# Utilização de um SDR para análise de emissões eletromagnéticas oriundas de descargas elétricas parciais

Victor Salvino Borges, Edemir L. Kowalski, Márlio Bonfim, Luiz Felipe R. B. Toledo, Guilherme Cunha da Silva e Ricardo da Cunha Bezerra

*Resumo*— Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de detecção de Radio Interferência de baixo custo baseado em um SDR (*Software Defined Radio*) para detecção e análise de componentes de rádio frequência originadas por descargas parciais em isoladores elétricos usados nas redes de distribuição de energia. Esta técnica é utilizada com a finalidade de avaliar em campo o estado de degradação de isoladores elétricos, antes da ocorrência da falha, garantindo a confiabilidade e manutenção do fornecimento de energia.

# Palavras-Chave—SDR, descargas parciais, inspeção de isoladores, redes elétricas.

Abstract—This paper presents the development of a low cost Radio Interference detection system based on a SDR (Software Defined Radio) for detection and analysis of radio frequency components caused by partial discharges in electrical insulators used in power distribution networks. This technique is used in order to evaluate the degradation state of electrical isolators before the failure, ensuring the reliability and maintenance of the electric power distribution system.

# Keywords— SDR, partial discharges, insulator inspection, power lines.

## I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico tem seu desempenho intimamente ligado à integridade e confiabilidade dos componentes isolantes, sejam isoladores (vidro, cerâmica, poliméricos), vernizes, gases como o SF6, os quais estão presentes em isoladores, transformadores, barramentos, disjuntores entre outros. A degradação e a falha destes componentes podem representar desligamentos não programados do fornecimento de energia elétrica, podendo deixar bairros, cidades ou até mesmo grandes regiões sem energia, o que também impacta diretamente nos índices de continuidade determinados pela Agencia Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (DEC, FEC, DIC, FIC, DMIC) [1], [2].

Considerando este cenário, a manutenção preditiva ganha destaque, pois a confiabilidade e a necessidade de se prever possíveis falhas no sistema de isolamento das redes antes de sua ocorrência, passam a ser prioritárias para o sistema elétrico. Atualmente são aplicadas técnicas específicas na inspeção remota de isoladores, tais como câmeras ultravioletas (câmera corona), ultrassom, termovisão e radio interferência (RFI - *Radio frequency interference*) [3]–[8].

Os isoladores, sejam os empregados na geração, transmissão ou distribuição, possuem processos de degradação semelhantes, normalmente apresentado pelo o surgimento de descargas parciais que podem ser internas, superficiais ou do tipo corona. Por serem descargas elétricas, se manifestam como ondas eletromagnéticas no espectro de rádio frequência, sendo assim possível a detecção destes sinais a partir de equipamentos de RFI [4].

Atualmente os equipamentos de RFI encontrados no mercado são de alto custo, o que inviabiliza sua utilização no dia a dia dos eletricistas em suas atividades corriqueiras. As inspeções somente são realizadas quando surgem reclamações de rádio interferência, estruturas em risco, equipamentos de alto valor monetário ou que exigem alta confiabilidade. Tendo em vista que isoladores são os componentes em maior número instalados no sistema elétrico e que a falha de um único isolador pode levar a prejuízos e efeitos de grandes proporções, seria desejável a inspeção dos mesmos constantemente, com o intuito de prevenção de falhas.

Com esta motivação, está sendo desenvolvido um protótipo de baixo custo de um detector de RFI utilizando um SDR (*Software Defined Radio*) e um computador portátil de baixo custo, os quais serão apresentados neste trabalho.

### II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Alguns conceitos, descrições e dispositivos serão apresentados neste tópico, a fim de contextualizar a problemática abordada.

### II.a. Descargas Parciais

As descargas parciais têm sua terminologia normatizada pela IEC-270 [9] e pela norma brasileira NBR-6940 [10]. Sucintamente define-se descarga parcial como a descarga elétrica que ocorre em uma região do espaço submetida a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa [11].

Estas descargas parciais são classificadas em três tipos: internas, superficiais e do tipo corona. As descargas internas são devidas aos vazios no interior do material isolante, tais como bolhas, que podem ser geradas durante o processo de fabricação dos componentes isolantes. Estes vazios distorcem o campo elétrico no interior do material gerando micro descargas que vão degradando o isolante até a sua ruptura [4], [12]. A Figura 1 ilustra a evolução de uma descarga parcial interna no dielétrico que separa dois eletrodos.



Figura 1. Ilustração da evolução de uma descarga parcial interna [17]

As descargas parciais superficiais surgem a partir do depósito de sujeira e poluição sobre a superficie dos isoladores, gerando o efeito de bandas secas caracterizado pela passagem de corrente elétrica superficial com alta dissipação de calor o que resulta na degradação não uniforme do material isolante. Este efeito também é conhecido como trilhamento elétrico [4], [12]–[14]. A Figura 2 mostra a fotografia de um isolador elétrico retirado de campo devido à degradação por descargas parciais superficiais.



Figura 2. Isolador retirado de campo devido a degradação por descargas parciais superficiais [12]

As descargas parciais do tipo corona são aquela que ocorrem a partir de eletrodos condutores pontiagudos energizados, resultando em uma intensificação do campo elétrico, que quando atinge um valor superior à rigidez dielétrica do meio resulta no efeito de ionização [4], [15], [16].

A Figura 3 apresenta uma fotografía de uma descarga parcial gerando o efeito corona na ponta de um eletrodo.



Figura 3. Eletrodo com efeito corona [18]

II.b. Inspeção instrumental de isoladores por RFI

Quando há o surgimento de descargas parciais em componentes isolantes, observa-se que as mesmas emitem energia das seguintes formas [19]–[21]:

- Emissões eletromagnéticas em forma de radio frequência, luz e calor
- Emissões acústicas na faixa do audível e do ultrassom
- Ozônio e gases de óxido de nitrogênio.

Com base nestas características de emissão, equipamentos para inspeção instrumentalizada de isoladores foram desenvolvidos, tais como equipamentos de ultrassom (emissões acústicas), câmeras ultravioleta (emissões eletromagnéticas de ultravioleta), câmeras termográficas (emissões eletromagnéticas de infravermelho) e equipamentos de Rádio Interferência (RFI) (Emissões eletromagnéticas de rádio frequência).

Por definição RFI é a radiação ou condução de ruído de rádio frequência produzido por equipamentos eletroeletrônicos cujos níveis interferem na operação de equipamentos adjacentes, sendo que as frequências de maior interferência são de 10 kHz a 30 MHz (conduzido) e 30 MHz a 1 GHz (irradiado)[22].

Em trabalhos anteriores [4], [23] os resultados na detecção por RFI apontaram para um desempenho entre 80% e 90% de acertos na identificação de isoladores de pino com defeito, em ensaios realizados em laboratório com isoladores retirados de campo.

# II.c. SDR - Software Defined Radio

Com o crescimento e popularização dos meios de comunicação, que envolvem diversos tipos de tecnologias e modulações, alterar equipamentos de rádio (transmissor e receptor) de maneira fácil e eficiente tornou-se um desafio. A tecnologia de "Radio definido por software" (SDR – *Software Defined Radio*) surgiu em função desta demanda, trazendo flexibilidade, eficiência e baixo custo necessário para a evolução das comunicações [24].

A definição de SDR apresentada pelo grupo de trabalho do IEE P1900.1 diz que um SDR é um rádio onde alguma ou todas suas funções das camadas físicas são definidas por *software* [24], [25]. Isto significa que suas funções operacionais, tais como filtragens e demodulação, são processadas através de um código de programa, que pode ser alterado mediante a necessidade de evolução ou alteração da tecnologia. Com isso, pode-se utilizar o mesmo *hardware* para diversos tipos de rádio, o que reduz significativamente o custo de produção em larga escala.

#### **III. DESENVOLVIMENTO**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas as seguintes etapas:

- Caracterização das componentes de RF das descargas parciais em isoladores de vidro do tipo disco
- Especificação dos componentes:
  - o SDR
  - Computador de baixo custo
- Implementação
- Testes em laboratório

Para definir quais métodos de análise, medição e detecção seriam mais adequados à detecção das descargas parciais nos isoladores, fez-se necessário a caracterização do sinal interferente. Para isso foi montado o arranjo de ensaio como mostra na Figura 4, o qual consistiu em um isolador de disco de vidro com a parte superior aterrada e uma tensão elétrica AC 60 Hz aplicada na parte inferior. Elevou-se a tensão aplicada até que houvesse o início das descargas do tipo corona.



Figura 4. Arranjo de ensaio

Os sinais de rádio frequência foram amostrados no domínio do tempo através de um osciloscópio digital (Tektronix modelo MSO 2012B) com o auxílio de uma antena monopolo (LARSEN modelo NMOQ) colocada a uma distancia de cinco metros do isolador. Esta mesma antena é utilizada por um equipamento de RFI comercial para inspeção de redes elétricas, adotado por concessionárias de energia. Após coletar uma série de dados para diferentes isoladores com estados de degradação diferentes, os sinais foram transformados para o domínio da frequência aplicando-se a transformada de *Fourier*.

As Figura 5 e Figura 6 apresentam as comparações do sinal medido no domínio da frequência (curva preta) confrontado com o ruído de fundo (curva vermelha) respectivamente para um isolador novo submetido a uma tensão de 20 kV e um isolador corroído submetido a tensão de 20 kV.



Figura 5. Espectro de frequência obtido com um isolador novo em duas condições de tensão aplicada, 20 kV (a) e 0 kV (b)



Figura 6: Espectro de frequência obtido com um isolador corroído em duas condições de tensão aplicada, 20 kV (a) e 0 kV (b)

A partir destes resultados verificou-se que para o isolador corroído houve uma intensificação do ruído nas faixas de frequência de 10 MHz, 30 MHz e de 40 MHz a 60 MHz,

Através destes resultados buscou-se no mercado dispositivos SDR que atendessem algumas destas faixas de frequência. Assim encontrou-se um dispositivo SDR que utiliza os circuitos integrados R802T e RTL2832. O R802T é responsável pela sintonia das faixas de frequência e misturador, enquanto que o RTL2832 realiza a conversão analógico-digital do sinal e a interface com um computador. O dispositivo escolhido, que pode ser observado na Figura 7, possui faixa de operação entre 24 MHz e 1850 MHz, dimensões reduzidas e baixo custo.



Figura 7: Interface SDR - RTL2832 e R802T

O dispositivo foi submetido a testes de laboratório a fim de caracterizar a resposta em frequência. Para tal conectou-se diretamente a entrada do dispositivo em um gerador de sinais de RF (Agilent E4432B) configurado para efetuar varreduras em frequência. As Figura 8 e Figura 9 apresentam respectivamente, o ruído de fundo do sistema e a resposta em frequência com o dispositivo sintonizado na frequência de 30 MHz. Os testes foram realizados com um PC utilizando o *software* SDR#.





Figura 9: Resposta do SDR a um sinal de -50 dBm na faixa de frequencia de 28,4 MHz a 31,8 MHz. O sinal medido no centro da faixa (30,1 MHz) foi de -42 dBm, indicando um erro de 8 dBm em relação ao sinal injetado

Identificou-se que para a janela de amostragem de 3,4 MHz houve uma atenuação nos extremos, resultando em uma resposta linear para a faixa central de  $\pm 1,3$ MHz (*span* 2,6 MHz).

Realizou-se também um teste de linearidade em amplitude do SDR, na frequência de 40 MHz. A amplitude do sinal injetado pelo gerador de sinais (Agilent E4432B) foi variada de -70 a -10 dBm e os valores foram comparados com os medidos pelo SDR. Este resultado pode ser visto na Figura 10, onde pode-se observar que o sinal medido pelo SDR possui boa linearidade na faixa de -40 a -10 dBm. Na faixa de -70 a -40 dBm a linearidade é comprometida, provavelmente pela baixa qualidade do misturador e nível de ruído dos componentes utilizados. Esta não linearidade não chega a impactar na detecção das descargas parciais.



Após validação das características do dispositivo que irá fazer a interface do sistema SDR, iniciou-se a fase de implementação do sistema completo utilizando-se um computador de baixo custo do tipo *Raspberry Pi* modelo B+ como apresentado pela Figura 11. Foi realizado o estabelecimento da comunicação entre os dispositivos e operação via software embarcado no próprio *Raspberry Pi*.



Figura 11: Raspberry Pi Modelo B+ com a interface SDR

Foram realizados testes de detecção do efeito corona em isoladores empregando o sistema de medição desenvolvido para comprovação da aplicabilidade do conjunto na detecção de descargas parciais. A descarga corona foi produzida por dois eletrodos, sendo uma ponta energizada com um potencial de 27 kV contra um plano aterrado.

Configurou-se o conjunto para detecção em gráfico *Waterfall* (espectrograma), ajustando os valores de ganho e limites para que fosse possível a detecção do ruído, o dispositivo foi sintonizado na frequência de 40 MHz com uma banda de 1 MHz. Neste ensaio utilizou-se a antena monopolo LARSEN modelo NMOQ conectada ao SDR.

A Figura 12 apresenta o espectrograma codificado em cores (azul: menor amplitude, vermelho: maior amplitude) da medição durante o ensaio de corona utilizando o sistema desenvolvido (SDR+*Raspberry Pi*). O processamento gráfico dos dados é feito no próprio *Raspberry Pi*, que gera uma saída de vídeo no padrão HDMI. A região do gráfico contida no retângulo preto indica as medições do ruído de fundo sem a presença de corona, enquanto que a região contida no retângulo vermelho representa a medição do efeito corona durante o ensaio.



Figura 12: Espectrograma (frequência x tempo) do ruído captado sem (região superior) e com ( região inferior) a presença de descargas parciais

Quando as descargas corona foram iniciadas, percebe-se na região central do gráfico um aumento significativo de pontos vermelhos/verdes indicando o surgimento de componentes de rádio frequência geradas pelas descargas.

#### IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou as etapas do desenvolvimento de um sistema de detecção de RFI de baixo custo baseado em um SDR, voltado para a detecção de descargas parciais em isoladores elétricos. O sistema consiste na integração de uma interface SDR com um computador *Raspberry Pi*, juntamente com um software para comunicação entre os módulos e análise gráfica dos resultados. O sistema é portátil (dimensões e peso semelhantes a um *smatphone*) e será alimentado por uma bateria, proporcionando autonomia da ordem de 2 horas, suficiente para efetuar vários testes em campo. O *software* de processamento gráfico está em fase de melhorias, de modo a permitir uma melhor visualização da presença ou não das descargas parciais.

Estima-se que ao final do desenvolvimento seja possível a obtenção de um equipamento com custo aproximado entre R\$700,00 e R\$800,00, bem inferior aos US\$ 15000,00 a US\$ 60000,00 dos equipamentos comercias disponíveis.

Ao desenvolver um equipamento portátil de baixo custo, pretende-se que o mesmo possa ser utilizado por um maior número de equipes de manutenção das concessionárias de energia. Desta forma pode-se detectar previamente isoladores com defeito antes da ocorrência de falhas, garantindo maior confiabilidade do sistema, desempenho e continuidade de serviço.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Institutos Lactec pela disponibilização da infra estrutura para os testes, aos colegas e amigos que de forma direta e indiretamente contribuíram para o desenvolvimento do presente trabalho.

Os autores agradecem a Eletronorte pela disponibilização de materiais para realização dos testes em laboratório.

Os autores agradecem ao CNPq pelo benefício da lei 810/90.

#### REFERÊNCIAS

[1] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Indicadores de Continuidade." [Online]. Available: http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=79.

[2] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Divulgação dos limites dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI." [Online]. Available: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/srd/indqual/default.cfm. [Accessed: 06-Jun-2014].

[3] L. P. Alessi and S. K. Ogawa, "Estudo comparativo entre as técnicas aplicadas à inspeção instrumentalizada de redes de distribuição de energia elétrica," Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2010.

[4] V. S. Borges, "ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE DETECTOR DE ISOLADORES COM FALHAS," 2011.

[5] A. L. Gorchinski, H. M. S. Amarante, J. L. Kovaleski, E. A. Á. de Matos, and A. C. de Francisco, "Termografia em redes de distribuição de energia elétrica," 2013.

[6] K. Kannus, A. Lehtio, and E. Lakervi, "Radio and tv interference caused by public 24 kV distribution networks," *IEEE Transacion Power Deliv.*, vol. 6, no. 4, pp. 1856–1861, 1991.

[7] American Society for Testing and Materials - ASTM, "Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation," 2012, no. C, pp. 1–20.

[8] P. J. Moore, I. E. Portugues, and I. A. Glover, "Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant," *IEEE Transacion Power Deliv.*, vol. 20, no. 3, pp. 2264–2272, 2005.

[9] IEC - International Electrotechnical Commission, "IEC 270 -Partial Discharge Measurements," *Int. Electrotech. Comm.*, 1981.

[10] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 6940 - Técnicas de Ensaios Elétricos de Alta Tensão Medição de Descargas Parciais," 1981.

[11] A. KREUGER, F.H., GULSKI, E. e KRIVDA, "Classification of partial discharges," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, pp. 917–931, 1993.

[12] D. R. AMBRÓZIO and I. NOVOLAR, "Análise das técnicas de ultra-som e rádiointerferência para verificação da ocorrência de descargas parciais em isoladores," 2009.

[13] R. C. FAGUNDES, "Avaliação de Acessórios Poliméricos de Redes Compactas protegidas por meio de Ensaio de Multiestressamento e Simulação Computacional," Universidade Federal do Paraná, 2008.

[14] K. F. PORTELLA and et al., "Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador," *Quim. Nova*, vol. 31, pp. 340–348, 2008.

[15] M. MUNARO and E. Al., "Fatores de influência na compatibilidade de cabos protegidos, isoladores e acessórios utilizados em redes aéreas compactas de distribuição de energia elétrica, sob condição de multi-estressamento," *Congr. INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM Energ. ELÉTRICA*, pp. 555–560, 2003.

[16] A. A. COSTA, "Aperfeiçoamento do Método FETD para simulação de Descargas Elétricas Não-Lineares.," Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2007.

[17] V. SWINKA FILHO, "Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raios-X pulsado em materiais dielétricos poliméricos," Universidade Federal do Paraná, 2000.

[18] Spellman High Voltage Electronics Corporation, "Spellman High Voltage Electronics Corporation." [Online]. Available: http://www.spellmanhv.com/Technical-Resources/Faqs/Technology-Terminology/What-is-corona.aspx.

[19] The Partial Discharge Academy, "What is PD? Partial Discharge." [Online]. Available: http://www.partial-discharge-academy.com/what-ispartial-discharge. [Accessed: 28-Apr-2015].

[20] J. M. R. De Souza Neto, E. C. T. De Macedo, J. S. Da Rocha Neto, E. G. Da Costa, S. a Bhatti, and I. a Glover, "Partial Discharge Location using Unsynchronized Radiometer Network for Condition Monitoring in HV Substations - A Proposed Approach," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 364, p. 012053, May 2012.

[21] I. E. Portugués, P. J. Moore, I. A. Glover, C. Johnstone, R. H. Mckosky, M. B. Goff, and L. Van Der Zel, "RF-Based Partial Discharge Early Warning System for Air-Insulated Substations," *IEEE Trans. Power Deliv. Power Deliv.*, vol. 24, no. 1, pp. 20–29, 2009.

[22] Curtis Industries, "Understanding Terminology," *Tech. Considerations*, pp. 84–85.

[23] E. KOWALSKI and et al., "Sistema de inspeção instrumental para detecção de falhas em isoladores nas linhas de distribuição," 2006.

[24] Wireless Inovation, "Wirelessinnovation." [Online]. Available: http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.p df.

[25]SDR Forum, "SDRF Cognitive Radio Definitions," SDR Forum,2007.[Online].Available:

http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1\_0\_0.pdf.