

SISTEMA DE DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS COM REDE DE SENSORES SEM FIO E INSTRUMENTO VIRTUAL

RÔMULO A. L. V. DE OMENA*, JAIDILSON J. DA SILVA*, JOSÉ SÉRGIO DA R. NETO*

* *Universidade Federal de Campina Grande*
Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário - CEP 58429-900
Campina Grande
Paraíba, Brasil

Emails: romulo.omena@ee.ufcg.edu.br, jaidilson@dee.ufcg.edu.br,
zesergio@dee.ufcg.edu.br

Abstract— Failures in insulation of power systems equipment can cause irreparable damages and interruption of power supply. A potential cause for these failures is the occurrence of partial discharges. Partial discharges (PD) are electrical discharges that partially bridge the insulation between conductors. The monitoring of this phenomenon is a way to diagnose insulation and take a decision with respect to the equipment. An online system for partial discharge monitoring, with a low cost, can be justified when compared to assets value that operates in a power system. Taking into account this problem, this article proposes a system for partial discharge detection through radio frequency (RF), using wireless sensors network (WSN) and a virtual instrument (VI). The used principle is that transients generated by a PD source irradiates radio frequency (RF) waves. In the proposed system, for the RF detection, it's used an antenna, a RF switch, a RF low noise amplifier, a RF power detector, a microcontroller and a ZigBee module. The data are sent through wireless network to a central node, in which receive data and send to computer. A virtual instrument being executed in computer, indicates the power of detected signals.

Keywords— Partial Discharges, Detection, Localization, RF, RSS Fingerprinting, Wireless Sensors Network.

Resumo— Falhas nos isolamentos dos sistemas de potência podem causar danos irreparáveis e interrupção do fornecimento de energia. Uma das causas em potencial dessas falhas é a ocorrência de descargas parciais. Descargas parciais (DP) são descargas elétricas que atravessam parcialmente o isolamento entre condutores. O monitoramento desse fenômeno é uma maneira de se diagnosticar o isolamento para que decisões possam ser tomadas a respeito do equipamento. Um sistema de monitoramento *online* de descargas parciais, de baixo custo, pode ser justificado quando se comparado ao valor dos ativos presentes num sistema de potência. Tendo em vista esse problema, este trabalho propõe um sistema para detecção de descargas parciais por radiofrequência (RF), utilizando rede de sensores sem fio e um instrumento virtual. O princípio utilizado é de que os transientes gerados por uma fonte de DP irradiam ondas de RF. No sistema proposto, para a detecção do sinal RF utilizam-se uma antena, uma chave RF, um amplificador RF de baixo ruído, um detector RF, um microcontrolador e um módulo ZigBee. Os dados são enviados através da rede sem fio para um nó central, no qual recebe os dados e os envia para um computador. Um instrumento virtual sendo executado no computador, contém indicadores das potências dos sinais detectados.

Keywords— Descargas Parciais, Detecção, RF, Rede de Sensores sem Fio.

1 Introdução

Aparatos de alta tensão são os mais caros e os mais críticos equipamentos de qualquer sistema de potência. A falha desses equipamentos levam à perdas catastróficas e interrupção indesejada do fornecimento de energia. A maioria dessas falhas estão relacionadas à problemas de isolamento. Dessa forma, para uma operação econômica e confiável, é essencial monitorar a condição do isolamento dos equipamentos e assim evitar falhas (Sarkar et al., 2015). Análises revelam que falhas no isolamento são a causa raiz para mais de 60 % dos danos em equipamentos de alta tensão, assim, é necessário garantir boas condições do isolamento (Raymond et al., 2015). Ademais, falhas podem causar danos aos equipamentos próximos, insatisfação dos clientes, interrupção da atividade econômica e imposição de multas regulamentares. A gestão efetiva desses ativos de capital é, portanto, um fator chave das

companhias de geração, transmissão e distribuição (Judd et al., 2005).

Foi reconhecido que falhas no isolamento muitas vezes estão relacionadas à ocorrência e severidade de descargas parciais (DP) dentro de vazios e/ou na superfície do isolamento (Natrass, 1988), além de outros fatores como o acúmulo de estresses mecânicos, térmicos e elétricos que ocorrem durante um longo tempo de funcionamento do equipamento (Sarkar et al., 2015).

Descargas parciais são descargas elétricas em equipamentos de alta tensão que atravessam parcialmente o isolamento (Bajwa et al., 2015). O fenômeno da descarga parcial acelera a degradação local e pode causar o trilhamento elétrico, que é a iminência para uma ruptura total do isolamento. Visto que as descargas parciais são essencialmente avalanches de elétrons, elas dão origem à pulsos de carga elétrica, dos quais produzem distúrbios de corrente e tensão fora do

sistema de isolamento (Cavallini et al., 2003). Por conseguinte, é importante que a atividade de DP seja monitorada e tendenciada de modo que uma decisão possa ser tomada baseada no estado do isolamento (Mas'ud et al., 2014).

Os efeitos físicos mensuráveis das descargas parciais são a emissão de ondas eletromagnéticas, como luz ultravioleta (UV) não visível e visível, onda de radiofrequência, onda acústica e mudanças repentinas de tensão ou corrente. Outras consequências de descargas sucessivas são mudanças na composição química devido ao aquecimento e outros efeitos, assim, a medição de alterações na composição química é capaz de identificar o equipamento que tenha sido afetado por descargas parciais durante algum tempo, sendo este método *offline* por natureza (Sarkar et al., 2015). O método elétrico, isto é, o registo e processamento de um sinal elétrico induzido num circuito de detecção, é a técnica mais frequentemente utilizada para a detecção e quantificação das magnitudes de descargas parciais (Mor et al., 2017).

Para garantir que o sistema de isolamento de um equipamento de alta tensão possa suportar com segurança a tensão de serviço e avaliar sua confiabilidade em condições operacionais após um determinado número de anos de funcionamento, técnicas não destrutivas e *online* devem ser usadas para detectar e diagnosticar defeitos, a fim de determinar se uma ação de manutenção preventiva é necessária e, finalmente, para evitar uma falha de operação (Danouj et al., 2013).

Na detecção radiométrica de DP, em sua forma mais simples, um receptor de rádio pode ser usado para detecção de uma descarga elétrica dentro de uma subestação. Como os pulsos de DP têm geralmente duração abaixo da ordem de micro segundos, eles irradiam transientes de rádio frequência. Provavelmente, a propriedade mais importante dos métodos radiométricos é que eles não requerem contatos com os terminais de alta tensão ou barramentos, somada à não necessidade de interrupção para instalação. Arranjos de antenas para o monitoramento de uma subestação, não necessitam de contato e são não invasivos em sua aplicação para instalações em funcionamento, logo, não apresentam preocupações de segurança para os operadores da planta (Judd, 2008).

As medições de rádio frequência têm sido extensivamente aplicadas em subestações para monitoramento das atividades de DP (Zhang, Upton, Jaber, Ahmed, Khan, Saeed, Mather, Lazaridis, Atkinson, Vieira and Glover, 2015). O uso de uma rede de sensores sem fio para detecção de DP elimina a necessidade de cabos para a comunicação dos sensores e reduz o custo total da instalação com o uso de chips RF cada vez mais baratos. Além disso, o monitoramento

sem fio proporciona a isolamento galvânica entre o item monitorado e o usuário situado em uma localidade remota (He et al., 2011). Um sistema de detecção radiométrico de baixo custo para detecção, localização e diagnóstico de DP tem o potencial para ser um componente chave para uma futura rede elétrica inteligente (*smart grid*) (Zhang, Upton, Jaber, Ahmed, Saeed, Mather, Lazaridis, Mopty, Tachtatzis, Atkinson, Judd, de Fatima Queiroz Vieira and Glover, 2015).

Recentemente, as redes de sensores sem fio têm sido amplamente reconhecidas como uma tecnologia promissora para aprimorar vários aspectos das redes elétricas inteligentes, especialmente aquelas que lidam com geração de energia, fornecimento bidirecional e monitoramento contínuo, oferecendo uma energia eficiente, confiável e uma solução de baixo custo para gerenciamento. As aplicações potenciais e existentes de redes de sensores sem fio para as redes elétricas inteligentes incluem medições avançadas, resposta da demanda e tarifamento dinâmico, diagnóstico de falhas do equipamento, controle de carga, automação da distribuição e monitoramento/controle remoto do sistema de potência (Fadel et al., 2015).

Tendo em vista o dano que pode ser causado aos equipamentos de potência caso as descargas parciais não sejam previamente detectadas, este trabalho propõe um sistema de detecção de descargas parciais utilizando uma rede de sensores sem fio e um instrumento virtual. O método utilizado para detecção de DP é por RF.

As próximas seções seguem com uma breve descrição sobre os métodos de detecção de descargas parciais na Seção 2, sobre os dispositivos que constituem o sistema de medição e aquisição de dados na Seção 3, sobre o instrumento virtual na Seção 5, a Seção 6 contém os resultados e discussões e a Seção 7 as conclusões.

2 Métodos de Detecção de Descargas Parciais

Existem diferentes métodos para detecção das descargas parciais. Quanto ao estado do equipamento durante os testes (se estão ou não em plena operação), o método de detecção pode ser dividido entre *online* e *offline*. Nos métodos *offline*, o equipamento em teste é retirado de sua operação e energizado por uma fonte de tensão externa. Os testes *online* são realizados na tensão de operação, logo, o comportamento da DP pode ser obtido e avaliado (Raymond et al., 2015). O monitoramento da isolamento é a aplicação contínua de técnicas de medição *online*, na qual permite a análise de tendência e detecção de uma falta iminente através da avaliação automática dos dados (Tenbohlen et al., 2016). O que dificulta a medição *online* e *on-site* é a interferência, visto

que o objeto em teste está conectado ou próximo ao sistema de potência. As interferências elétricas podem vir das descargas corona presentes nas linhas de transmissão e distribuição, operação de ferramentas elétricas, soldagem a arco elétrico, mau contato elétrico, precipitador eletrostático, etc., os quais produzem faíscas/descargas que criam pulsos de correntes similares à DP. Separar o ruído da DP do objeto em teste é importante, pois, se a DP for confundida com o ruído, ocorrerá uma falsa indicação da deterioração da isolação, o que reduz a utilidade e credibilidade do teste de DP (Stone, 2005).

No que se refere ao princípio físico utilizado para detecção da DP, as técnicas se dividem entre acústicas, ópticas, químicas e elétricas (Kemp, 1995; Yaacob et al., 2014). As medições elétricas ainda podem ser subdivididas entre o método proposto pela IEC 60270, o método que utiliza transformadores de corrente de alta frequência (HFCT - *High Frequency Current Transformer*) e o da radiofrequência. Na detecção acústica, a onda de energia mecânica que se propaga no isolamento a partir do local da descarga pode ser detectada por microfones, transdutores piezoelétricos e até acelerômetros (Mukhtaruddin et al., 2016). A detecção óptica pode ser realizada de forma direta, quando faz-se a detecção visual dos pulsos de DP, ou na forma opto-acústica. Esta detecção baseia-se no princípio de que a onda acústica, ao incidir sobre o cabo de fibra óptica, provocará a deformação da estrutura da fibra. Por sua vez, isto resultará numa alteração do seu índice de refração e comprimento da fibra. A onda de luz que passa pela fibra, é, portanto, modulada pela onda acústica e esta pode ser extraída com um demodulador adequado (Kemp, 1995). A detecção química pode verificar a atividade de DP por meio de análises do material isolante. Pode ser executada pela cromatografia líquida de alta performance (HPLC - *High Performance Liquid Chromatography*) ou pela análise de gases dissolvidos (DGA - *Dissolve Gas Analysis*) (Yaacob et al., 2014). As subdivisões para cada método de detecção estão apresentadas na Tabela 1.

Os métodos de detecção podem ainda ser classificados quanto ao posicionamento do elemento sensor, podendo ser invasivos ou não invasivos. Os métodos invasivos têm a desvantagem de exigir o desligamento, remoção e desmontagem do equipamento, ou ainda fazem uso de uma metodologia que faz análise de tensões de entrada e saída, o que expõe os operadores dos sistemas de diagnóstico a elevados níveis de tensão. No contrário, os métodos não invasivos permitem que o equipamento seja analisado em pleno funcionamento, sem a necessidade de desmontagem para estudo de possíveis defeitos (Castro et al., 2016).

Tabela 1: Técnicas utilizadas para cada método de detecção para verificar a atividade de DP.

Detecção	Técnica Utilizada
Elétrica	IEC 60270
	HFCT
	Rádiofrequência
Acústica	Detecção com microfones, transdutores piezoelétricos ou acelerômetros.
Óptica	Óptico direto
	Opto-acústico
Química	HPLC
	DGA

3 Medição e Aquisição de Dados

Os dispositivos utilizados para medição e aquisição de dados incluem antenas para captação do sinal RF, uma chave RF, um amplificador RF de baixo ruído, um detector RF, um microcontrolador e um módulo ZigBee para transmissão sem fio dos dados medidos. A antena, a chave RF, o amplificador, o detector, bem como os cabos coaxiais que conduzem o sinal RF, possuem impedância de 50 Ω . Os dispositivos e o fluxo de dados do sistema de medição e aquisição de dados está representado pelo diagrama de blocos da Figura 1 e na Figura 2, está apresentada uma fotografia dos dispositivos representados no diagrama de blocos.

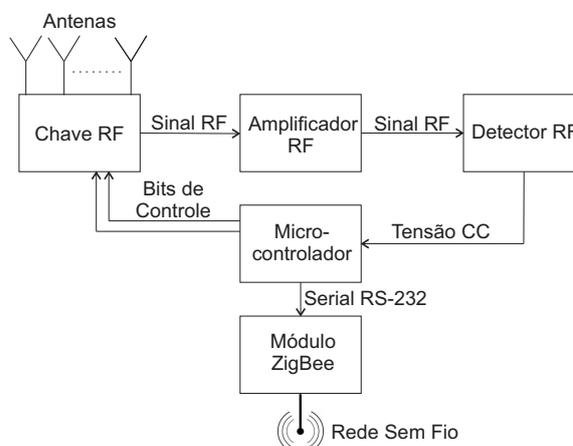


Figura 1: Diagrama de blocos com a representação dos dispositivos utilizados para medição e aquisição dos dados.

As antenas que captam os sinais RF são multibanda e atuam na faixa de frequência de 0,38 - 2,4 GHz. O modelo possui um cabo acoplado com conector SMA (*SubMiniature version A connector*) que neste caso são conectados diretamente às entradas da chave RF.

A chave RF (AS204-80LF), na qual tem o funcionamento similar ao de um multiplexador, possui quatro entradas e uma saída. A entrada

que será chaveada para a saída é selecionada por dois bits de controle.

O amplificador (MAX2630) aplica um ganho de 13,4 dB para sinais na faixa 0,1 - 1GHz. O dispositivo tem polarização interna ao circuito integrado e necessita apenas de capacitores na entrada e saída para o bloqueio de tensão CC (corrente contínua). O próprio amplificador atua como um filtro para o sistema, bloqueando os sinais da rede ZigBee em 2,4 GHz e de outros padrões de comunicação.

O detector RF (LTC5505-1) é capaz de detectar sinais na faixa 0,3 - 3 GHz com potências de -28 até 18 dBm. Uma tensão CC que varia em função da potência do sinal RF de entrada, é disponibilizada num pino do circuito integrado.

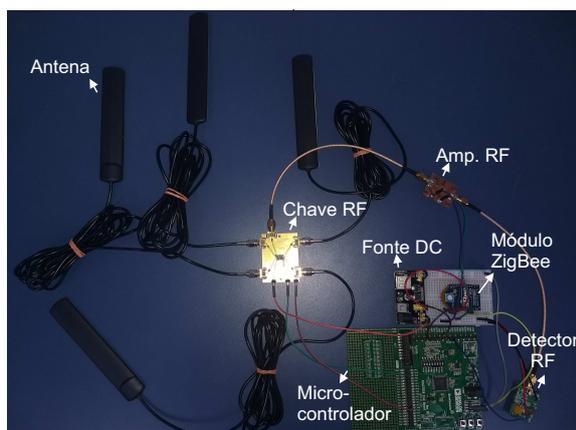


Figura 2: Dispositivos do diagrama de blocos da Figura 1.

A faixa de frequência em que o sistema pode atuar é de 380 MHz à 1 GHz, já que 380 MHz é a frequência mínima em que a antena é capaz de captar sinais e 1 GHz é a frequência máxima em que o amplificador pode aplicar o ganho especificado. A faixa de operação do sistema é aceitável para a aplicação, visto que cobre a maior parte da faixa de frequência onde as descargas parciais têm maior energia, a faixa entre 50 e 800 MHz (Neto et al., 2014).

A caracterização do detector RF foi feita para uma frequência de 500 MHz, dado que o dispositivo terá diferentes comportamentos em diferentes frequências. Assim, com a utilização de um gerador RF, foram aplicados no detector sinais de 500 MHz com intensidades de -28 até 18 dBm. Para cada intensidade aplicada, a tensão CC na saída do detector era medida. De posse desses dados, os coeficientes do polinômio característico foi calculado. O polinômio retorna então a potência em dBm do sinal detectado a partir da tensão CC lida no detector. Em trabalhos futuros, novos polinômios característicos devem ser determinados para a atuação do sistema em diferentes faixas de frequências.

A chave RF possui quatro entradas, o que

torna possível a utilização de quatro antenas. Mais antenas poderiam ser instaladas com a utilização de chaves com maior quantidade de entradas. O sinal da entrada que será chaveado para a saída, é determinado por dois bits de controle, que aqui é gerado pelo microcontrolador (ADuC 7026). Dessa forma, o algoritmo executado no dispositivo determina de qual antena o sinal será captado e enviado ao amplificador. Seguindo-se o fluxo do diagrama da Figura 1, o sinal é captado de uma das antenas, passa pelo amplificador e em seguida é recebido pelo detector RF. Uma tensão CC, com intensidade em função da potência do sinal RF na entrada, é disponibilizada pelo detector e lida pelo conversor ADC (*analog-to-digital converter*) do microcontrolador. O algoritmo executado no microcontrolador constrói um pacote no qual contém o número da antena que o sinal foi captado e o valor da amostra da tensão CC lida do detector RF. A informação é então enviada para o módulo ZigBee através da interface Serial RS-232. Por fim, a informação é transmitida para um outro módulo ZigBee ligado diretamente ao computador.

Supondo que cada antena esteja dentro, próxima ou fixada na carcaça de um equipamento de alta tensão, utilizando-se o sistema de medição e aquisição proposto, quatro equipamentos poderiam ter as suas atividades de DP monitoradas.

4 Emulação do Sinal de DP

Suponha que em um sistema elétrico 60 Hz CA (corrente alternada), os pulsos de DP em um equipamento de alta tensão estarão em atividade quando a tensão CA instantânea é maior ou igual a metade do valor do pico positivo e menor ou igual a metade do valor do pico negativo. Considere dois ciclos de um sinal de 60 Hz com uma tensão de pico de 1 V, como na forma de onda azul do gráfico na Figura 3, utilizada aqui como um sinal de referência. Os pulsos de DP no mesmo gráfico da Figura 3 podem ser vistos nos instantes de tempo em que a tensão instantânea CA é maior ou igual a 0,5 V e menor ou igual a 0,5 V. Para um período do sinal de 60 Hz, no qual tem aproximadamente 16,667 ms, aqueles instantes de tempo serão os intervalos entre 1,389 a 6,945 ms e 9,722 a 15,278 ms, respectivamente. A frequência dos pulsos é de 500 MHz.

No intuito de emular um sinal de DP para testes do sistema, um gerador RF (Keysight Technologies N5172B) foi utilizado. O gerador foi configurado para gerar um sinal similar aos pulsos do gráfico na Figura 3. Em um período de 16,677 ms, os pulsos estarão ativos nos intervalos de tempo mencionados no parágrafo anterior. A frequência ajustada no gerador é de 500 MHz. Note que o sinal de 60 Hz é usado apenas como

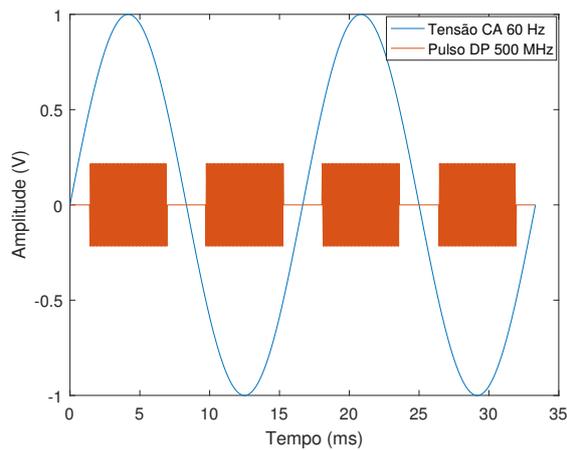


Figura 3: Dois ciclos de um sinal de referência de 60 Hz e um sinal de 500 MHz representando os pulsos de DP.

referência para verificar os intervalos de tempo em que os pulsos de DP estarão ativos e assim não são emitidos pelo gerador RF.

5 Instrumento Virtual

Os dados enviados pelo módulo ZigBee do sistema de medição e aquisição representado pelo diagrama de blocos da Figura 1, são recebidos por outro módulo ZigBee no qual se comunica com um computador através da comunicação Serial RS-232. Um instrumento virtual construído a partir do LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), adquire esses dados. A cópia da tela do instrumento virtual está apresentada na Figura 4.

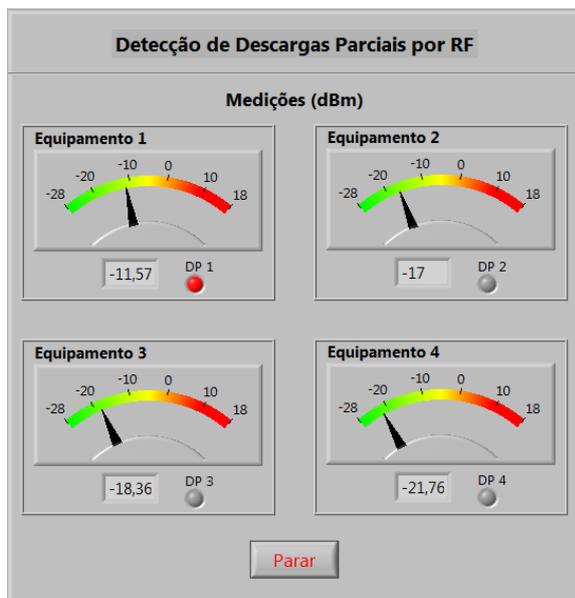


Figura 4: Instrumento virtual do sistema de detecção de DP.

O sistema de medição e aquisição de dados apresentado na Seção 3 é capaz de realizar a medição a partir de quatro antenas, dessa forma, a tela do instrumento virtual contém 4 ponteiros indicando as potências do sinal em dBm detectados em cada uma delas. Um campo abaixo de cada ponteiro também contém o valor indicado. Cada ponteiro é identificado por 'Equipamento x ', onde x é o número do equipamento associado a cada uma das antenas. Aqui, está sendo considerado que cada antena seria instalada para a detecção de DP em quatro equipamentos, entretanto, essas antenas, ou também sensores UHF, poderiam ser instalados para monitorar a atividade de DP em diferentes partes de um único equipamento, como um transformador, por exemplo.

Inicialmente, o código executado dentro do instrumento virtual recebe os dados da rede ZigBee pela porta serial e identifica os pacotes dos dados de aquisição de cada antena. Em seguida, um *script* do Matlab estima a potência do sinal a partir do valor de tensão de saída do detector RF, utilizando o polinômio obtido na caracterização do dispositivo. Os valores são finalmente mostrados pelos ponteiros.

No instrumento virtual, cada equipamento tem um LED associado, identificado por 'DP x ', onde x é o número do equipamento. O LED acende para indicar uma provável atividade de DP no equipamento. No código do instrumento virtual, foi considerado que isso ocorrerá quando num determinado intervalo de tempo, uma certa quantidade de pulsos identificados terão potências acima de um nível estabelecido. Isso seria para distinguir entre a atividade de DP e uma pequena quantidade de pulsos resultantes de um processo de chaveamento dentro do sistema de potência, por exemplo.

6 Resultados

Para validação do sistema, as antenas foram instaladas no topo de estruturas construídas com tubos de instalações hidráulicas e uma base de madeira. A antena que irradia o sinal de DP emulado também foi instalada numa estrutura do mesmo tipo. Ela é do tipo telescópica e distribui o sinal RF omnidirecionalmente.

As antenas foram colocadas dentro de um ambiente de laboratório, com distribuição similar à apresentada na fotografia da Figura 5. Na Figura 6 tem-se um esquema com maiores detalhes de como as antenas foram distribuídas, onde elas estão representadas por círculos. A antena telescópica foi conectada ao gerador RF por meio de um cabo coaxial de 50Ω . O gerador foi ajustado para emitir pulsos de 500 MHz, como apresentado na Seção 4, com uma potência de 19 dBm.



Figura 5: Ambiente de testes.

A comutação entre as antenas na chave RF é feita de forma automática através dos bits de controle gerados pelo microcontrolador. O tempo em que o sinal de uma das antenas permanece comutado para a saída da chave RF é determinado pelo algoritmo executado no microcontrolador.

Os testes são simples e consistem em aproximar a antena que irradia o sinal emulador de DP das antenas que poderiam estar instaladas próximas ou dentro dos equipamentos monitorados. Por exemplo, a Antena 1, realiza o monitoramento do Equipamento 1. Caso a antena que emula a fonte de DP seja aproximada da Antena 1, o instrumento virtual irá indicar medições de potências mais elevadas para o Equipamento 1, como na Figura 4. Se a quantidade de pulsos identificada num determinado intervalo de tempo tiver potência maior que um nível estabelecido, o LED DP 1 irá acender, indicando uma provável atividade de DP no respectivo equipamento.

A antena que irradia o sinal emulador de DP foi também colocada em 49 pontos igualmente espaçados, conforme a Figura 6, de forma a criar um *fingerprint* ou mapa de rádio do sinal RF no ambiente. Em cada ponto em que a antena foi posicionada, a potência do sinal recebida em cada uma das quatro antenas de monitoramento era registrada. Nos gráficos de contorno da Figura 7, visualiza-se através das cores em cada contorno, as potências recebidas nas antenas enquanto a antena com o sinal emulador de DP percorreu os 49 pontos. Com este procedimento, é possível verificar como o sinal RF se propaga no ambiente. Os dados do *fingerprint* podem ser usados pelo instrumento virtual de detecção,

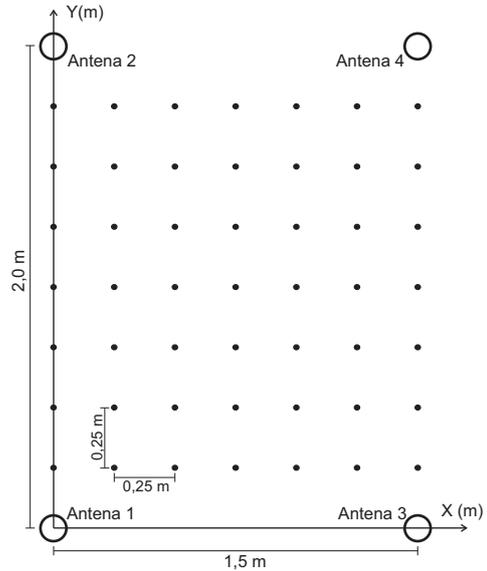


Figura 6: Distribuição das antenas de monitoramento no plano cartesiano de referência e pontos de posicionamento da antena com o sinal emulador de DP.

comparando-se os dados medidos em tempo real com os dados do *fingerprint*, para se ter uma maior certeza de qual equipamento monitorado tem uma provável atividade de DP, como também podem ser utilizados em algoritmos que estimam a localização da fonte de DP.

7 Conclusões

Monitorar o estado do isolamento de equipamentos dos sistemas elétricos de potência, é uma atividade fundamental a ser executada pelas equipes de manutenção. Falhas nestes equipamentos podem interromper o fornecimento de energia em regiões, causando a insatisfação dos clientes, interrupção da atividade econômica, perda do equipamento, como também a imposição de multas pelas agências reguladoras. A ocorrência de descargas parciais pode estar relacionada à falhas no isolamento. De forma a evitar a ruptura total do isolamento e uma consequente interrupção do fornecimento de energia, a atividade de descargas parciais pode ser monitorada para verificar se o equipamento deve ser retirado e substituído para manutenção.

Levando em consideração as consequências dos problemas de falhas do isolamento, neste trabalho foi proposto um sistema *online* de detecção de descargas parciais com redes de sensores sem fio e instrumento virtual. O sistema pode ser considerado como de baixo custo não apenas quando comparado a outros sistemas de detecção de descargas parciais, mas também quando comparado ao valor dos ativos que serão monitorados.

Uma das vantagens associadas aos sistemas

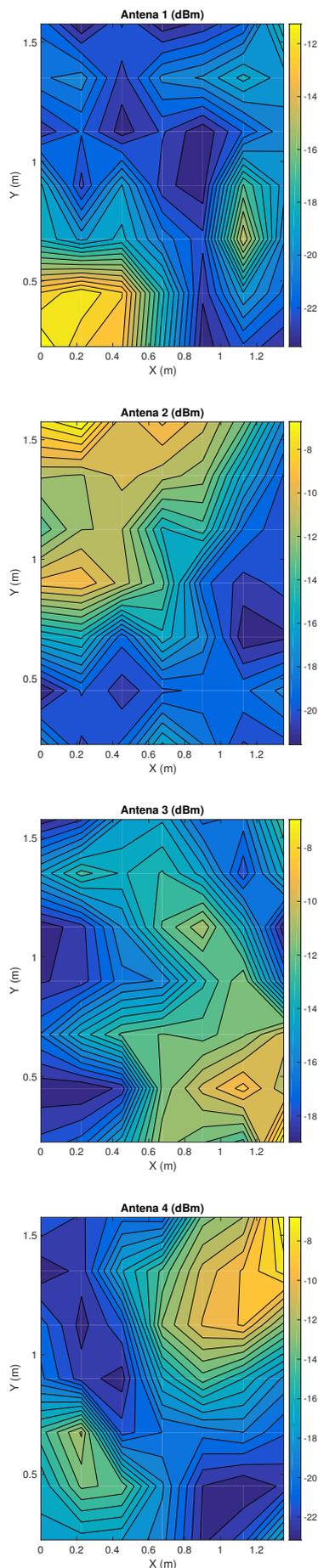


Figura 7: Gráficos de contorno das potências recebidas pelas antenas 1, 2, 3 e 4 enquanto a antena com o sinal emulador de DP percorreu 49 pontos.

que utilizam o sinal RF, é a detecção das descargas sem a necessidade de conexões elétricas aos barramentos de alta tensão, como também a instalação do sistema sem a necessidade de desligamento da planta.

O uso da rede de sensores sem fio possibilita o envio da informação para um local remoto a uma certa distância. A utilização da chave RF reduz os custos com a diminuição da quantidade de nós sensores para detecção do sinal RF, uma vez que o sinal de várias antenas é captado e enviado para um único nó sensor para medição e aquisição dos dados.

Outra ferramenta importante utilizada neste trabalho é o instrumento virtual. Desenvolvido no LabVIEW, ele indica as intensidades do sinal detectados em cada equipamento. São personalizáveis tanto na interface com o usuário como no código, no qual pode ser alterado para realizar o processamento desejado, podendo incluir também *scripts* do Matlab. A coleta de dados pelo instrumento é feita de forma simplificada, sem a necessidade de interfaces de aquisição de dados de custo mais elevados, sendo realizada apenas utilizando a porta de comunicação serial já integrada aos computadores.

Neste trabalho, foi considerado um pulso de DP de 500 MHz, visto que o detector RF tem comportamento diferente para diferentes frequências e o foco principal era a validação do sistema de detecção. Os coeficientes do polinômio característico que retorna a intensidade do sinal em dBm usando a tensão CC como entrada, foram modelados apenas para 500 MHz. Nos trabalhos futuros, os coeficientes de polinômios para diferentes faixas de frequências devem ser modelados. Um circuito adicional para detecção da frequência do sinal deve ser incluído. Com os dados de frequência, o algoritmo deve escolher o polinômio mais apropriado. Se o procedimento for realizado para toda a faixa de frequência em que o sinal RF gerado pela DP concentra maior energia, o sistema estaria apto para detecção de DP em diferentes intervalos. Outro item importante a ser considerado em trabalhos futuros é o reconhecimento simultâneo de diferentes fontes de DP.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PPgEE-COPELE por todo o suporte durante o curso de mestrado.

Referências

- Bajwa, A. A., Habib, S. and Kamran, M. (2015). An investigation into partial discharge pulse extraction methods, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **73**: 964 – 982.

- Castro, B. A., Clerice, G. A. M., Andreoli, A. L., de Souza Campos, F. and Ulson, J. A. C. (2016). A low cost system for acoustic monitoring of partial discharge in power transformer by piezoelectric sensor, *IEEE Latin America Transactions* **14**(7): 3225–3231.
- Cavallini, A., Montanari, G. C., Contin, A. and Pulletti, F. (2003). A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on pd signal inference, *IEEE Electrical Insulation Magazine* **19**(2): 23–30.
- Danouj, B., Tahan, S. and David, E. (2013). Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection, *Measurement* **46**(1): 660 – 666.
- Fadel, E., Gungor, V., Nassef, L., Akkari, N., Malik, M. A., Almasri, S. and Akyildiz, I. F. (2015). A survey on wireless sensor networks for smart grid, *Computer Communications* **71**: 22 – 33.
- He, X., Xie, G. and Jiang, Y. (2011). Online partial discharge detection and location system using wireless sensor network, *Energy Procedia* **12**: 420 – 428.
- Judd, M. D. (2008). Radiometric partial discharge detection, *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp. 1025–1030.
- Judd, M. D., Yang, L. and Hunter, I. B. B. (2005). Partial discharge monitoring of power transformers using uhf sensors. part i: sensors and signal interpretation, *IEEE Electrical Insulation Magazine* **21**(2): 5–14.
- Kemp, I. J. (1995). Partial discharge plant-monitoring technology: present and future developments, *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology* **142**(1): 4–10.
- Mas'ud, A. A., Stewart, B. and McMeekin, S. (2014). Application of an ensemble neural network for classifying partial discharge patterns, *Electric Power Systems Research* **110**: 154 – 162.
- Mor, A. R., Heredia, L. C. and Muñoz, F. (2017). Effect of acquisition parameters on equivalent time and equivalent bandwidth algorithms for partial discharge clustering, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **88**: 141 – 149.
- Mukhtaruddin, A., Isa, M., Adzman, M. R., Hasan, S. I. S., Rohani, M. N. K. H. and Yü, C. C. (2016). Techniques on partial discharge detection and location determination in power transformer, *2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED)*, pp. 537–542.
- Natrass, D. A. (1988). Partial discharge measurement and interpretation, *IEEE Electrical Insulation Magazine* **4**(3): 10–23.
- Neto, J. M., Zhang, Y., Jaber, A., Zhu, M., Judd, M., Atkinson, R., Soraghan, J., Neto, J. S., de Fatima Q Vieira, M. and Glover, I. A. (2014). Radiometric location of partial discharge sources for the future smart grid, *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, pp. 1–4.
- Raymond, W. J. K., Illias, H. A., Bakar, A. H. A. and Mokhlis, H. (2015). Partial discharge classifications: Review of recent progress, *Measurement* **68**: 164 – 181.
- Sarkar, B., Koley, C., Roy, N. and Kumbhakar, P. (2015). Condition monitoring of high voltage transformers using fiber bragg grating sensor, *Measurement* **74**: 255 – 267.
- Stone, G. C. (2005). Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **12**(5): 891–904.
- Tenbohlen, S., Coenen, S., Djamali, M., Müller, A., Samimi, M. H. and Siegel, M. (2016). Diagnostic measurements for power transformers, *Energies* **9**(5).
- Yaacob, M. M., Alsaedi, M. A., Rashed, J. R., Dakhil, A. M. and Atyah, S. F. (2014). Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors, *Photonic Sensors* **4**(4): 325–337.
- Zhang, Y., Upton, D., Jaber, A., Ahmed, H., Khan, U., Saeed, B., Mather, P., Lazaridis, P., Atkinson, R., Vieira, M. F. Q. and Glover, I. A. (2015). Multiple source localization for partial discharge monitoring in electrical substation, *2015 Loughborough Antennas Propagation Conference (LAPC)*, pp. 1–4.
- Zhang, Y., Upton, D., Jaber, A., Ahmed, H., Saeed, B., Mather, P., Lazaridis, P., Mopty, A., Tachtatzis, C., Atkinson, R., Judd, M., de Fatima Queiroz Vieira, M. and Glover, I. (2015). Radiometric wireless sensor network monitoring of partial discharge sources in electrical substations, *International Journal of Distributed Sensor Networks* **11**(9): 438302.