



**XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTM/17
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -
GTM**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE SENSORIAMENTO ÓPTICO PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS
PARCIAIS EM BUCHAS DE TRANSFORMADORES**

**João B. Rosolem*, Danilo C. Dini, Claudio Floridia, Elias K. Tomiyama, João Paulo Vicentini Fracarolli,
Ariovaldo A. Leonardi, Claudio A. Hortêncio, Rivaél Strobel Penze, Paulo T. Peres, Livia R. Alves**

CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações

Marcos E. G. Alves, Daniel C. P. Araújo, Daniel P. Santos, Fernando G. A. Amorim

Treetech Sistemas Digitais

Romulo Miranda Teixeira

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

RESUMO

A monitoração de descargas parciais (DP) de buchas de transformadores possibilita a identificação de problemas de isolamento em estágios iniciais permitindo a programação de substituição ou reparos nos equipamentos. Neste trabalho são descritos dois sistemas baseados em tecnologias de fibras ópticas para monitoração de DP em buchas de transformadores. Um dos sistemas descritos é baseado no método de detecção acústica e o outro é baseado na detecção de sinais de radiofrequência. Diversos testes foram realizados com estas técnicas a fim de escolher a mais sensível para uso na detecção das DP das buchas e finalmente serem testadas em campo.

PALAVRAS-CHAVE

Buchas, Descargas Parciais, Sensores Ópticos, Transformadores, Fibras Ópticas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os transformadores de grande porte são utilizados em instalações industriais, comerciais e de concessionárias de energia. Uma falha inesperada de uma bucha de transformador pode causar paradas prolongadas nas linhas de produção da indústria, debilitar uma usina elétrica ou causar interrupções em grandes áreas. Dependendo da extensão dos danos causados, a interrupção pode durar semanas. As falhas catastróficas em buchas estão entre as principais causas de indisponibilidade de transformadores e reatores, pois podem causar graves danos aos equipamentos. Dependendo do modo de falha e suas consequências, o equipamento pode ficar indisponível por até dois anos para reparos. Buchas podem ser monitoradas através da medição de capacitância e fator de perdas dielétricas (tangente de delta), porém, monitorando-se através da detecção de Descargas Parciais (DP) agrega-se uma terceira variável para detecção de problemas e confirmação de diagnósticos com grande antecedência permitindo a programação de substituição ou de reparos.

A liberação repentina de energia causada por descargas parciais (DP) produz uma série de efeitos, como mudanças químicas e estruturais dos materiais, geração de sinal eletromagnético e emissões acústicas (AE). Estes efeitos induzidos são utilizados para a sua detecção. As técnicas tais como análise de gases dissolvidos (DGA), medições elétricas dos transientes de alta frequência (HF-VHF) e a detecção de sinais eletromagnéticos gerados na banda UHF e detecção de ultrassom (AE) são utilizadas para este propósito. Entre estas técnicas, a de detecção ultrassom oferece grandes vantagens, como a possibilidade de testes on-line e capacidade de localizar onde a atividade PD está ocorrendo, o que é útil em objetos de teste de grande porte como transformadores de potência. Neste método as ondas acústicas de pressão associadas com DP em transformadores de alta tensão podem ser detectadas por sensores piezoelétricos externos. O tempo de propagação e a forma de onda dos sinais recebidos são afetados por fatores como posição do sensor, barreiras internas e tipo do sensor. Sensores de faixa larga permitem a comparação entre as componentes de DP de baixas e altas frequências.

Os sensores à fibra óptica possuem grandes vantagens em relação aos sensores clássicos pelo fato da fibra óptica ser um dielétrico natural, imune às interferências eletromagnéticas, o que a torna ideal para instalações em

(*) R. Dr. Ricardo Benetton Martins, s/n – Parque II do Polo de Alta Tecnologia, CEP 13086-902, Campinas, SP, Brasil, Tel: (+55 19) 3705.6796 – Email: rosolem@cpqd.com.br

ambientes com alta tensão. A fibra óptica permite a construção de sensores bem compactos e de baixo peso, além de possuir a capacidade de enviar/receber sinais ópticos em grandes distâncias, permitindo a construção de redes de sensores sem eventualmente a necessidade da conversão óptica/elétrica em cada ponto de sensoriamento, possibilitando a redução de custos e aumentando a flexibilidade e confiabilidade da solução.

As grandezas e/ou estados monitorados pelos sensores ópticos à fibra também podem ser transmitidos a centros de controle através de outros meios de comunicação, tais como rádio, celular com a utilização de interfaces dedicadas, apresentando dessa forma uma alternativa para os locais onde não existam enlaces de fibra óptica para transmissão dos dados monitorados.

Neste trabalho descrevemos dois sistemas baseados em tecnologias de fibras ópticas para monitoração de descargas parciais de buchas de transformadores de até 500 kV. Um dos sistemas descritos é baseado no método de detecção acústica e o outro é baseado na detecção de sinais de radiofrequência. Diversos testes foram realizados nestas duas técnicas a fim de escolher a mais sensível para uso na detecção das descargas parciais das buchas e finalmente serem testadas em campo.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO DE MONITORAÇÃO DE BUCHAS E DAS FERRAMENTAS LABORATORIAIS DE SIMULAÇÃO DE DP

2.1 Descrição do Sistema de Sensoriamento Óptico

Descargas parciais se caracterizam por um processo de ionização em ambiente gasoso no interior dos materiais dielétricos, causado por um campo elétrico intenso e localizado. A partir desse processo diversos efeitos físicos secundários são gerados no local, tais como, pulsos eletromagnéticos conduzidos e irradiados, luminosidade, ruído acústico, acréscimo de temperatura e reações químicas localizadas.

Como as buchas são elementos que restringem a inserção interna de sensores escolhemos investigar a detecção de sinais de descargas parciais através da detecção de sinais eletromagnéticos e acústicos tendo em vista o uso de sensores externos e não invasivos. A Figura 1 ilustra o esquema básico do sistema de sensoriamento em desenvolvimento. Como pode ser visto nesta figura o sensor é instalado na parte inferior cerâmica da bucha. Um par de fibras ópticas leva o sinal analógico do sensor até um equipamento chamado de interrogador que é o responsável para excitar o sensor e detectar os sinais de retorno. O sinal de saída do interrogador já na forma digital é enviado na forma de um protocolo padrão até o centro de monitoração usando a rede de telecomunicações.

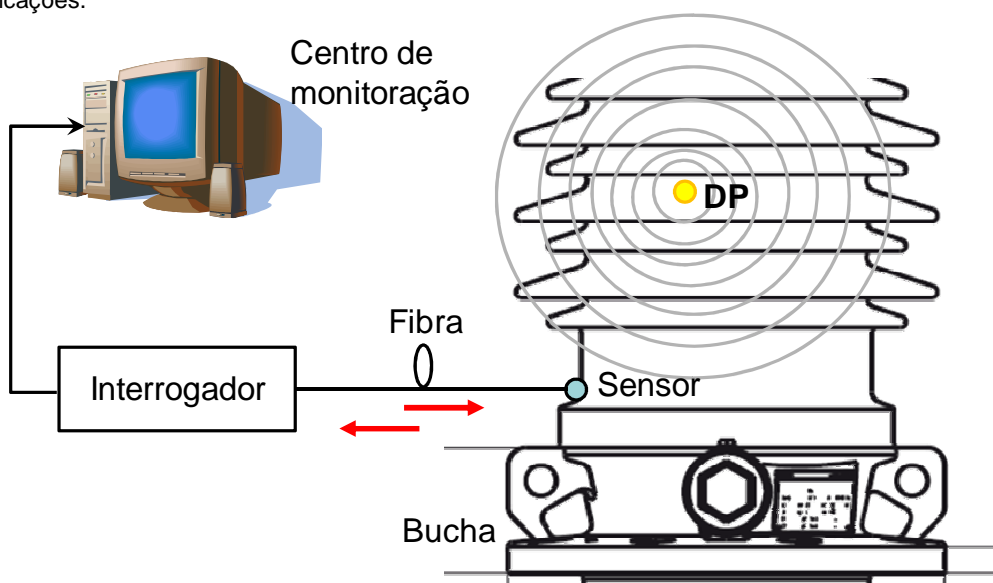


FIGURA 1 – Esquema básico do sistema de sensoriamento de DP em desenvolvimento

2.1 Ferramentas Laboratoriais de Simulação de DP

Tendo em vista a escolha dos métodos acima descritos o objetivo principal dos testes de laboratório é descobrir qual técnica óptica é a mais apropriada para detecção das descargas parciais das buchas de transformadores. Em primeiro lugar será buscada a técnica mais sensível e em segundo lugar a técnica de menor custo. É sabido que buchas de transformadores saem de fábrica com valores de descargas bastante reduzidos (<10 pC), o que significa uma maior dificuldade de detecção em relação a outros equipamentos elétricos. Não obstante a premissa de detecção das descargas de forma não intrusiva acrescenta uma dificuldade maior ao processo de detecção.

Os estudos de laboratório conduzidos no CPqD ocorreram sem a energização das buchas. Em um estágio posterior do projeto os sistemas de sensoriamento desenvolvidos serão testados em um laboratório de alta tensão e finalmente serão testados em campo em uma subestação da CEMIG. Desta forma algumas ferramentas foram necessárias para simular os efeitos produzidos pelas DP's tanto do ponto de vista acústico como de radiofrequência. Para simular os efeitos acústicos em uma faixa de frequência que vai desde 2 kHz até 200 kHz

uma boa opção é utilização de dispositivos PZTs (*Lead Zirconate Titanate*) e *tweters* piezoelétricos (ou *buzzers*). Para simular a geração de campos eletromagnéticos de DPs podem-se usar eletrodos sob alta tensão, eletrodos de alta tensão, luz estroboscópica ou centelhadores. Um ponto importante relativo ao uso destes simuladores é a necessidade de calibração das intensidades geradas de pressão acústica ou campo eletromagnético similares ao gerado por uma DP de valor conhecido em pC. Devido à facilidade de calibração em baixa tensão escolhemos o uso dos centelhadores para geração de campo eletromagnético.

Para desenvolver os primeiros estudos de DP foi montada nos laboratórios do CPqD uma bucha simulada mostrada na Figura 2(b) para estudar os efeitos de propagação dos sinais acústicos e de radiofrequência pela bucha. Apesar de diversos outros estudos terem sido realizados neste projeto detalha-se neste artigo em sua maior parte aqueles estudos referentes ao uso da bucha simulada. A bucha montada é constituída como uma bucha real de enrolamentos de folhas de papel intercaladas com folhas de alumínio formando um corpo condensivo que foi então inserido em um isolador cerâmico semelhante ao usado em uma bucha o qual foi preenchido com óleo mineral Lubrax AV 60 IN. Diversos elementos simuladores dos efeitos de DP foram inseridos no interior da bobina tais como: PZTs, buzinas piezoelétricas e centelhadores. Foram inseridos também no interior da bobina pequenos anéis de fibra óptica.

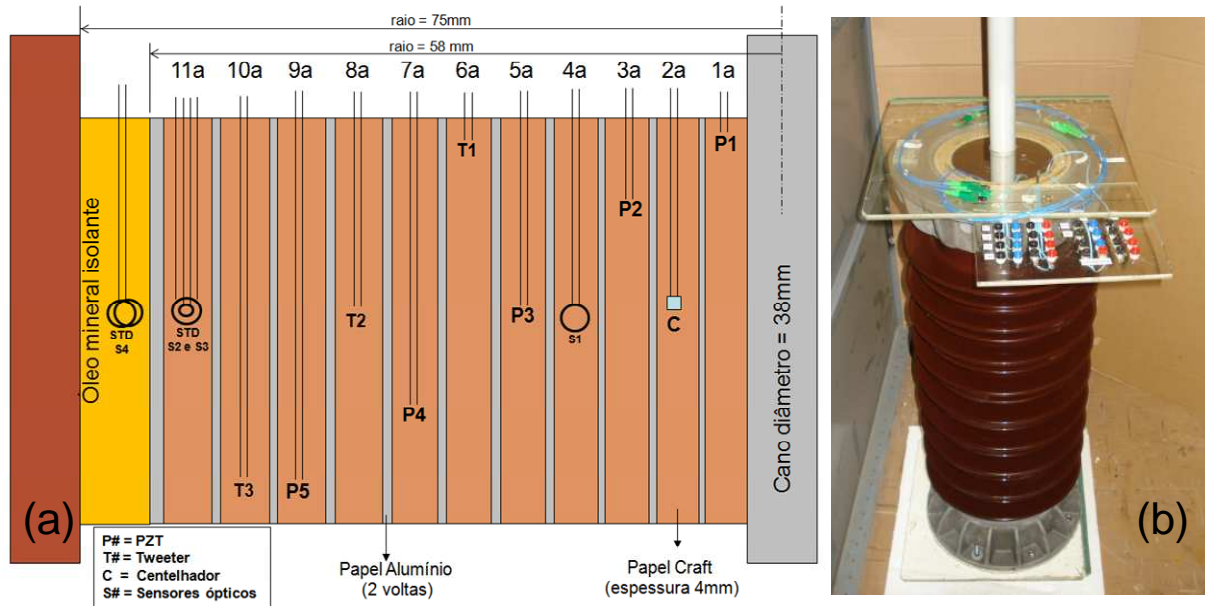


FIGURA 2 – (a) Diagrama das camadas da bucha simulada e (b) bucha simulada montada.

3.0 - TÉCNICA INTERFEROMÉTRICA

A técnica interferométrica é uma das formas mais sensíveis para se detectar os sinais de ultrassom gerado pelas descargas parciais. Diversos sensores de fibra óptica têm sido empregados para este fim [1] - [3]. A estrutura dos transformadores que é preenchida com óleo facilita a detecção do ultrassom das descargas, porém as buchas são elementos mais sólidos impregnados com óleo. Existem poucos registros de estudos de sensores ópticos para detecção de ultrassom em buchas ou estruturas similares.

O arranjo experimental para estudo da técnica interferométrica em buchas é mostrado na Figura 3. O sinal óptico proveniente de um laser, LD, de frequência óptica f_0 é dividido em dois por um *splitter* óptico, parte do sinal é enviado à fibra sensora, onde sofre deslocamento de frequência devido ao efeito acusto-óptico na fibra (o sinal óptico agora apresenta duas frequências f_0 e f_D). A outra parte do sinal passa por um modulador acusto-óptico que gera uma nova portadora na frequência $f_M = 55$ MHz. O sinal da fibra sensora, que consiste de um pequeno anel com várias voltas de fibra óptica, e o sinal proveniente do modulador acusto-óptico se recombina no *splitter* e o batimento resultante é captado no receptor óptico Rx, gerando dois novos sinais de frequências $f_M - f_D$ e $f_M + f_D$ que podem ser captados por um analisador de espectro elétrico. Alternativamente, este sinal elétrico pode passar por um discriminador de frequências, e então ser visualizado em uma placa de aquisição de dados (osciloscópio). Como resultado desta última operação, uma réplica do sinal gerado pelas descargas parciais é obtido no osciloscópio. Ainda de acordo com o esquema, existe a possibilidade de igualar os caminhos ópticos entre os dois braços do interferômetro, braço até o sensor e braço que passa pelo modulador acusto-óptico, por meio de bobina de fibra para compensação de caminho óptico. Esta bobina de fibras é de grande importância para o caso em que o elemento sensor fica a dezenas ou centenas de metros do resto do arranjo. Caso não seja inserido a fibra de compensação o sinal óptico é deteriorado.

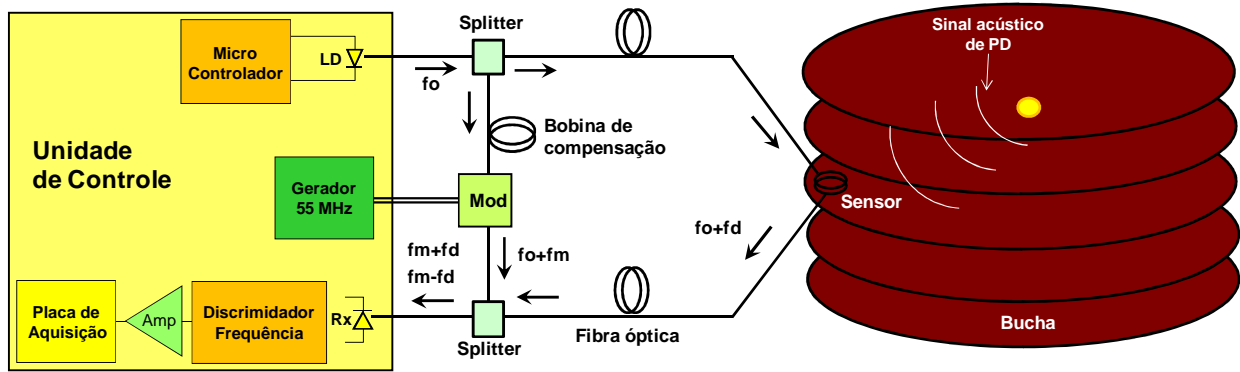


FIGURA 3 – Arranjo experimental usado para detecção das ondas acústicas por método interferométrico.

Conforme observado antes diversos estudos foram realizados neste projeto usando PZTs e buzzers que foram fixados em placas de alumínio ou cerâmica com o objetivo de simular o sinal acústico das DPs e aprimorar o método interferométrico. A Figura 4(a) mostra o arranjo de equipamentos do sistema interferométrico e a Figura 4(b) mostra o sensor fixado na superfície da bucha.

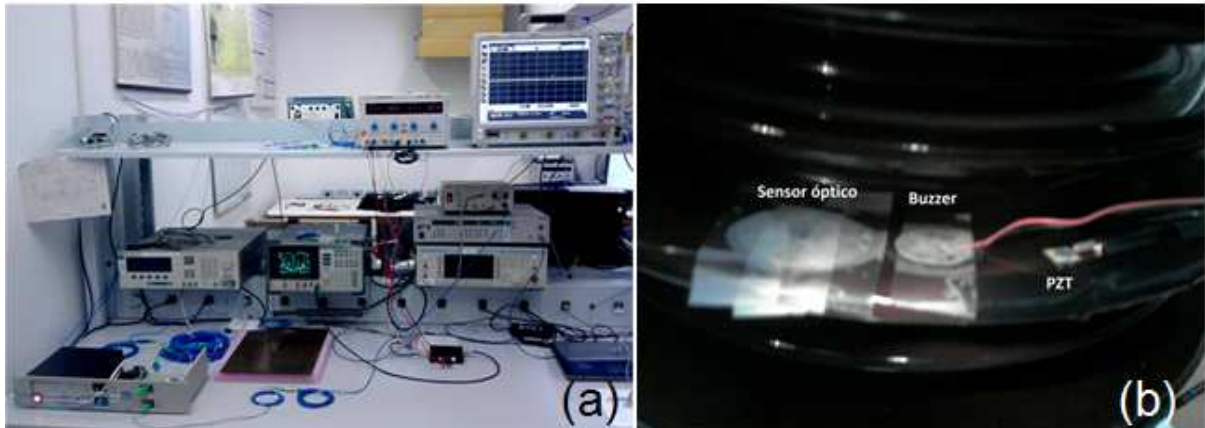


FIGURA 4 – (a) Arranjo de equipamentos do sistema interferométrico e (b) sensor fixado na superfície da bucha ao lado do buzzer.

Em um primeiro teste o sensor baseado na técnica interferométrica foi testado em uma placa metálica. O sensor óptico constituído de fibras configuradas em espiral, com 44 voltas e diâmetro interno de 11 mm, foi fixado através de adesivos à placa a certa distância de um PZT que serviu de gerador de emissões acústicas simulando as DPs. O PZT utilizado apresenta um coeficiente de deformação piezelétrica de 390×10^{-12} m/V e foi excitado com uma tensão senoidal de 5 Vpp proveniente de um gerador de sinais. A Figura 5 mostra os resultados deste teste para várias distâncias entre o PZT e o sensor óptico.

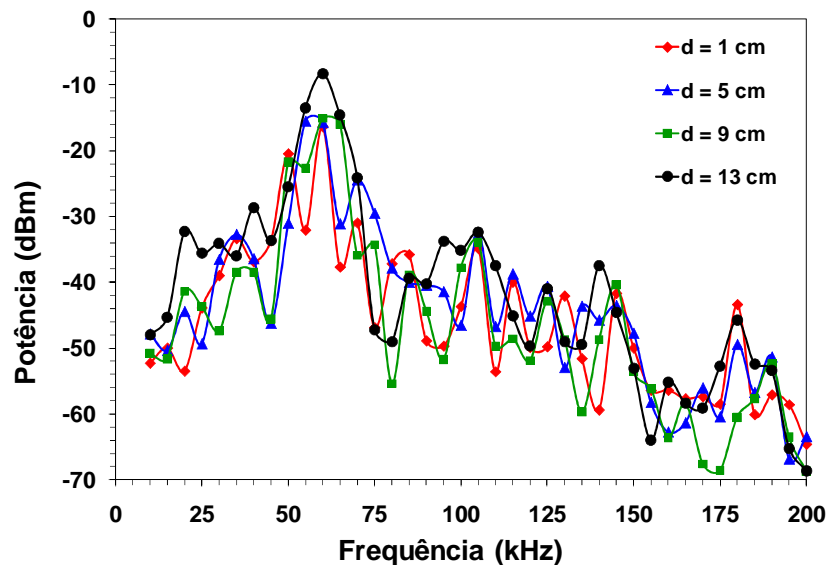


FIGURA 5 – Resultados de teste do sensor óptico interferométrico fixado em uma placa metálica.

Em seguida utilizou-se a bucha simulada para realização de um teste de propagação dos sinais acústicos pela superfície cerâmica da bucha através da fixação de um buzzer em sua superfície. Foi utilizado um sensor com fibras configuradas em espiral, com 44 voltas e diâmetro interno de 11 mm. O objetivo deste teste foi verificar a sensibilidade do sensor às vibrações mecânicas propagadas na superfície cerâmica da bucha. A Figura 6(a) mostra o espectro elétrico do sinal detectado pelo sistema de sensoriamento na saída do discriminador de frequência visto por um analisador de espectro elétrico e na Figura 6(b) visto em um osciloscópio. Neste teste o buzzer foi excitado com um sinal senoidal de 5 Vpp provindo de um gerador de sinais. Na Figura 6(a) pode-se comparar este nível de sinal com o nível de sinal obtido no experimento similar usando a placa metálica.

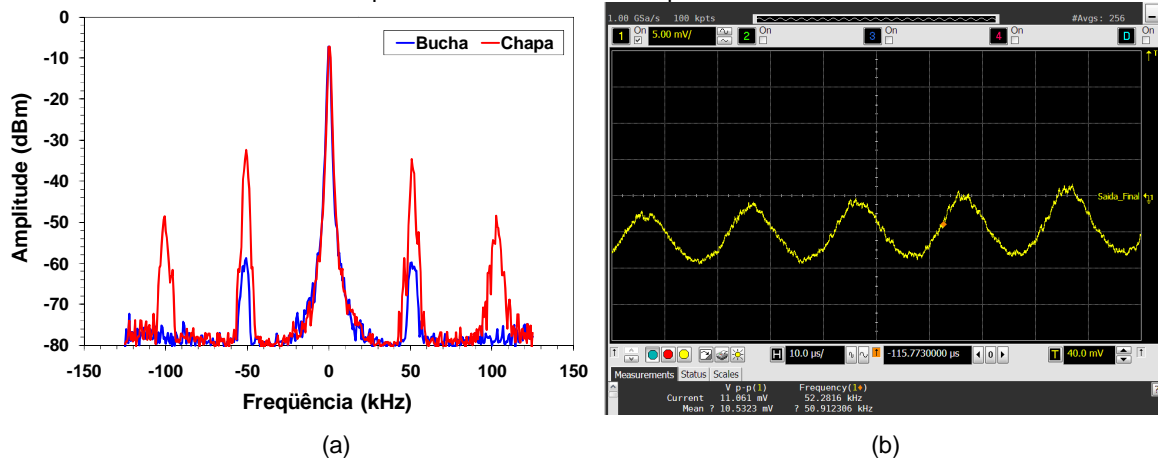


FIGURA 6 – (a) Espectro elétrico do sinal detectado pelo sistema de sensoriamento na saída do discriminador de frequência visto por um analisador de espectro elétrico e (b) visto em um osciloscópio.

Nota-se, pelos resultados obtidos, que a atenuação do sinal na superfície da bucha é muito maior do que na superfície da chapa de alumínio. As medidas foram feitas com o buzzer muito próximo ao sensor, sendo que para distâncias um pouco maiores, a atenuação é tanta que não é possível detectar as emissões acústicas. Como o objetivo deste método é a detecção de emissões acústicas geradas no interior da bucha, observou-se a necessidade de aperfeiçoar a sensibilidade do sensor.

Em um próximo teste os buzzers instalados dentro da bucha simulada foram excitados um por vez de tal forma a se observar uma possível detecção do sinal no sensor óptico fixado na parte externa da bucha. Infelizmente não foi possível obter sinais provenientes destes sensores.

Embora não seja o objetivo principal do projeto investigamos a possibilidade dos sensores instalados internamente detectarem ondas acústicas geradas por DPs das buchas. Assim os buzzers internos das buchas foram individualmente excitados e os sensores internos foram avaliados. A Figura 7 mostra a resposta do sensor óptico S3 aos buzzers T1, T2 e T3. Neste caso a figura mostra que houve boa detecção do sinal sendo que a melhor resposta para este sensor refere-se ao buzzer mais próximo T3. Os sensores mais internos detectaram os sinais acústicos, porém com nível abaixo de -60 dBm.

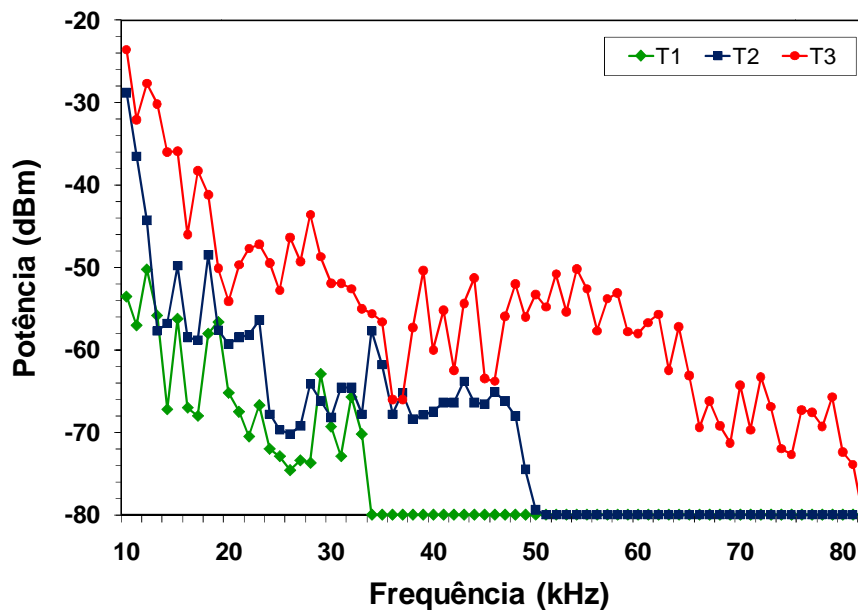


FIGURA 7 – Resposta do sensor óptico S3 aos buzzers T1, T2 e T3.

4.0 - TÉCNICA HÍBRIDA ÓPTICA/RADIO-FREQUÊNCIA

O uso de antenas para captação das ondas eletromagnéticas emitidas pelas descargas parciais em hidrogeradores tem sido estudado desde décadas passadas [4] – [7]. A segunda técnica desenvolvida neste projeto para detecção de descargas parciais de buchas utiliza a técnica da captação por uma antena das ondas eletromagnéticas emitidas pelas descargas, modulando a seguir um dispositivo semicondutor FET (*Field Effect Transistor*) que aciona um laser semiconductor conectado ao FET. Esta técnica é inédita e apresenta as vantagens de não intrusão, redução da captação de ruídos interferentes pelo uso da fibra óptica, isolamento galvânica, grande flexibilidade e excelente sensibilidade. A Figura 8 mostra o diagrama do sistema de sensoriamento baseado nesta técnica. Para que o sensor possa transmitir a forma de onda completa é necessário polarizar o laser com uma corrente contínua acima do limiar. Isto é facilmente feito em aplicações gerais através de um circuito eletrônico adequado e uma fonte de tensão ou bateria. Para prover o sensor com isolamento galvânica é necessário polarizar o laser do sensor com corrente contínua sem a necessidade de uso de uma fonte de alimentação local. Tal objetivo é conseguido através da técnica de alimentação por fibra óptica [4]. Nesta técnica uma fibra óptica conduz uma potência óptica em um comprimento de onda e em um nível adequado para uma célula fotovoltaica (PV) conectada em paralelo com o laser. A célula fotovoltaica tem a função de transformar a potência óptica detectada em tensão e corrente para alimentação do laser. A célula fotovoltaica utilizada neste projeto é um dispositivo adequado para alimentação de sensores, porém sua capacidade de fornecimento de potência é limitada. São disponíveis comercialmente células fotovoltaicas para uso com fibras multimodo operando na janela de 830 nm e fibras monomodo para a faixa de comprimentos de onda de 1000 a 1600 nm. As características do PV utilizado neste projeto são tensão = 2,1 V e corrente máxima 45 mA. Foi utilizada neste caso uma fonte de alimentação óptica de alta potência no comprimento de onda de 830 nm.

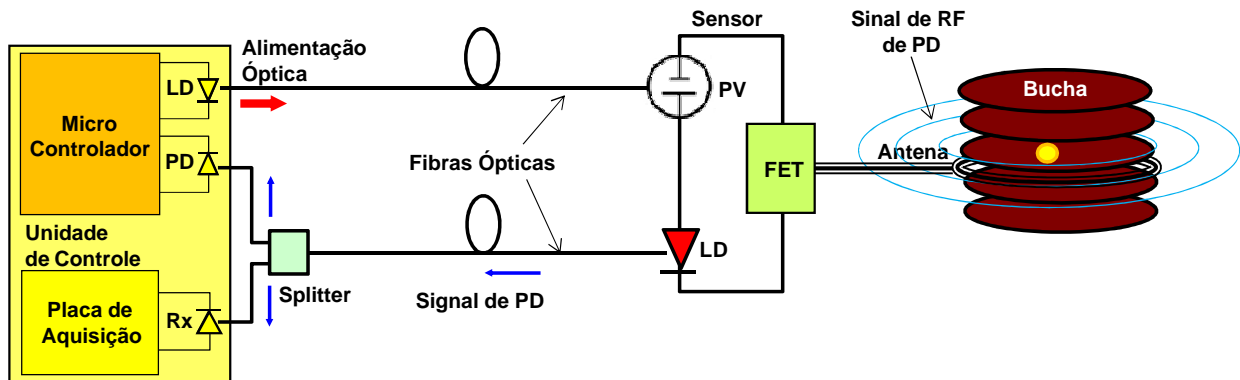


FIGURA 8 – Diagrama do sistema de sensoriamento baseado técnica híbrida óptica-RF.

A Figura 9(a) mostra um protótipo da unidade de controle do sistema de sensoriamento baseado técnica híbrida óptica-RF. Para simular o funcionamento da técnica óptica/RF na detecção de descargas parciais, utilizamos um centelhador comercial em série com um resistor de 100 k Ω alimentado por uma tensão de 220 Vac retificada. Este dispositivo foi colocado no interior de uma bucha de transformador como mostra a Figura 9(b). A quantificação da descarga gerada por este centelhador foi feita através da integral no tempo da corrente elétrica medida por uma ponta de corrente associada a um osciloscópio Tektronix 7854. O valor da descarga obtido foi de 2,5 nC o que é um valor alto para buchas mas que permitiu o desenvolvimento inicial do sistema.

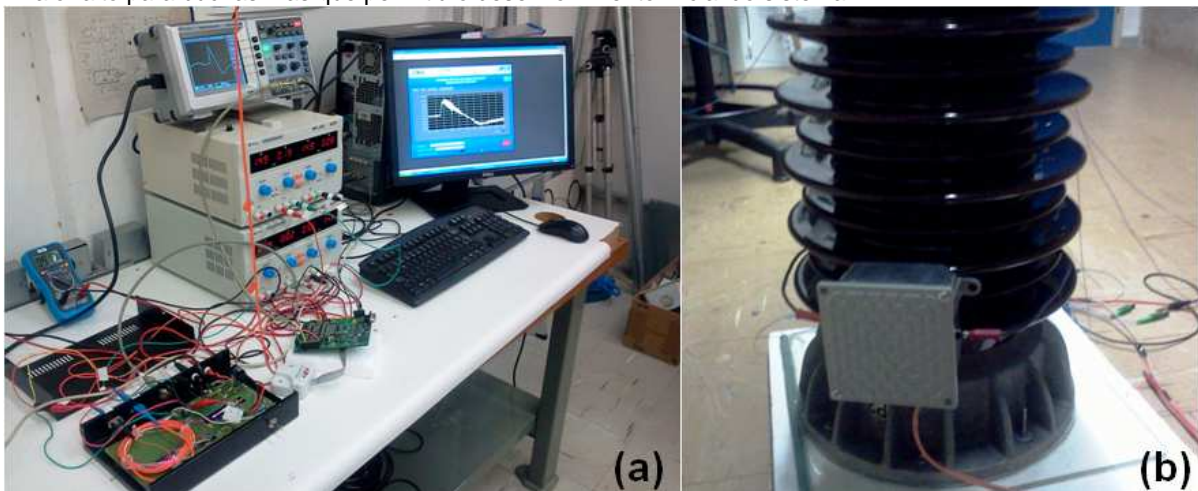


FIGURA 9 – (a) Protótipo da unidade de controle do sistema de sensoriamento óptico/RF e (b) sensor fixado na base da bucha.

Alguns testes iniciais do sistema foram feitos em ambiente externo tendo como objetivo aperfeiçoar as dimensões da antena do sensor. A antena é constituída de um fio de cobre rígido de bitola 1,5 mm. Sabe-se que antenas são fortemente influenciadas pelos fatores como forma geométrica e direcionalidade. A Figura 10(a) mostra a sensibilidade antena do sensor do tipo dipolo em função do comprimento da antena. A antena foi mantida a 40 cm de distância do centelhador. Para um comprimento de antena inferior a 60 cm, o sistema não foi capaz de detectar o sinal simulado da descarga parcial. Fixando um comprimento da antena de 120 cm foram realizados os testes de direcionalidade da antena. Foi feita a rotação da antena em torno do eixo z (eixo que liga o centro da antena até o centro do centelhador). Os resultados são mostrados na Figura 10(b). A grande variação da amplitude da tensão detectada mostra que a influência da direcionalidade da antena no sistema é significativa.

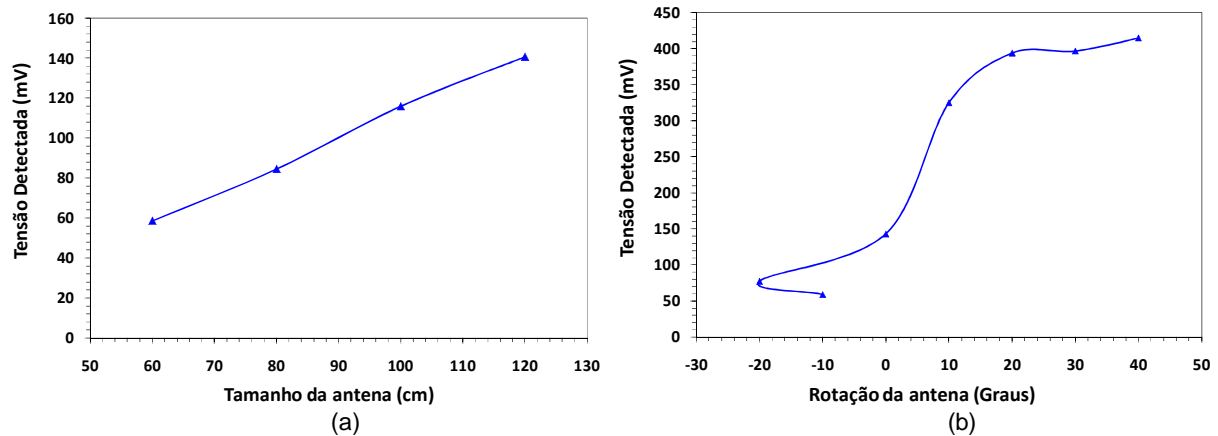


FIGURA 10 – (a) Sensibilidade do sensor em função do comprimento da antena e (b) do ângulo da antena em relação ao ponto de geração da descarga.

Para os testes na bucha o sensor híbrido óptico/RF foi fixado próximo ao tap capacitivo com a antena, em formato circular, abraçando a base da bucha conforme mostra a Figura 9(b). O centelhador foi então deslocado no sentido longitudinal da bucha em passos de 10 cm e a forma de onda da saída do sensor óptico registrado através do osciloscópio. A Figura 11(a) mostra a aquisição feita para uma DP com o centelhador a 10 cm de distância da antena e a Figura 11(b) a sensibilidade de detecção em relação à distância entre o centelhador e o sensor.

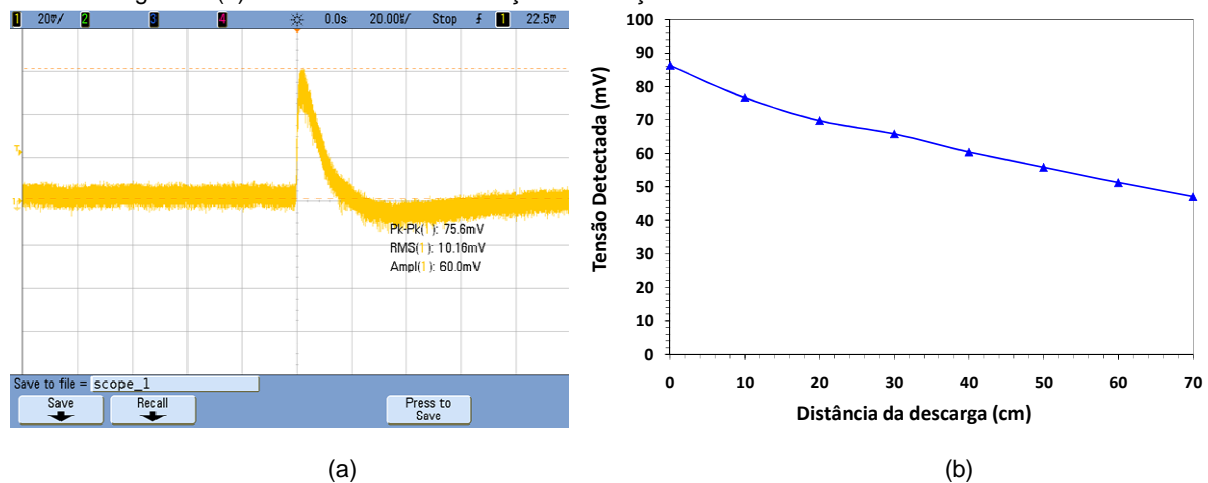


FIGURA 11 - (a) Forma de onda observada para uma DP de 2500 pC a 10 cm de distância da antena e (b) sensibilidade de detecção em relação à distância entre o centelhador e o sensor.

5.0 - CONCLUSÃO

Apresentamos neste trabalho uma descrição de dois potenciais métodos ópticos para medições de descargas parciais em buchas. No caso do método interferométrico a otimização do sistema de detecção com o uso de laser com grande comprimento de coerência, bobina de fibras de compensação e de sensores a fibra com diferentes geometrias possibilitaram a detecção de ondas acústicas de 10 kHz a 200 kHz com níveis de sinal de até -10 dBm resultando em uma relação sinal-ruído de até 65 dB. Apesar da enorme faixa dinâmica obtida neste sistema verificou-se que a onda acústica é também fortemente atenuada pelo elemento cerâmico da bucha. Por outro lado a este método que é totalmente dielétrico apresentou resultados muito bons quando os sensores a fibra se encontram alojados dentro da bucha, mais especificamente em suas bordas onde existe uma pequena região preenchida somente com óleo.

Existem desafios a serem enfrentados para integrar os sensores dentro da bucha de tal forma a maximizar a captação acústica e que devem ser estudados em futuras pesquisas.

Já com o sistema de sensoriamento óptico/RF foi possível efetuar a detecção de RF gerada por uma descarga parcial de 2500 pC no interior da bucha por distâncias compatíveis com o corpo da bucha. Esta técnica que apresentou excelente sensibilidade possibilita o uso do sensor de forma não intrusiva podendo ser facilmente adaptada na base da bucha tendo como desafios a integração com um sistema de filtragem no sistema de interrogação do sensor a supressão de eventuais interferências captadas pelo sensor.

Em relação ao custo esta técnica apresenta também uma vantagem devido ao fato de que os dispositivos especiais utilizados são mais simples e baratos do que os da técnica interferométrica.

Pelos motivos acima citados a técnica de sensoriamento óptico/RF será a escolhida para posteriores testes de desempenho em buchas reais energizadas, testes estes a serem feitos em um laboratório especializado e em seguida em uma subestação da CEMIG a ser escolhida.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Phung B.T., Zagari A, Blackburn T.R., "Acoustic Monitoring of Partial Discharges Using Fibre Optic Sensors", Proceedings of CIGRE Session 2006, (2006).
- [2] Posada-Roman, Julio; Garcia-Souto, Jose A.; Rubio-Serrano, Jesus. 2012. "Fiber Optic Sensor for Acoustic Detection of Partial Discharges in Oil-Paper Insulated Electrical Systems." Sensors 12, no. 4: 4793-4802.
- [3] Kageyama, K.; Murayama, H.; Uzawa, K.; Ohsawa, I.; Kanai, M.; Akematsu, Y.; Nagata, K.; Ogawa, T., "Doppler effect in flexible and expandable light waveguide and development of new fiber-optic vibration/acoustic sensor," Lightwave Technology, Journal of , vol.24, no.4, pp.1768,1775, April 2006.
- [4] Rosolem, J. B., Hurtado, Maria Do Rosário Fabeni, Flóridia, Claudio, Rossi, José Antonio Donizete, Juriollo, Antonio Amauri, Borin, Flavio, Sanz J. P. M., "Desenvolvimento de Sistema de Sensoriamento Óptico para Detecção de Descargas Parciais em Hidrogeradores", Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica XIX SNPTEE, 2007, Rio de Janeiro/RJ
- [5] T. Hoshino, M. Hikita, H. Okubo, "Consideration of Radiated Electromagnetic Waves from Partial Discharge Based on Half-Wave Dipole Antenna Model", Electrical Engineering in Japan, Vol. 126, No. 4, 1999.
- [6] B.G. Stewart, D.M. Hepburn, I.J. Kemp, A. Nesbitt, And J. Watson, "Detection and characterization of partial discharge activity on outdoor high voltage insulating structures by RF antenna measurement techniques", 11th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 99), CP467, p. v5-188, Londres, Agosto, 1999.
- [7] P. J. Moore, I. Portugalsky, I. A. Glover, Member, "A Non-Intrusive Partial Discharge Measurement System based on RF Technology", IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2003), p. 633, Vol.2, Julho, 2003.