultrassom. No espectro do sinal capturado observa-se um conjunto de componentes em torno de 40 kHz, que é característico do ultrassom emitido pelo isolador. Nota-se também uma componente um pouco acima de 80 kHz, que é uma interferência introduzida pela fonte de alimentação do sistema. Analisando o sinal da Figura 7 no domínio do tempo percebe-se que a ocorrência de ultrassom não é contínua, mas esporádica. Ela é uma onda de choque provocada pelas pequenas descargas parciais que ocorrem no isolador.

A Figura 8 foi produzida a partir do mesmo sinal capturado para a Figura 7. Entretanto, aqui o sinal foi filtrado digitalmente para atenuar as interferências e evidenciar o espectro de interesse, situado em torno de 40 kHz. Nota-se, pelo gráfico no domínio das frequências, que as interferências são reduzidas e as componentes de interesse têm sua intensidade preservada.

A Figura 9 apresenta o resultado da captura dos dados de ultrassom para um isolador novo, sob tensão nominal e seco. Nesta condição, a emissão de ultrassom não é significativa. O sinal observado é basicamente ruído e o sinal de interferência gerado internamente pela fonte de alimentação do protótipo. Neste sinal não são observados picos que se destaquem do ruído de fundo. Vale destacar que para o isolador em bom estado a intensidade do sinal de 40kHz esta abaixo de 20dB,

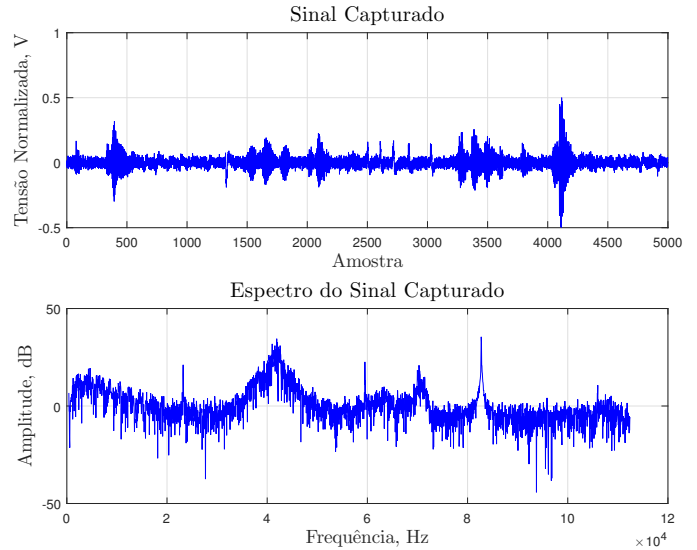


Figura 7. Dados capturados e Espectro dos dados capturados em condição de *flashover*.

ao passo que para o isolador sob descarga a intensidade de ultrassom se aproxima de 30dB. A Figura 10 foi gerada de forma semelhante à Figura 8, e tomando por base o sinal da Figura 9.

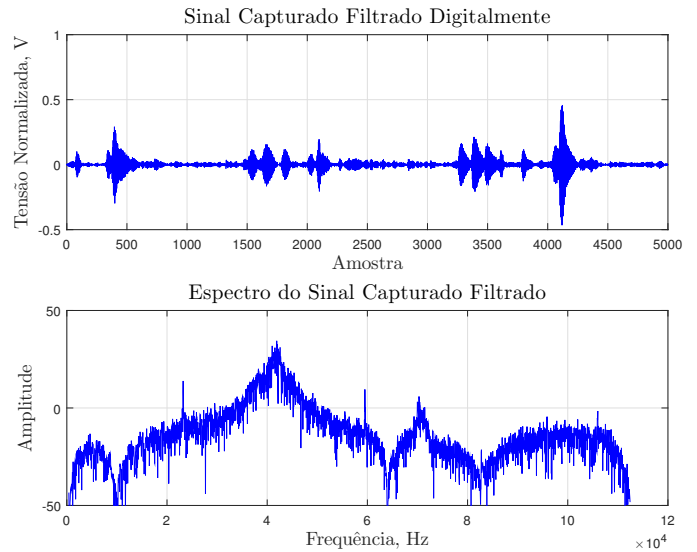


Figura 8. Dados capturados e Espectro dos dados capturados em condição de *flashover* após filtragem digital.

Comparando as figuras 7 e 9, é possível notar, mesmo antes da filtragem, que o ruído de fundo não chega a mascarar o sinal de ultrassom gerado. A filtragem digital destaca os pulsos de ultrassom e melhora a confiabilidade de um sistema de reconhecimento automático da emissão de ultrassom em um isolador energizado. Esta indicação pode ser usada para a sinalização da presença de poluição na superfície do isolador, por exemplo, alertando a equipe de manutenção preventiva antes que ocorra uma falha na rede elétrica.

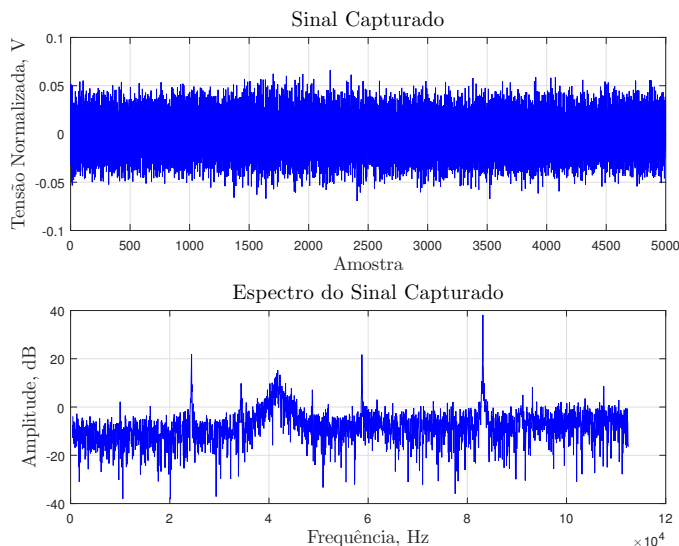


Figura 9. Dados capturados e Espectro dos dados capturados de isolador polimérico *novo*.

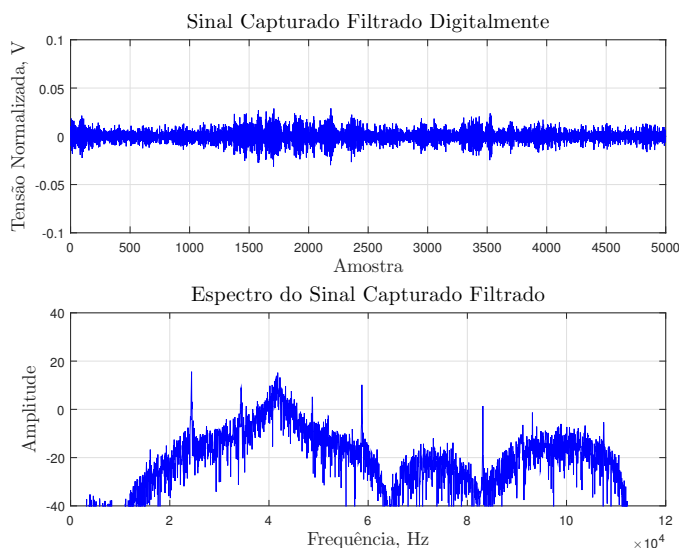


Figura 10. Dados capturados e Espectro dos dados capturados de isolador polimérico *novo* após filtragem digital.

Nas figuras 8 e 10 pode-se ver os sinais capturados filtrados digitalmente e os respectivos espectros de frequência. É interessante notar que após a etapa de filtragem, os picos vistos no domínio do tempo se tornam mais destacados, e o ruído ofusca menos os dados relevantes para análise no domínio da frequência. Fica clara a contribuição de uma etapa de filtragem, especialmente para os casos em que o ruído de fundo tem uma amplitude semelhante ao sinal de ultrassom.

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um protótipo de aquisição de sinais de ultrassom que são emitidos por isoladores poliméricos quando estão energizados. Nos testes de campo o protótipo funcionou como esperado, permitindo a aquisição de um

grande conjunto de dados, que são armazenados em uma memória *Flash*. A partir da análise dos dados obtidos pode-se inferir o estado do isolador e se existe ou não a necessidade de uma ação de manutenção preventiva ou corretiva. A quantidade de amostras capturadas, atualmente 5000 amostras, pode ser ampliada, se houver interesse em cobrir uma quantidade maior de ciclos. O sistema implementado é alimentado por baterias, o que o torna portátil e de fácil instalação em uma torre. Outra característica interessante do protótipo é o acionamento por controle remoto para iniciar a captura dos dados, sendo estes dados armazenados em uma memória externa. Uma estratégia de filtragem digital foi incluída, o que permite atenuar ruídos e outros sinais menos relevantes com o objetivo de preservar o espectro de interesse, neste caso em torno de 40 kHz.

REFERÊNCIAS

- [1] L.E. Lundgaard, "Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 8, no. 5, pp. 34-43, Sept.-Oct. 1992.
- [2] L.P. Alessi, S.K. Ogawa, "Estudo comparativo entre as técnicas aplicadas à inspeção instrumentalizada de redes de distribuição de energia elétrica", 2010. Monografia de Graduação em Engenharia Elétrica, UFPR.
- [3] W. Pinheiro, "A corrente de fuga como parâmetro indicativo do estado de degradação de materiais poliméricos de rede compacta de média tensão, instalados em ambientes agressivos", 2008. Tese de Doutorado, USP - Escola Politécnica.
- [4] F.L.M. Andrade et al, "Avaliação de Isoladores Poliméricos Envelhecidos Naturalmente: um Estudo de Caso", 2014. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, PR.
- [5] H.R.P.M. de Oliveira et al, "Evaluation of the insulation of 15 kV-25 kV feeders and procedures for substitution of damaged units," Electrical Insulation, 2006. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on, Toronto, Ont., 2006, pp. 126-131.
- [6] M. Bruneau, "Fundamentals of Acoustics", 2006. John Wiley & Sons.
- [7] R.T. Harrold, "Acoustical techniques for detecting and locating electrical discharges", Engineering Dielectrics Volume I Corona Measurement and Interpretation. ASTM International, 1979.
- [8] T.V. Ferreira, A. D. Germano and E. G. da Costa, "Ultrasound and Artificial Intelligence Applied to the Pollution Estimation in Insulations," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 583-589, April 2012.
- [9] L. Jermendy et al, "Insulation diagnostic methods," Power System Technology, 1998. Proceedings. POWERCON '98. 1998 International Conference on, Beijing, 1998, pp. 81-85 vol.1.
- [10] T.S. Durrani et al, "Reconstruction techniques for the inspection of composite materials using thermal images," Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988. ICASSP-88., 1988 International Conference on, New York, NY, 1988, pp. 863-866 vol.2.
- [11] R. P. Clayton. "Electromagnetics for Engineers with Applications to Digital Systems and Electromagnetic Interference", John Wiley and Sons. INC, 2004, p. 207.