



**XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

3587
GTM/15

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes

Desenvolvimento de sistema de monitoramento óptico de multiparâmetros para transformadores de potência

JOÃO BATISTA ROSOLEM(1); AGUINALDO GOES DE MELO(2); DANIEL BENETTI(2); DANILO CESAR DINI(3); JOAO PAULO VICENTINI FRACAROLLI(4); RODRIGO PERES(5); CLAUDIO FLORIDIA(6); FABIO RENATO BASSAN(7); MARCIO COLAZZA ARGENTATO(8); LUIZ ALKIMIN DE LACERDA(9); CPQD(1); Copel GET(2); CPQD(3); CPQD(4); CPQD(5); CPQD(6); CPQD(7); CPQD(8); LACTEC(9);

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de múltiplos parâmetros para transformadores de potência. A rede de sensores ópticos conectados no transformador é do tipo FBG e fará a monitoração da temperatura interna, da deformação da parte ativa, de descargas parciais e de gases dissolvidos no óleo do transformador. A utilização destes sensores para a medição de parâmetros fundamentais para saúde do transformador permitirá a obtenção de uma plataforma de monitoração integrada, visto que a mesma irá monitorar múltiplos parâmetros do transformador. O desenvolvimento deste sistema para a COPEL-GeT está sendo realizado através do projeto ANEEL PD 6491-0379/2015.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores de potência, Monitoramento óptico, Sensores ópticos, FBG, Fiber Bragg Grating.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os transformadores de grande porte são utilizados em instalações industriais, comerciais e de concessionárias de energia. Uma falha inesperada de um transformador pode causar paradas prolongadas nas linhas de produção da indústria, debilitar uma usina elétrica ou causar interrupções de energia em grandes áreas.

Dependendo da extensão dos danos causados, a interrupção pode durar semanas. Transformadores de potência formam uma parte crítica, altamente carregada e muito custosa nos sistemas de transmissão de energia elétrica. Dentro destes equipamentos elétricos podem ocorrer aquecimentos locais graves, devido a degradação do isolamento sólido, da modelagem imprecisa do comportamento térmico e das oscilações no sistema elétrico de potência. Os mecanismos de degradação dentro do transformador podem levar ao rompimento prematuro do isolamento e à falha catastrófica do equipamento. Para evitar esse tipo de ocorrência, as concessionárias de energia utilizam-se tradicionalmente de programas de manutenção preventiva periódicos, retirando o equipamento de serviço para medições off-line, porém o monitoramento em tempo real dos ativos da concessionária possibilita um aumento na confiabilidade do sistema e garante retorno econômico [1].

Com o advento da tecnologia de sensores de fibras ópticas, novas alternativas de medição se apresentam para uso em transformadores [2]. As vantagens dos sensores ópticos são: imunidade das fibras ópticas frente às interferências eletromagnéticas, capacidade de transmissão de sinais de elevada frequência e largura de banda, capacidade de multiplexação de sinais de vários sensores em uma única fibra, compactação e uso de espaços reduzidos, possibilidades de medições não invasivas, além do baixo custo proporcionado pela escolha de elementos adequados para a monitoração. Em particular, a realização da monitoração em tempo real e de múltiplos parâmetros nos transformadores de potência, através do uso de uma única tecnologia de sensores a fibra óptica, objetiva a obtenção simultânea de vários parâmetros de desempenho dos transformadores, tais como: temperatura de trabalho, deslocamento de partes mecânicas, descargas parciais e concentração de gases dissolvidos no óleo. Pretende-se detectar antecipadamente indícios de problemas internos, tais como a ocorrência de pontos com temperatura elevada, aumento excessivo da concentração de gases dissolvidos, dentre outros.

Esse tipo de monitoramento permite prevenir interrupções do fornecimento causadas por eventuais problemas nos transformadores. Fazendo uso da tecnologia de fibra e dispositivos ópticos que são imunes à interferência eletromagnética, resistentes a temperatura e umidade, é possível o estabelecimento de uma rede de sensoriamento de um conjunto de transformadores da planta de forma confiável e eficiente.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de monitoração composta de uma rede de sensores utilizando uma única tecnologia, a FBG (Fiber Bragg Grating) [3], para monitoração on-line de múltiplos parâmetros do transformador de potência. Essa rede de sensores permite a instrumentação do transformador através de uma única fibra óptica e de vários sensores em série, que farão a monitoração da temperatura interna, da deformação da parte ativa, de descargas parciais (DP) e de gases dissolvidos no óleo do transformador. O projeto desenvolve também métodos de encapsulamento e de instalação dos sensores na estrutura dos transformadores, pois em seu interior a temperatura e a tensão elétrica são elevadas, necessitando de materiais de encapsulamento adequados. A utilização da mesma tecnologia de sensores para a medição de parâmetros fundamentais para saúde do transformador permitirá a obtenção de uma plataforma de monitoração integrada, visto que a mesma irá monitorar múltiplos parâmetros do transformador. O trabalho apresenta parte dos resultados do projeto de P&D de código PD-06491-0379/2015 desenvolvido pelo CPqD para a COPEL GeT no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

A composição genérica do sistema de monitoramento óptico de multiparâmetros para transformadores de potência é mostrada na Figura 1. O elemento principal do sistema é uma rede de sensores FBG instalada dentro do transformador de potência, sendo que sensores FBG serão divididos em quatro tipos para monitoração dos seguintes parâmetros: descargas parciais, deformação (ou pressão) de enrolamentos, gases dissolvidos no óleo e temperatura.

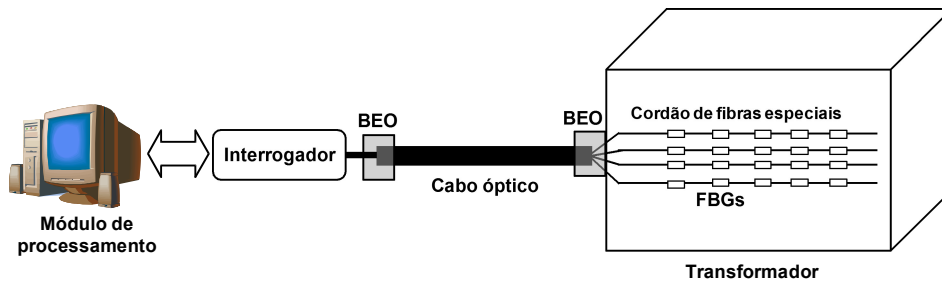


Figura 1 - Diagrama de blocos sistema de monitoramento óptico de multiparâmetros para transformadores de potência.

Os sensores FBG para cada medição específica serão conectados em série através de um cordão de fibra óptica especial até a saída do transformador. Este cordão deverá ser resistente a altas temperaturas e preenchido totalmente com material dielétrico. A quantidade de sensores FBG para a medição de cada parâmetro ainda está sob análise.

Na saída do transformador deverá ser usada uma caixa de ligação com fibras especiais, para evitar o vazamento de óleo. Já na parte externa, os cordões de fibras especiais são emendados às fibras de um cabo óptico de uso padrão, que tem a função de levar os sinais das fibras até o interrogador dos sensores, que ficará instalado na sala de controle de uma subestação. Para alojar as emendas de fibras e excesso de cordões ópticos, serão utilizados bastidores de emendas ópticas (BEO) ou caixas de emendas de fibras ópticas, tanto no lado de saída do transformador como também na entrada da sala de controle da subestação.

O interrogador do sistema tem a função de detectar os sinais dos sensores e fazer a transformação dos sinais analógicos para digitais, baseados em uma interface padrão de comunicação. Os dados digitais são então transferidos para o módulo de processamento, que processa os sinais e os correlaciona com os parâmetros de interesse, calibrando os valores, acompanhando e gravando ao longo do tempo e comparando seus níveis.

A composição genérica do interrogador do sistema de monitoramento óptico de multiparâmetros para transformadores de potência é mostrada na Figura 2.

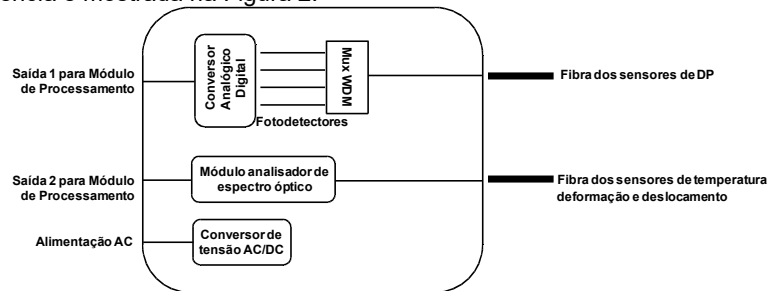


Figura 2 - Composição genérica do interrogador do sistema de monitoramento óptico de multiparâmetros para transformadores de potência.

O sistema é composto dos seguintes elementos: duas entradas/saídas ópticas diferentes, uma específica para os sensores de descargas parciais (onde a frequência do sinal pode atingir 200 kHz) e outra entrada para os sensores de temperatura, deformação e de gases dissolvidos, cuja variação do sinal não supera dezenas de hertz.

O módulo de processamento tem a função de processar os sinais e os correlacionar com os parâmetros de interesse, calibrando os valores, acompanhando e gravando ao longo do tempo e comparando seus níveis.

3.0 - DESCRIÇÃO DOS SENSORES

Uma FBG é um sensor óptico do tipo pontual. É construído criando um refletor de Bragg distribuído ou uma variação periódica no índice de refração do núcleo da fibra num segmento curto de fibra óptica (Figura 3). Esta estrutura reflete comprimentos de onda específicos da luz e transmite os demais [3].

O comprimento de onda refletido no refletor de Bragg (comprimento de onda de Bragg) é definido por $\lambda_B = 2n_e \cdot \Lambda$, onde n_e é o índice de refração efetivo da grade e Λ é o seu período de espaçamento.

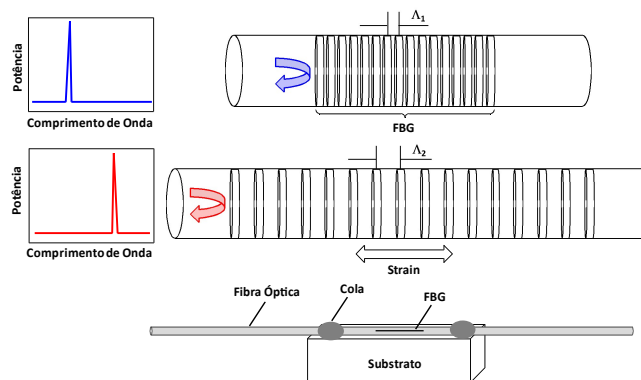


Figura 3 - Diagrama (exagerado) de uma FBG não deformada e deformada. A mudança de comprimento de onda de Bragg com a deformação e uma FBG fixada em um substrato adequado para medir parâmetros físicos.

Quando uma deformação é aplicada à FBG, o período de rede é alterado e, conseqüentemente, o comprimento de onda de Bragg também muda de forma linear. Esta dependência do comprimento de onda da FBG com a tensão mecânica tornou-a muito interessante para uso em diversas aplicações. Muitos tipos de substratos e materiais são adaptados à FBG para construir diferentes tipos de sensores.

A principal vantagem de uma FBG para aplicação em sensoriamento é a capacidade de transformar diretamente a variação de um parâmetro físico em uma variação da grandeza óptica, neste caso no comprimento de onda. Quando comparados a sensores convencionais, como um termopar, por exemplo, os sensores FBG apresentam muitas vantagens: sendo imunes à interferência eletromagnética, dielétricos (não condutores), passivos (não necessitam de alimentação externa), leves e compactos, possuem ampla largura de banda e têm alta sensibilidade. São também resistentes à corrosão/oxidação e podem receber recobrimentos diversos.

Os sensores FBG podem ser conectados em série na mesma fibra criando uma rede de sensores. Esta característica é muito importante, pois permite que os elementos sejam conectados a um único equipamento interrogador do sinal dos sensores, reduzindo desta forma o custo total do sistema.

De acordo com estudos realizados, os principais parâmetros para avaliar a saúde do transformador são: temperatura, concentração de gases dissolvidos no óleo do transformador e descargas parciais. Um parâmetro a mais de interesse a ser monitorado é a deformação das bobinas do transformador devido aos efeitos de correntes de curto-circuito. Não é o objetivo deste artigo aprofundar no estudo destes parâmetros, mas sim descrever o uso dos sensores FBG na monitoração dos mesmos.

Neste projeto utilizaremos FBGs com as seguintes características: comprimentos de onda entre 1530 a 1560 nm, largura de linha de 0,3 nm, refletividade de 90% e cobertura da fibra de poliamida.

3.1 Sensor de Descargas Parciais

A técnica mais utilizada para monitoração de DP em transformadores de potência é a de emissão acústica. Sensores acústicos convencionais, por serem elétricos, não podem ser inseridos dentro do transformador. Uma grande vantagem das FBGs é que elas podem ser montadas dentro de transformadores de potência, aumentando assim a sua sensibilidade às emissões acústicas. Isso se dá pela sua característica de não condução de eletricidade e imunidade à interferência eletromagnética.

O transdutor de DP usando FBG, mostrado na Figura 4(a), é constituído de um tubo de material polimérico (a priori preenchido com ar) que sofrerá deformação devido à pressão acústica dos sinais de descargas parciais [4]. Como a faixa de medição acústica de DP varia de 20 a 200 kHz (ultrassom), um sistema diferenciado de interrogação foi desenvolvido, já que esta faixa de frequências é muito superior à taxa de varredura dos interrogadores de FBG para parâmetros quase estáticos, ou seja, com período de aquisição superior a dezenas ou centenas de milissegundos.

O sistema de interrogação de DP será composto de um multiplexador DWDM (Dense Wave Division Multiplexing) de 8 canais, sendo um canal para cada FBG (Figura 4(b)). Cada canal do multiplexador possui largura de banda de aproximadamente 0,9 nm e os oito canais são espaçados de cerca de 1,0 nm entre si. As grades de Bragg foram escolhidas de forma que seus comprimentos de onda estejam localizados na extremidade esquerda da região plana de cada canal, conforme mostrado na Figura 4(d). O traço azul nesta figura representa o espectro dos oito canais DWDM, conforme as suas especificações técnicas. O traço em vermelho representa as grades de Bragg em temperatura ambiente (T_{amb}). Já o traço pontilhado em magenta representa as mesmas grades de Bragg, mas em temperatura de operação (T_{op}). Nota-se que o deslocamento das grades em temperatura ambiente para a temperatura de operação ocorre totalmente dentro da faixa plana do espectro do seu canal DWDM correspondente. Isso evita que ocorram flutuações na potência do sinal refletido pela grade devido à variação de temperatura.

Para cada FBG será usado um laser DFB (Distributed Feedback Laser) com largura espectral de aproximadamente 0,04 nm. Este laser é sintonizado na borda da sua respectiva FBG, de forma que quando o comprimento de onda da grade variar devido às emissões acústicas, a potência do sinal refletido varie proporcionalmente. A Figura 4(c) mostra uma FBG com um laser sintonizado em sua borda.

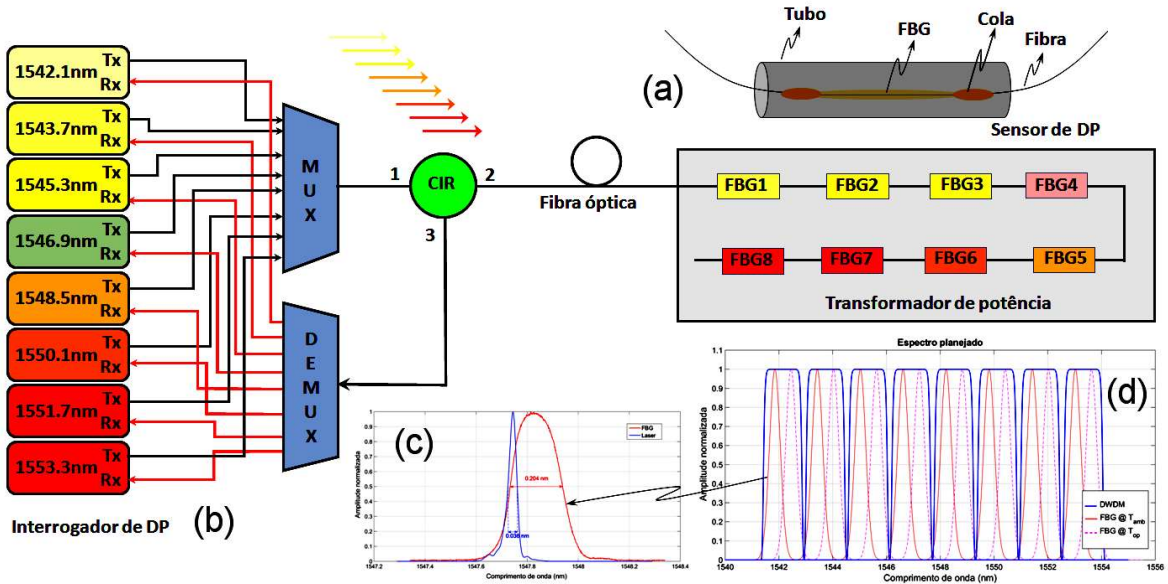


Figura 4 – Monitoração de descargas parciais com 8 canais DWDM.

Como as FBGs podem sofrer deslocamento pela ação da temperatura, é necessário que o laser, assim que sintonizado, siga o espectro da FBG para que não saia da borda. Isto será feito com um algoritmo de controle de duas etapas. A primeira etapa consiste de um controlador PI com o objetivo de definir um comprimento de onda para o laser. A partir desta posição, o sistema lê a potência óptica do sinal de retorno e o controle passará a ser feito de forma a manter esta potência constante. É importante frisar que este controle somente responde em baixas frequências, pois as variações da FBG com as emissões acústicas (centenas de kHz) devem resultar em variação de potência, mas a variação com a temperatura não (baixa frequência).

A arquitetura do sistema de monitoramento de descargas parciais está apresentada esquematicamente na Figura 4. O sistema vai ser composto de 8 (oito) transdutores de FBG para a detecção de DP e que devem estar operando em uma faixa de frequência selecionadas dentro da grade DWDM do ITU-T. Foram selecionadas as seguintes faixas espectrais da grade DWDM: C30, C32, C34, C36, C38, C40, C42, C44.

O sistema de monitoramento possui 8 placas de controle e aquisição de dados que enviam os sinais dos lasers DFB, que são multiplexados e passam por um circulador óptico, sendo transmitidos através de uma fibra óptica entre uma subestação até o transformador de potência em monitoramento. No interior do transformador de potência estão localizados os oito transdutores FBG de descargas parciais identificados por FBG1 a FBG8, os quais possuem um comprimento de onda de reflexão situado dentro da faixa dos mux/demux DWDM.

3.2 Sensor de Deformação

O desenvolvimento de experimentos para medição de deformação de bobinas de transformadores devido a correntes de curto-circuito requer a adequação do intervalo de deslocamentos esperados para a faixa de operação dos sensores de deformação. FBGs tem faixa de operação da ordem de $\pm 2000 \mu\epsilon$ em uma área de atuação da ordem de 15 a 25 mm e podem não suportar as deformações originais envolvidas na bobina do transformador. Por outro lado, sensores de deslocamento usando FBGs podem operar em faixas de pouco milímetros a centímetros. É importante analisar a condição mecânica e a tendência de mudança dos enrolamentos do transformador. Quando ocorre um curto-circuito no transformador, há um aumento do campo magnético gerado pela corrente, o que produzirá uma maior força no enrolamento (da ordem de até 10 tf). A força eletrodinâmica axial é gerada internamente ao enrolamento pela componente radial do fluxo magnético. Esta força resulta na compressão da bobina no sentido axial, causando assim a deformação do enrolamento e causando alteração da força de prensagem da parte ativa. Atualmente, os principais métodos de detecção para a condição de enrolamento incluem o método de impedância de curto-circuito e o método de análise de resposta de frequência. Esses dois métodos exigem alta precisão e imunidade a interferência, e principalmente um histórico dos ensaios antes da falha, para comparar as alterações devido a curto-circuito.

O sensor de pressão baseado em FBG é usado para monitorar a força axial do enrolamento do transformador. Dois materiais estão sendo pesquisados para serem usados como substrato do sensor FBG: (a) o próprio material usado como calço nos transformadores de potência (transformer board) e (b) o plástico de engenharia especial conhecido como poli-éter-éter-cetona (PEEK-poly-ether-ether-ketone) [5]. Enquanto que o primeiro material tem a vantagem de ser largamente utilizado na indústria de transformadores e apresenta compatibilidade demonstrada em anos, o segundo tem vantagens como: grande rigidez, melhor estabilidade dimensional e coeficiente de expansão linear muito pequeno, podendo ser usado a 250°C por um longo período.

Os encapsulamentos dos sensores de deformação são mostrados na Figura 5(a) para o transformer board e na Figura 5(b) para o PEEK.

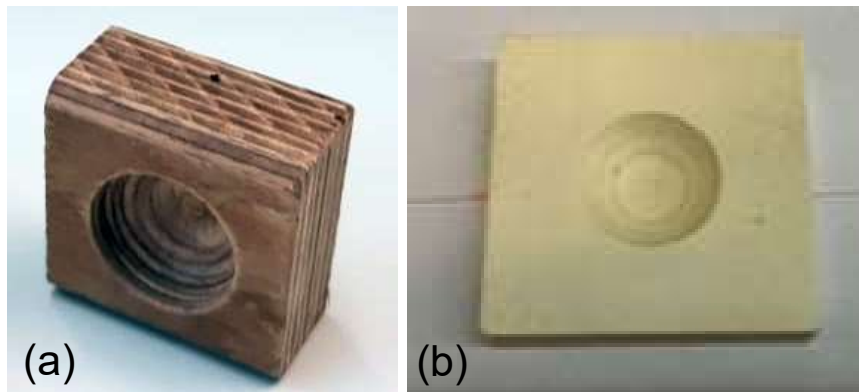


Figura 5 – Sensor de deformação sua usando FBG.

3.3 Sensor de Gases Dissolvidos

O gás dissolvido a ser monitorado com a FBG será o hidrogênio. A concentração de hidrogênio, que é gerado por vários efeitos (como por exemplo, descargas parciais) é um importante indicador da saúde do transformador. As concentrações de hidrogênio dissolvido no óleo do transformador de potência estão tipicamente na faixa de dezenas de ppm, mas podem atingir valores da ordem de milhares ppm se o transformador estiver com problemas. Para monitorar a concentração de hidrogênio, as FBGs serão associadas ao material paládio (Pd) e suas ligas como material de detecção. O hidrogênio é absorvido pelo paládio, causando sua expansão. A Figura 6 ilustra a proposta do sensor de monitoração do hidrogênio [6].

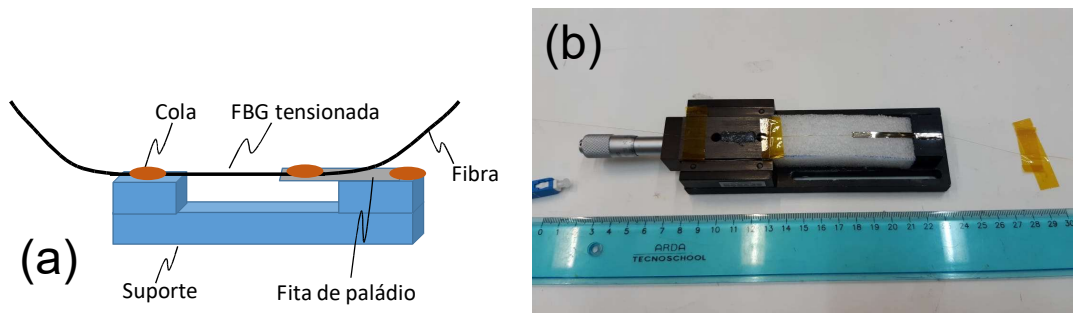


Figura 6 – Sensor de hidrogênio usando FBG e paládio.

3.4 Sensor de Temperatura

Na prática, todas as FBGs anteriores são também sensores de temperatura e efetivamente serão usadas para a medição da temperatura, além dos outros parâmetros. No caso da medição de temperatura em pontos específicos do transformador, serão utilizadas FBGs devidamente encapsuladas para esta função [7]. No caso serão utilizados sensores FBG distribuídos (FBG array).

Além disso, com o objetivo de compatibilizar a implantação dos sensores, não só de temperatura, como de outros parâmetros dentro do ambiente do transformador, atendendo os critérios elétricos e de temperatura, serão utilizados cabos com revestimento de polímero reforçado com fibra de vidro, ou GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), que aumentam a resistência mecânica das fibras e podem ser utilizados em ambientes hostis. Estes novos dispositivos serão utilizados na otimização da posição dos sensores de temperatura.

A especificação técnica definida do cabo sensor FBG Array é para uso na temperatura de operação entre -40 a 150°C . O material do cabo de GFRP tem diâmetro de $1,0$ mm e terá 5 FBGs distanciadas de $2,0$ metros com um comprimento total de $12,0$ metros.

4.0 - RESULTADOS

4.1 Testes do Sensor de Descargas Parciais

O sensor de descargas parciais foi testado usando um recipiente contendo óleo mineral isolante, de forma a simular o ambiente interno de um transformador. Nestas condições, levantamos a resposta em frequência do transdutor. Para isso, usamos como fonte de emissões acústicas um hidrofone conectado a um gerador de sinais. Assim, aplicamos um sinal senoidal em rajadas periódicas, sendo que cada rajada compreende cinco ciclos da senoide. Além disso, variamos a frequência do sinal senoidal para observar a resposta do sensor, ao mesmo tempo em que um segundo hidrofone foi usado como referência para comparação das amplitudes dos sinais acústicos medidos. A resposta do sensor foi medida usando um circuito de interrogação óptico, que converte o comprimento de onda da luz refletida pela FBG em tensão elétrica. A saída deste circuito foi medida usando um osciloscópio, bem como o sinal do hidrofone de referência. A Figura 7(a) mostra de forma esquematizada deste arranjo experimental. O sinal gerado pelo hidrofone emissor foi usado como fonte de *trigger* para o osciloscópio.

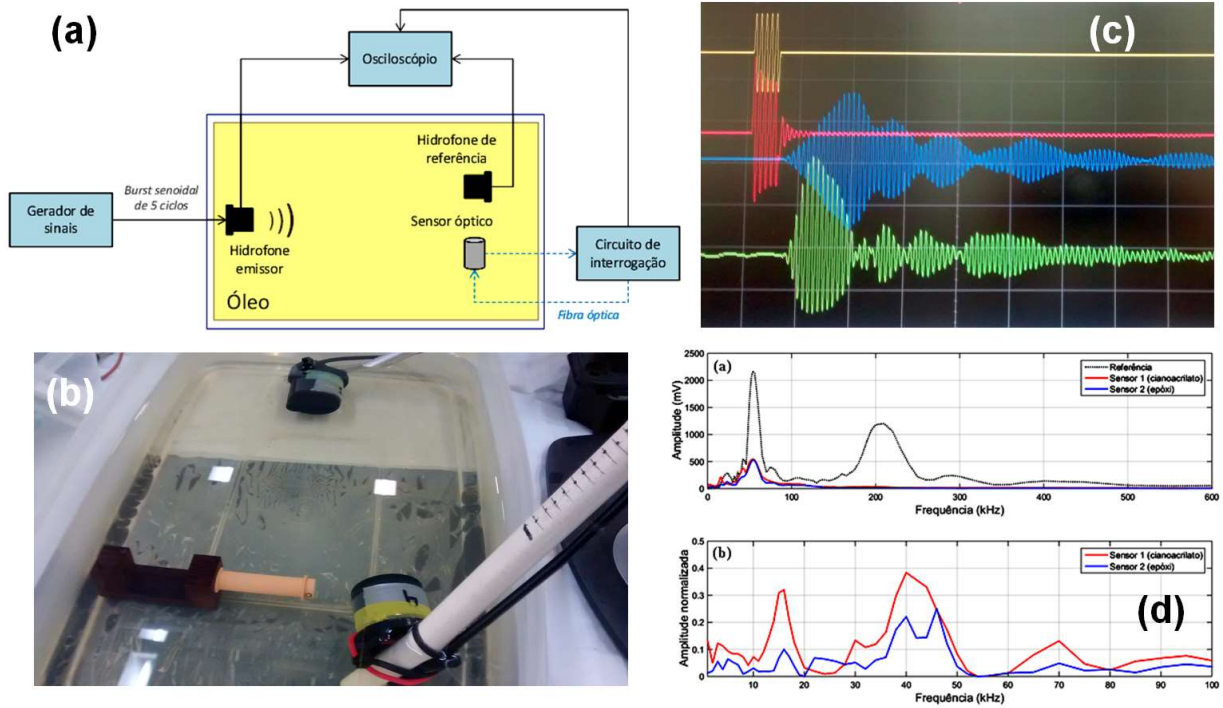


Figura 7: (a) Diagrama do arranjo experimental usado para levantar a resposta em frequência do sensor. (b) Fotografia do arranjo experimental. (c) Formas de onda captadas pelo osciloscópio. (d) Resposta em frequência dos sensores FBG em comparação com o hidrofone de referência.

Com este arranjo experimental, variamos a frequência do sinal do hidrofone emissor de 1 kHz até 600 kHz. Dois sensores foram testados, e ambos operando pelo mesmo princípio e com o aspecto de um mandril laranja mostrado na Figura 7(b), mas as suas respectivas FBGs foram fixadas usando colas diferentes. No sensor 1 foi usada uma cola a base de epóxi, enquanto que no sensor 2 usamos cianoacrilato. A Figura 7(c) mostra as formas de onda, sendo que o traço vermelho é o sinal do hidrofone emissor, o azul é o sinal do hidrofone de referência e o traço verde é a forma de onda do sensor FBG. As respostas em frequência para os dois sensores FBG testados são mostradas na Figura 7(d).

Pelo gráfico da Figura 7(d), podemos notar que ambos os sensores possuem respostas em frequência similares. Assim, os tipos de cola usados para estes testes não apresentam uma influência significativa na resposta do sensor. Também observamos que enquanto o hidrofone de referência possui basicamente duas faixas principais de resposta, a primeira centrada em aproximadamente 50 kHz e a segunda centrada em cerca de 210 kHz, os sensores FBG respondem na primeira faixa. Para frequências superiores a esta faixa de resposta, as amplitudes medidas são irrelevantes. Contudo, como as descargas parciais ocorrem também em frequências menores que 100 kHz, concluímos que este tipo de sensor é capaz de detectar DP em transformadores. Quanto à amplitude do sinal medido, o uso de amplificadores e supressores de ruído no circuito eletrônico de detecção são alternativas viáveis para a otimização do sistema de medição.

4.2 Testes do Sensor de Deformação

Os sensores de deformação construídos com PEEK e com transformer board foram testados. Para isso, foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade de aplicação de 2.000 kgf (Figura 8(a)) e um interrogador FBG da Micron Optics (modelo si155). O sensor constituído de transformer board foi construído colando as extremidades da fibra óptica, mantendo a região central livre de cola, sobre uma parte do material bipartido. Em seguida, as duas partes foram coladas. Para o ensaio, o sensor foi submetido a 5 ciclos de compressão e descompressão com forças que variaram entre 0 a 2.000 kgf, com passos de 400 kgf a cada 60 segundos. Os gráficos das Figuras 8(b) e (c) apresentam os resultados obtidos para o ensaio durante 2 ciclos.

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que o sensor construído com o material transformer board apresentam ciclos de compressão e descompressão bem próximos. Nestes gráficos é apresentada a variação do comprimento de onda em função da pressão aplicada, e neles é possível observar que o processo de compressão é linear enquanto que o processo de descompressão não é linear, devido à lenta relaxação do material transformer board.

Em relação ao uso do material PEEK, está sendo desenvolvido um projeto de encapsulamento que contempla o uso de colas especiais para uso em temperaturas compatíveis com a do transformador.

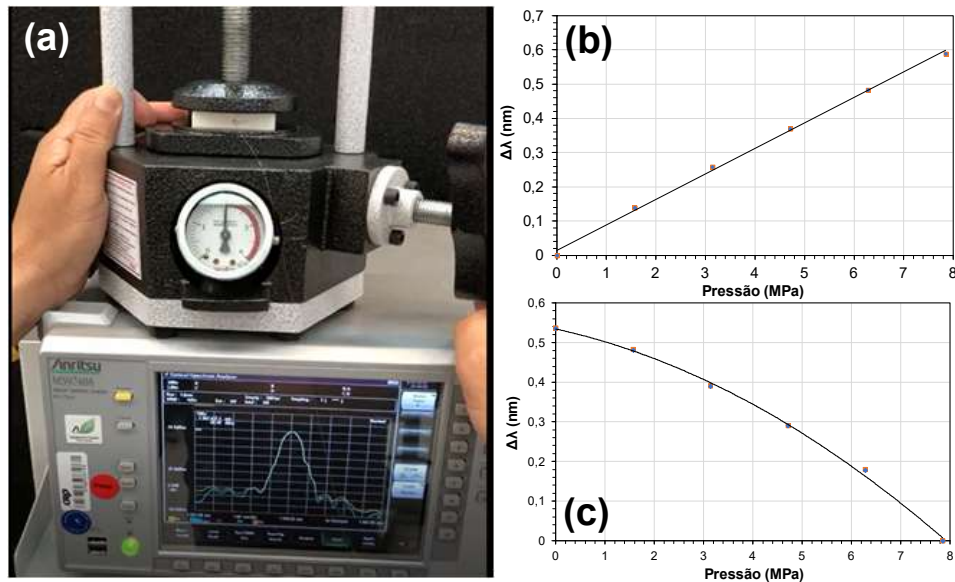


Figura 8: (a) Prensa hidráulica para teste do sensor de deformação, (b) resultados de 2 ciclos de compressão do sensor e (c) resultado de 2 ciclos de decompressão do sensor.

4.3 Testes do Sensor de Gases Dissolvidos

Para o sistema de detecção de H_2 dissolvido em óleo, foi utilizada uma folha de liga de paládio-prata (PdAg) na proporção 75/25%, com 10 μm de espessura, conforme mostrado na Figura 6(b). O protótipo do sensor foi colocado dentro de um recipiente hermético (Figura 9(a)) contendo uma amostra de óleo mineral isolante de transformador com concentração conhecida de hidrogênio. O recipiente foi colocado em uma câmara climática e mantido a 25° C durante todo o experimento. Usou-se o interrogador previamente descrito da Micron Optics (modelo si155) para monitorar o sensor. Podemos verificar na Figura 9(b) a variação do comprimento de onda da FBG em função do tempo, em dias, devido à absorção de H_2 no paládio, indicando os eventos ocorridos no período. O evento 1 corresponde à colocação do óleo com H_2 (amostra com 33.560 ppm medido em 13 de junho de 2018). É possível verificar que o comprimento de onda foi alterado para o valor de 1553,953nm e a partir de então decaiu até estabilizar-se no comprimento de onda de 1553,915nm. Nota-se que houve uma pequena variação de 0,035 nm neste período de (05/11) a (13/11) dentro da câmara climática operando a 25°C.

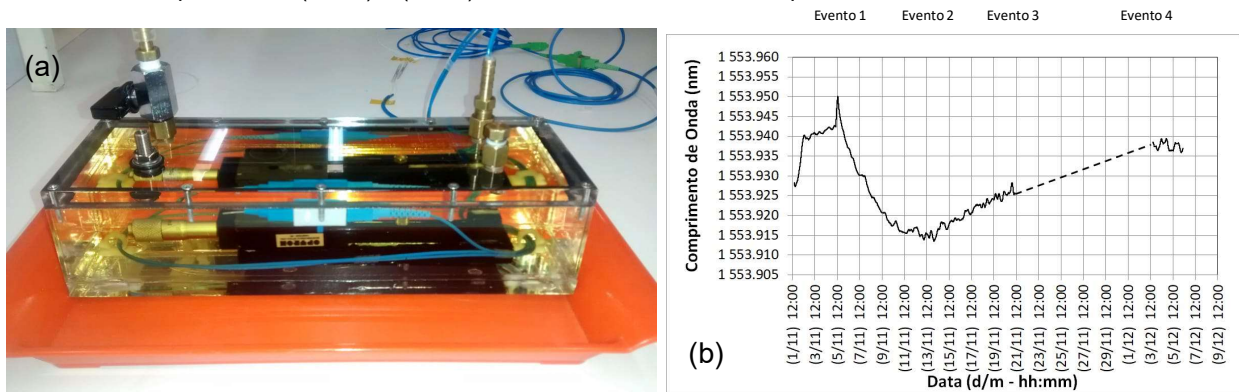


Figura 9: (a) Recipiente contendo o óleo com concentração de hidrogênio conhecida e (b) variação do comprimento de onda em função do tempo (dias) devido a absorção de H_2 no paládio.

No evento 2 foi efetuada a retirada do óleo do recipiente. Até a data do evento 3 pode-se verificar a tendência da liberação de H_2 do paládio e a volta da FBG para o comprimento de onda inicial. Neste evento 3 foi necessária a retirada do interrogador e, portanto, a aquisição dos dados foi interrompida. A câmara climática foi mantida com a temperatura de 25°C e a aquisição de novos dados foi retomada no evento 4 com a recolocação do interrogador e mantida até 06 de dezembro de 2018, que foi a data final dos testes. A estabilização da FBG no comprimento de onda de 1553,937 nm indica um retorno às condições iniciais (pré-inserção do óleo), cujo valor era de aproximadamente 1553,940 nm (valor médio antes do evento 1).

Deste modo, atribui-se o deslocamento em comprimento de onda à presença do H_2 no óleo, uma vez que a temperatura foi mantida constante durante todo o processo. Entretanto, o deslocamento foi bastante reduzido e duas hipóteses foram levantadas: (i) a concentração de H_2 no óleo pode ter se reduzido durante o seu período de armazenamento e (ii) o efeito do gás dissolvido em óleo sobre o paládio é muito menor que o obtido para uma mistura de gás atuando diretamente sobre este metal. Para inferir a causa deste pequeno deslocamento, a amostra de óleo foi levada para análise em laboratório especializado, resultando em um valor de 2.600 ppm em 14 de

fevereiro de 2019. Além disso, novos experimentos estão sendo programados para detecção do H₂ pelo paládio em ambiente gasoso, sem óleo, para confirmar a resposta do aparato. Para tanto será necessário a montagem de uma infraestrutura laboratorial para testes em gás e garantir a hermeticidade da câmara de gás onde o sensor será inserido, uma vez que o H₂ escapa facilmente para a atmosfera. O intuito é comparar os resultados em termos de deslocamento de comprimento de onda e tempo de resposta de H₂ dissolvido e H₂ no ar com a literatura acadêmica, para garantir o aperfeiçoamento do elemento sensor. De acordo com a Figura 9(b), o tempo de resposta foi de aproximadamente 8 dias, muito maior que o reportado na literatura para o H₂ em forma gasosa.

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu o desenvolvimento e os testes dos sensores de um sistema de monitoramento em tempo real de múltiplos parâmetros do transformador de potência. A rede é composta de sensores ópticos que são conectados em série no transformador e fazem a monitoração da temperatura interna, da deformação da parte ativa, de descargas parciais e da concentração de gases dissolvidos no óleo do transformador. A utilização destes sensores para a medição de parâmetros fundamentais para saúde do transformador permitirá a obtenção de uma plataforma de monitoração integrada, visto que a mesma irá monitorar múltiplos parâmetros importantes do transformador. Em uma etapa posterior o sistema será testado com todos os sensores integrados ao interrogador, inicialmente em um simulador de efeitos do transformador e posteriormente em um transformador de distribuição para a verificação em uma escala reduzida dos efeitos monitorados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) E. Aburaghiega et al, "Power transformer health monitoring: A shift from off-line to on-line detection," 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, pp. 1-6, 2015
- (2) EPRI, "Development of Multiplexed Fiber-Optic Sensors for On-line Monitoring of Electrical Faults and Thermal Faults Inside High Voltage Transformers", Product Id: 1012342, 2006.
- (3) J. B. Rosolem, "Smart fiber optic sensors for applications in electrical power systems". Frontiers of Science and Technology (pp. 97-109). Berlin, Boston: De Gruyter, 2017.
<https://www.degruyter.com/view/books/9783110537680/9783110537680-007/9783110537680-007.xml>
- (4) S. Lima et al, "Mandrel-based fiber-optic sensors for acoustic detection of partial discharges - A proof of concept" IEEE Transactions on Power Delivery, v. 25, n. 4, p. 2526-2534, 2010.
- (5) Y. Pan et al, "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Spheroidal-Cavity-Overlapped FBG", IEEE Photonics Journal, Volume: 7, Issue: 6, Dec. 2015.
- (6) M. Fisser et al, "Palladium Based Hydrogen Sensors Using Fiber Bragg Gratings," in Journal of Lightwave Technology, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.
- (7) Y. Jiang et al, "Fiber Bragg Grating Sensors for Temperature monitoring in Oil-Immersed Transformers", 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2016.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



- João Batista Rosolem, concluiu o Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo. Suas áreas de atuação no CPQD é a de sensores de fibra óptica para sistemas de energia elétrica (temperatura de rotor, temperatura de barramentos e linhas de transmissão, descargas parciais de estator de hidrogeradores e de buchas de transformadores, qualidade de contato de chaves seccionadoras, nível de água de barragens, piezômetros, corrente e tensão).

- Aguinaldo Goes de Melo - É graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e especialista em instrumentação pela Universidade Federal do Paraná. Atualmente é engenheiro eletricitista da Companhia Paranaense de Energia. Tem experiência na área de sistemas Elétricos de potência, tais como transformadores de alta tensão.

- Daniel Benetti - É Mestre Profissional em Desenvolvimento de Tecnologia pelo Instituto Lactec. Atualmente é engenheiro de manutenção de equipamentos de subestações na Copel Geração e Transmissão. Atua principalmente nos seguintes temas: ensaios e diagnóstico de equipamentos de subestações, confiabilidade aplicada a manutenção, dispositivos de monitoramento on-line, tratamento de óleo isolante, técnicas de manutenção em transformadores e reatores, inspeção em equipamento de alta tensão, elaboração de procedimentos e instruções técnicas de trabalho, cursos de formação e aperfeiçoamento na empresa, participação em projetos de pesquisa.

- Danilo César Dini - É Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. Possui certificação PMP-Project Management Professional pelo PMI-Project Management Institute. Atualmente é pesquisador no CPQD. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Comunicações Ópticas prestando consultoria em caracterização de fibras ópticas e atuando na coordenação e caracterização de redes ópticas de longa distância e metropolitanas. Tem atuado em projetos de sensores ópticos para o monitoramento em barragens de usinas hidrelétricas, subestações e transformadores de potência em P&D para o Setor Elétrico

- João Paulo Vicentini Fracarolli - É Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. Trabalha como pesquisador no CPqD, atuando em projetos de pesquisa e desenvolvimento envolvendo sensores baseados em fibras ópticas. Atualmente está participando de projetos que envolvem aplicações de FBGs e espectroscopia para os setores elétrico e petrolífero. Também atua no desenvolvimento de equipamentos eletrônicos que interagem com os sensores, através do desenvolvimento de software embarcado e aplicações de aquisição e tratamento de dados.

- Rodrigo Peres - É engenheiro físico pela Universidade Federal de São Carlos. Cursa mestrado na Faculdade de Tecnologia na Unicamp e é pesquisador da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, atuando em projetos de P&D para o setor elétrico, no desenvolvimento de sensores ópticos para o monitoramento e supervisão de linhas de transmissão, subestações e em barragens de usinas hidrelétricas.

- Claudio Florida - É Doutor em Física pela Universidade Federal de Pernambuco e pesquisador do CPqD onde atua na área de sistemas de sensoriamento com fibras ópticas baseados em diferentes tecnologias tais como sensores com grade de Bragg, sensores distribuídos, sensores de tensão e corrente, técnicas de espectroscopia óptica, entre outros, com aplicações nos setores elétrico, óleo e gás, metroviário, e de monitoramento de estruturas civis.

- Fabio Renato Bassan - É Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade de Campinas. Atua no CPqD na área de engenharia elétrica, com ênfase em comunicações ópticas e sensores a fibra óptica tais como: power over fiber, DTS, bending fibers, temperatura de linhas de transmissão, descargas parciais de buchas de transformadores, qualidade de contato de chaves seccionadoras.

- Márcio Colazza Argentato - É formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Salesiana de São Paulo. Atualmente trabalha como engenheiro no CPqD, atuando em projetos de sensoriamento óptico com tecnologias FBG, técnicas de espectrometria e Power over fiber para sistemas de energia elétrica.

- Luiz Alckimin de Lacerda - É Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1997. Atualmente é gerente de pesquisa, desenvolvimento e Inovação do Lactec e professor adjunto do departamento de construção civil da Universidade Federal do Paraná. Suas principais áreas de atuação são: mecânica computacional e instrumentação. Suas principais linhas de pesquisa compreendem integridade estrutural, segurança de barragens e instrumentação estrutural com sensores de fibra óptica.