

Monitoramento *Online* e Diagnóstico de Disjuntores de Alta Tensão a Partir do Sinal Eletromagnético Irradiado

*Adriano Costa de Oliveira¹, Henrique Nunes de Santana¹, Ronimack Tranjano de Souza², Edson Guedes da Costa¹

Universidade Federal de Campina Grande¹, Campina Grande, Brasil

Instituto Federal da Paraíba², João Pessoa, Brasil

*adriano.oliveira@ee.ufcg.edu.br

Resumo—O tempo de abertura/fechamento dos contatos, a sincronização de operação dos contatos e o tempo de duração dos arcos elétricos são alguns dos parâmetros críticos utilizados pelas concessionárias de energia elétrica para avaliar o estado operativo de disjuntores de alta tensão. Neste artigo é apresentado um estudo que visa desenvolver um método não-invasivo capaz de medir diretamente tais parâmetros. O método usa como base o sinal eletromagnético irradiado durante as operações do disjuntor. Os experimentos foram realizados em um disjuntor de média tensão a pequeno volume de óleo com tensão nominal de 17,5 kV e corrente nominal de 630 A. As medições foram realizadas durante a interrupção de uma corrente contínua de aproximadamente 300 A, proveniente de uma bateria estacionária de 12 V. Para isto, foram utilizadas duas antenas direcionais e dois sensores capacitivos. Filtros passa-faixa foram implementados na plataforma Matlab® para o tratamento dos dados obtidos. Os resultados preliminares indicam que o método proposto é capaz de identificar com acurácia o tempo de abertura e a duração do arco elétrico em disjuntores.

Palavras-chave—diagnóstico; duração de arco elétrico; filtragem; monitoramento; sinal eletromagnético irradiado; tempo de abertura.

I. INTRODUÇÃO

Os disjuntores de alta tensão são dispositivos de proteção eletromecânicos projetados para conduzir, restabelecer e interromper correntes elétricas no seu local de instalação. Disjuntores geralmente são acionados para isolar parte de um circuito em caso de sobrecargas ou correntes de falha provenientes de curtos-circuitos. Sendo assim, estes equipamentos devem atuar o mais rápido possível, evitando efeitos térmicos e mecânicos que causam danos às pessoas ou às instalações elétricas protegidas. Portanto, o monitoramento sistemático é um fator determinante para garantir o bom estado operativo dos disjuntores, fazendo com que as exigências básicas do sistema elétrico, como confiabilidade, economia e continuidade do fornecimento de energia elétrica possam ser atendidas [1].

Dentre as principais exigências de um disjuntor em operação, encontram-se: abrir e fechar o circuito no menor tempo possível; conduzir e suportar termicamente a corrente de carga do sistema; suportar térmica e mecanicamente a corrente de curto-circuito do sistema por um determinado tempo, de acordo com as especificações do fabricante; isolar a tensão do sistema em relação à terra e entre seus pólos; possuir resistência mecânica suficiente para suportar as vibrações geradas durante as operações de abertura e fechamento [2].

A necessidade de realizar todas estas tarefas de forma absolutamente confiável inclui o disjuntor entre os equipamentos de maior complexidade instalados nas subestações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Devido a sua complexidade, vários parâmetros devem ser cuidadosamente monitorados e analisados a fim de se avaliar o estado operativo de disjuntores. São eles: tempo de fechamento dos contatos; tempo de abertura dos contatos; sincronização de abertura dos contatos; vibração durante as operações de abertura e fechamento; operação dos circuitos de comando; resistência dos contatos; nível e rigidez dielétrica do óleo (disjuntores a pequeno volume de óleo ou grande volume de óleo); pressão do gás (disjuntores a SF₆ ou ar comprimido) [2,3].

Atualmente, as concessionárias de energia elétrica fazem uso de equipamentos de medição conhecidos como analisadores de disjuntores para aferir a maioria dos parâmetros supracitados. No entanto, o uso de tal equipamento tem certas complicações, visto que sua implementação requer a retirada de operação do disjuntor a ser avaliado.

A retirada temporária de disjuntores de operação para fins de inspeção/avaliação está associada aos diversos custos adicionais, sejam estes relacionados ao tempo de inatividade, à compra de materiais ou à contratação de mão-de-obra qualificada. Alguns trabalhos que estudam os custos envolvidos em trabalhos de manutenção em subestações estimam que a quantidade de homens-hora aproximada para a execução de ensaios operacionais em disjuntores é superada apenas pela quantidade de homens-hora para a execução de ensaios em transformadores [4].

Embora o diagnóstico de disjuntores de alta tensão seja um tema recorrente em vários estudos, muitos apresentando técnicas comprovadamente mais eficientes e confiáveis que as utilizadas atualmente, tais como as apresentadas em [5-7], ainda existe uma relutância muito grande por parte das concessionárias na adoção de novas metodologias. Isto ocorre, provavelmente, devido à dificuldade de aplicação das técnicas, o alto custo dos sistemas de medição necessários para implementá-las, procedimentos de ensaio não padronizados e a falta de validação e testes de viabilidade técnica/econômica das técnicas propostas.

De modo a proporcionar um sistema de monitoramento e diagnóstico mais eficiente e confiável, otimizando a frequência das manutenções, estudos recentes têm focado no desenvolvimento de técnicas capazes de avaliar o estado operacional de disjuntores de forma não-invasiva, a partir de

parâmetros de análise que, até então, não são levados em consideração pelas equipes de manutenção das concessionárias, tais como o ruído acústico, o espectro da radiação de arco e sinais eletromagnéticos irradiados[5-8].

Sendo assim, neste trabalho é proposto um novo método não-invasivo para avaliar o estado operativo de disjuntores baseado na medição dos tempos de abertura/fechamento e da duração do arco elétrico. Estes parâmetros foram obtidos a partir do sinal eletromagnético irradiado durante as operações do disjuntor e a medição foi feita com o auxílio de antenas direcionais e sensores capacitivos. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT/UFCG).

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sinal eletromagnético irradiado durante as operações de disjuntores tem sido o foco de pesquisas recentes relacionadas ao desenvolvimento de técnicas de monitoramento e diagnóstico. A análise destes sinais vem sendo realizada com o objetivo de avaliar, principalmente, o estado do sistema de acionamento de disjuntores e o esforço ao qual os mesmos são submetidos devido à formação de arcos elétricos.

A. Características do sinal eletromagnético irradiado

Com o intuito de investigar os princípios necessários para a compreensão do processo de medição dos tempos de abertura/fechamento de disjuntores e do tempo de duração de arcos elétricos, ensaios foram realizados utilizando dois tipos de antenas direcionais e dois tipos de sensores capacitivos.

A partir de uma análise no domínio da frequência dos sinais eletromagnéticos medidos, observou-se que os mesmos se encontram na faixa de alta frequência e de radiofrequência (30–300 MHz), e são originados a partir de pequenas descargas provenientes de microseparações dos contatos durante o processo de abertura e a partir da formação de arcos elétricos.

O arco elétrico é definido, de forma sucinta, como um fluxo de corrente elétrica através de um meio normalmente isolante, tal como o ar. Sua formação é resultado da ruptura dielétrica do meio, que ocorre devido a um processo de ionização.

Uma característica significativa observada nos sinais eletromagnéticos obtidos com o auxílio de antenas direcionais é que a relação sinal-ruído é relativamente baixa, ou seja, a amplitude do ruído, em alguns casos, aproxima-se do sinal de interesse, muito embora os dois sejam facilmente distinguíveis, o que simplifica processos de tratamento de dados, ao contrário das medições de maior sensibilidade, tais como a de descargas parciais.

O sinal eletromagnético irradiado durante operações de disjuntores é observável em uma faixa de frequência bastante ampla, incluindo frequências abaixo e acima da faixa de radiofrequência [8].

Trabalhos correlatos encontrados na literatura indicam que a tentativa de usar as características do espectro do sinal de radiofrequência irradiado para propósitos de identificação do sinal não é aconselhável, visto que as frequências emitidas são dependentes não apenas do processo de formação do arco, o que é algo variável, como

também das condições do meio onde o arco se forma, tais como a temperatura e a quantidade de impurezas [8].

Os sinais de RF medidos se apresentam como uma sequência contínua de impulsos. Portanto, considera-se que a fonte dos sinais de RF irradiados são as variações de tensão geradas durante as operações do disjuntor e durante a formação de arcos elétricos. Sendo assim, transitórios mais rigorosos, que ocorrem durante instabilidades, produzem emissões mais intensas e com componentes de frequência em uma faixa mais ampla [9,10].

O processo de interrupção de corrente em disjuntores pode ser dividido em etapas. Os instantes de transição entre estas etapas são de interesse desta pesquisa, e podem ser definidos como todos os instantes em que ocorre uma variação na configuração de contato. Devido à característica supracitada, a intensidade do sinal emitido durante estes instantes de interesse é maior, facilitando a obtenção dos tempos de abertura/fechamento e o tempo de duração do arco elétrico.

B. Método de tratamento de dados

O método proposto neste trabalho para a determinação dos tempos de operação e a duração de arcos elétricos em disjuntores consiste em três etapas: medição do sinal eletromagnético irradiado durante operações do disjuntor; filtragem do sinal obtido; identificação dos instantes de interesse do processo de abertura.

Conforme as observações da seção anterior, os sinais medidos nos ensaios utilizando antenas direcionais apresentaram um ruído ambiente cuja intensidade se aproxima do sinal de interesse. Nesses casos, se fez necessário a implementação de filtros digitais para isolar o sinal desejado.

A filtragem dos sinais medidos foi realizada em duas etapas: identificação da faixa de frequência do sinal de interesse e implementação de um filtro digital passa-faixa com o auxílio do *software* Matlab®.

Para identificar a faixa de frequência do sinal eletromagnético emitido durante a operação do disjuntor, foi feita uma análise no domínio da frequência do sinal captado pela antena antes e durante a abertura do disjuntor, ou seja, captando apenas o ruído ambiente e depois captando o sinal completo (sinal de interesse junto com o ruído). A partir da comparação entre os dois sinais, foi possível determinar a faixa de frequência que o sinal de interesse abrange predominantemente.

Conhecendo a faixa de frequência do sinal desejado, um filtro digital passa-faixa do tipo Butterworth foi implementado para eliminar o ruído ambiente. Este tipo de filtro se destaca por possuir uma resposta em frequência bastante plana na banda passante e por manter o mesmo formato para filtros de ordens mais elevadas (porém com uma atenuação mais íngreme na banda rejeitada) [11,12].

Após a etapa de filtragem, uma rotina computacional desenvolvida no Matlab® foi utilizada para detectar os seguintes instantes de interesse do sinal medido:

- Instante de separação dos contatos principais;
- Início do arco elétrico /Instante de separação dos contatos de arco (fim do contato galvânico);
- Instante de interrupção do arco elétrico.

A detecção dos instantes acima foi possível devido à presença de picos de maior intensidade no sinal de RF medido, conforme o que foi apresentado na seção anterior. Sendo assim, a duração do arco elétrico, que é o período entre os dois últimos instantes listados, pode ser obtida diretamente.

A velocidade de abertura dos contatos pode ser obtida a partir da relação entre o comprimento do contato de arco e o período de tempo entre os dois primeiros instantes listados.

C. Método de diagnóstico do disjuntor

Ao projetar e construir um disjuntor, o fabricante deve especificar os tempos nominais de abertura e fechamento mesmo. Tais parâmetros são características de um disjuntor em condições ótimas de operação. A rede elétrica deve suportar os efeitos térmicos e mecânicos provenientes de curto-circuitos durante todo o tempo de abertura.

Qualquer variação significativa dos tempos de operação de um disjuntor em relação aos seus valores nominais são indicativos do comprometimento do seu sistema de acionamento. Sendo assim, deve ser utilizada como um sinal de alerta para as equipes de manutenção.

Sendo assim, o método de diagnóstico proposto nesta pesquisa baseia-se na comparação direta dos parâmetros medidos com os dados do fabricante.

Discrepâncias entre os valores medidos dos tempos de abertura/fechamento dos pólos do disjuntor também devem ser consideradas indicativos de mal funcionamento do sistema mecânico do equipamento.

A duração de arco elétrico também é um parâmetro crítico para a avaliação de disjuntores e não deve ultrapassar os limites estabelecidos pelos fabricantes. O método de monitoramento proposto é capaz de medir diretamente este parâmetro e, portanto, fornece mais uma informação relevante para o diagnóstico.

III. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Os experimentos foram realizados nas dependências do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT/UFCG). Durante os dias de ensaio, a temperatura e a umidade relativa do ar permaneceram em torno de 28°C e 74%, respectivamente.

Para realização dos ensaios, foi utilizado um disjuntor de média tensão a pequeno volume de óleo (PVO) fabricado pela Beghim, modelo PL 15C, com tensão e corrente nominal de 17,5 kV e 630 A, respectivamente. O mesmo foi submetido a uma inspeção interna/externa, a partir da qual foi possível verificar que, de modo geral, o disjuntor encontrava-se em bom estado de conservação física, com um bom nível de óleo nos três pólos e com os contatos moderadamente degradados, como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1. Fotografia dos contatos fixos e móveis do disjuntor ensaiado.

Os sinais eletromagnéticos irradiados durante as operações de abertura do disjuntor foram captados com o auxílio de quatro sensores:

- Antena A: Antena direcional Log-Periódica de banda larga, modelo ETS-Lindgren 106971, com faixa de operação de 10 – 2000 MHz;
- Antena B: Antena direcional que faz parte de um kit de localização de interferência de radiofrequência, modelo 242, com faixa de operação de 270 – 1000 MHz;
- Sensor C: Sensor capacitivo feito de placa de circuito de dupla face em fibra de vidro, com 23,5x2x0,1 cm;
- Sensor D: Sensor capacitivo feito com duas fitas de cobre separadas por fita isolante.

Na Figura 2 são apresentadas fotografias dos componentes supracitados.



Figura 2. Fotografias dos sensores utilizados para captar os sinais eletromagnéticos irradiados.

As medições foram efetuadas durante a abertura do disjuntor, interrompendo uma corrente contínua de aproximadamente 290 A. O sistema de injeção de corrente utilizado é composto por uma bateria estacionária de 12 V ligada em série com resistores produzidos a partir de fios Kantal DS (Cr-Al-Fe).

A captura dos sinais foi feita com um osciloscópio digital de 4 canais fabricado pela Tektronix, modelo MDO4104B-3. Utilizou-se uma resolução de 5 milhões de pontos, resultando em uma taxa de amostragem de 2,5 GHz. Na Figura 3 é apresentado um diagrama de blocos que representa de forma simplificada o arranjo de ensaio adotado. Na Figura 4 é apresentada uma fotografia do arranjo de ensaio montado no LAT, no qual foram feitas medições simultâneas com os sensores capacitivos e com as antenas direcionais.

Os ensaios foram realizados com diferentes tipos de sensores com o intuito de verificar a capacidade de cada um de captar o sinal eletromagnético irradiado. Para facilitar a comparação entre os resultados obtidos entre os sensores, ensaios foram realizados utilizando mais de um tipo de sensor simultaneamente.

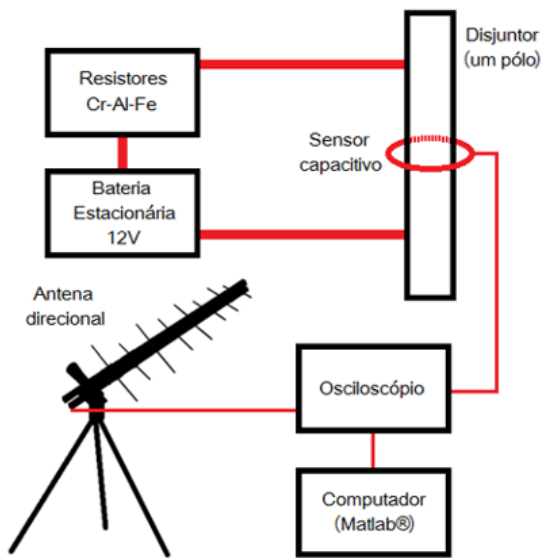


Figura 3. Diagrama de blocos do arranjo de ensaio.

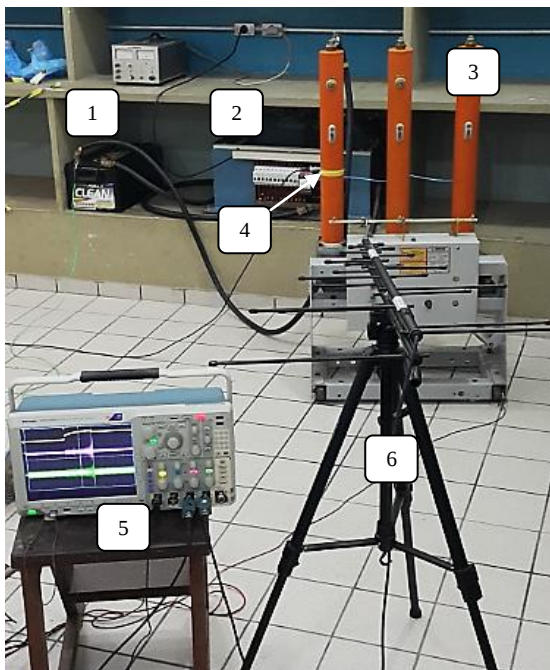


Figura 4. Fotografia do arranjo de ensaio. 1 – Bateria estacionária; 2 – Resistores de Cr-Al-Fe; 3 – Disjuntor PVO; 4 – Sensor capacitivo; 5 – Osciloscópio digital; 6 – Antena direcional.

IV. RESULTADOS

De modo a verificar a eficiência do método proposto na filtragem dos sinais medidos, uma análise inicial foi feita com os sinais obtidos com a antena A.

Uma análise no domínio da frequência foi feita, utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), nos sinais captados pela antena antes e durante a abertura do disjuntor. Na Figura 5 é apresentado um gráfico com os componentes de frequência destes sinais. Para facilitar o processo de filtragem, os gráficos foram plotados em função da frequência normalizada (π .radianos/amostra), visto que o Matlab® a utiliza para obter os parâmetros necessários para o processo de filtragem Butterworth.

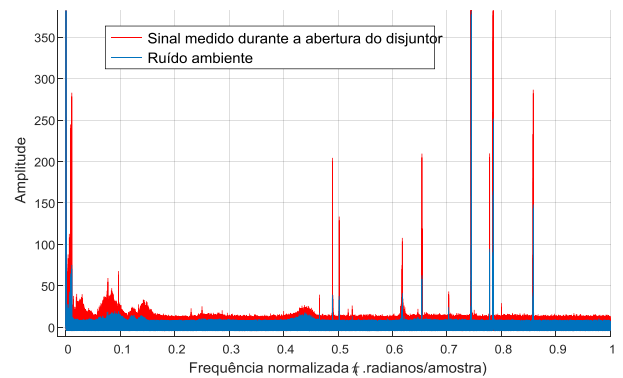


Figura 5. Componentes de frequência dos sinais medidos antes e durante a abertura do disjuntor.

A partir da comparação entre os gráficos apresentados na Figura 5 foi possível perceber que tanto o ruído ambiente como o sinal medido durante a abertura do disjuntor estão presentes, simultaneamente, em várias faixas de frequência, no entanto, entre aproximadamente 0,012 e 0,05 π .radianos/amostra apenas o sinal medido durante a operação do disjuntor apresentou componentes com amplitude significativa. Com esta informação, um filtro Butterworth passa-faixa de terceira ordem foi implementado.

Na Figura 6 é apresentado um dos sinais medidos com a antena A antes e depois do processo de filtragem. Observa-se que filtro utilizado foi capaz de reduzir significativamente a presença do ruído, facilitando a identificação dos instantes de interesse discutidos na seção 2A.

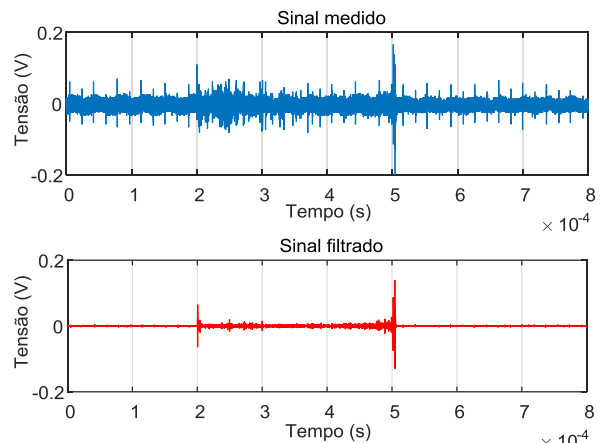


Figura 6. Sinal medido com a antena A antes e depois da filtragem.

No gráfico do sinal filtrado apresentado na Figura 6, verifica-se a presença picos de tensão mais acentuados. Os mesmos correspondem a alterações na configuração entre os contatos. Em aproximadamente 0,2 ms, o pico de tensão é gerado pela separação dos contatos principais. Em

aproximadamente 0,5 ms ocorrem dois picos de tensão muito próximos um do outro, como pode ser visualizado no zoom apresentado na Figura 7.

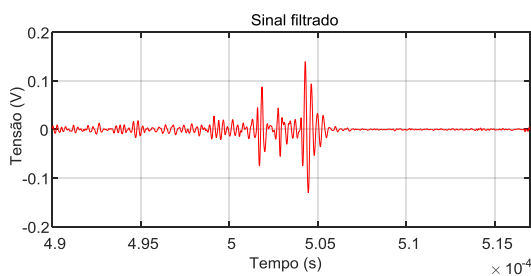


Figura 7. Sinal medido com a antena A (filtrado) no instante de separação galvânica dos contatos.

O primeiro pico de tensão mais acentuado apresentado na Figura 7 ocorre no instante de separação galvânica dos contatos, ou seja, no instante de formação do arco elétrico. O segundo pico de tensão ocorre quando o arco elétrico é extinto. A curta duração do arco elétrico neste ensaio se deveu a dois fatores: a atuação do sistema de extinção de arco do disjuntor (resfriamento e prolongamento do arco com óleo) e as limitações do arranjo de ensaio em relação à reprodução das condições operacionais do disjuntor.

Em campo, o disjuntor sob ensaio é submetido a alta tensão e a alta corrente, porém, nos ensaios realizados, apesar de ter sido gerada uma corrente relativamente alta (aproximadamente 290 A), a tensão de ensaio foi muito baixa (12 V), o que dificulta a sustentação do arco elétrico. Todavia, isto não compromete a capacidade do método proposto de determinar a duração do arco elétrico, que neste caso foi de aproximadamente 2,6 μ s.

Conhecendo-se o comprimento dos contatos de arco (aproximadamente 7 mm) e o intervalo de tempo entre o instante de separação dos contatos principais e o instante de separação dos contatos de arco, foi possível calcular uma velocidade de abertura dos contatos de aproximadamente 23,3 m/s.

O mesmo método de tratamento de dados foi aplicado aos sinais captados pela antena B e o resultado está apresentado na Figura 8. Observa-se que, assim como nas medições realizadas com a antena A, o ruído ambiente captado pela antena B apresentou uma amplitude alta em relação ao sinal de interesse, mas foi quase completamente eliminado após o processo de filtragem. A partir deste resultado, calculou-se uma velocidade de abertura dos contatos de aproximadamente 28,5 m/s.

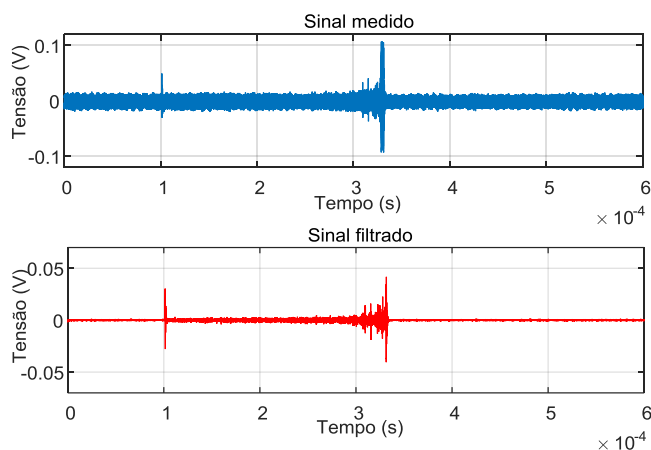


Figura 8. Sinal medido com a antena B antes e depois da filtragem.

Os ensaios com a antena B foram realizados em um pólo do disjuntor diferente do que foi analisado com a antena A. A diferença entre as velocidades de abertura detectada com as duas antenas sugere uma falta de sincronização de abertura dos contatos.

Diferentemente dos sinais captados pelas antenas A e B, os sinais captados pelos sensores A e B apresentaram uma relação sinal-ruído muito alta, como pode ser observado na Figura 9. Portanto, como o sinal de interesse é facilmente distinguível do ruído, não houve necessidade de aplicação de filtros.

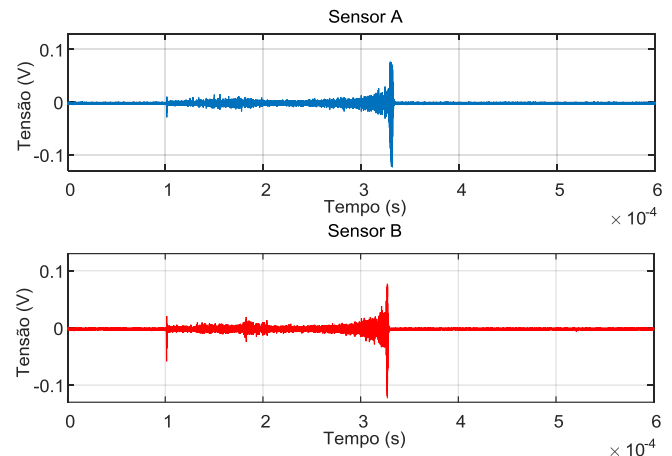


Figura 9. Sinais medidos com os sensores A e B.

O pólo do disjuntor analisado com os sensores A e B foi o mesmo analisado pela antena B e, como esperado, as velocidades de abertura calculadas a partir destes sinais foram praticamente a mesma (28,5 m/s).

V. CONCLUSÕES

O método de monitoramento e diagnóstico proposto neste trabalho se mostrou capaz de detectar a velocidade de abertura dos contatos, a sincronização de abertura dos contatos e a duração do arco elétrico. Sendo estes considerados parâmetros críticos utilizados pelas concessionárias de energia elétrica para avaliar o estado operativo de disjuntores.

O método se destaca por permitir a obtenção dos parâmetros de avaliação utilizando como base somente o sinal eletromagnético irradiado durante as operações do disjuntor, não havendo a necessidade de comparação do mesmo com sinais de referência.

Dois modelos de antenas direcionais e dois modelos de sensores capacitivos foram utilizados nos ensaios desta pesquisa. Apesar de todos serem capazes de medir os sinais eletromagnéticos irradiados, cada um apresenta suas vantagens e desvantagens.

As antenas direcionais proporcionam um sistema de monitoramento praticamente não-invasivo, visto que as mesmas podem ser instaladas a uma distância do disjuntor de modo a não comprometer o isolamento entre os outros equipamentos presentes na subestação. De acordo com os resultados obtidos, observou-se que mesmo o modelo de antena de menor custo foi capaz de medir os sinais de interesse.

No entanto, sistemas de monitoramento por antenas possuem algumas complicações. A relação sinal-ruído é relativamente baixa, o que demanda a aplicação de filtros e uma pessoa capacitada para analisar os sinais medidos. A

principal dificuldade deste método de monitoramento, porém, é a interferência coexistente entre os pólos dos disjuntores trifásicos.

Os sensores capacitivos se destacam por captarem os sinais de interesse com uma alta relação sinal-ruído, não necessitando de filtragem. Além disso, são de extremo baixo custo e facilmente reproduzíveis. Entretanto, a instalação destes sensores ao redor dos pólos do disjuntor pode comprometer o isolamento para a terra e entre fases. Para que os sinais medidos sejam analisados, é necessário a utilização de um dispositivo que trabalhe com altas frequências e um sistema de transmissão de dados que também não comprometa a isolação do sistema.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que os diferentes sensores utilizados (sensores capacitivos e antenas direcionais) apresentaram variações no ganho, porém isto não interfere na eficiência do método de diagnóstico proposto, visto que apenas os tempos de operação são necessários para a avaliação da parte mecânica dos disjuntores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da Coordenadoria de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFCG (COPELE), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] A. C. Oliveira, R. T. Souza, E. G. Costa, W. V. Sousa, "Analysis of Test Current and Contacts' Opening Speed Influences on Dynamic Resistance Tests in Circuit Breakers". *XI Latin-American Congress Electricity Generation And Transmission - CLAGTEE 2015*, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- [2] A. C. Oliveira, "Ensaio de Resistência Dinâmica em Disjuntores: Análise de Sensibilidade da Corrente e da Velocidade de Abertura dos Contatos". Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2015. *Dissertação de Mestrado*.
- [3] R. T. Souza, "Diagnóstico de Contatos de Disjuntores Baseado na Resistência Dinâmica de Contato e Lógica fuzzy". Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2015. *Tese de Doutorado*.
- [4] A. T. L. Almeida, M. E. C. Paulino, "Manutenção em equipamentos elétricos". Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- [5] Z. Wang, J. W. Spencer, J. D. Yan, M. Z. Rong, X. H. Wang, J. E. Humphries, "Optical Monitoring of Electrode Erosion Rate in High-Voltage Circuit Breakers". University of Liverpool, Xi'an Jiaotong University.
- [6] C. Fu, J. Hao, "On-line Monitoring System based on Vibration Signal of High Voltage Circuit Breaker". *Journal of Multimedia*, Vol. 9, No. 4, 2014.
- [7] M. Kezunovic, M. Knezev, Z. Djekic, "Automated Circuit Breakers Monitoring". *Power Systems Engineering Research Center – PSERC*, pp. 01–38, 2007.
- [8] M. Chapman, "Radio-frequency-based determination of arcing duration in HVAC circuit breakers". *18th International Conference on Electricity Distribution, CIGRE*, Turin, 2005.
- [9] E.J. Bartlett, P.J. Moore, "Analysis of power system transient induced radiation for substation plant condition monitoring", *ISE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, no. 3, pp. 215–221, 2001.
- [10] P.J. Moore, "Radiometric Measurement of Circuit Breaker Interpole Switching Times", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 987–992, 2004.
- [11] A. V. Oppenheim, "Signals and Systems: Butterworth Filters". *MIT OpenCourseWare*.
- [12] Anju, M. Katiyar, "Design of Butterworth and Chebyshev1 Lowpass Filter for Equalized Group Delay". *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. ECE, Maharishi Markandeshwar University Mullana, Ambala, 2012.