SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GGH 20
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE SENSORIAMENTO ÓPTICO PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADORES

João Batista Rosolem* **Maria do Rosário Fabeni Hurtado** **Claudio Floridia**
José Antonio Donizete Rossi **Flavio Borin** **Antonio Amauri Juriollo**
Fundação CPqD Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações

Jacques Philippe Marcel Sanz
Eletronorte - Centrais Elétricas do Norte do Brasil

RESUMO

Neste trabalho apresentamos os resultados do desenvolvimento de um sensor baseado em tecnologia óptica inovadora para a detecção de descargas parciais em hidrogeradores, que pode também ser utilizado em várias outras aplicações correlatas. O projeto foi desenvolvido pelo CPqD para a Eletronorte e é baseado em um dispositivo eletro-óptico que transforma o sinal eletromagnético emitido pelas descargas parciais em sinal de luz que é transmitido por uma fibra óptica. O sensor foi desenvolvido, testado com sucesso nos laboratórios do CPqD e do Cepel e deverá será testado em campo em uma das máquinas geradoras da Eletronorte.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogeradores, Descargas Parciais, Sensor Óptico, Fibra óptica, Opto-eletrônica.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Eletronorte, desde a década passada, vem, em conjunto com as empresas do grupo Eletrobrás e sob a coordenação do Cepel, desenvolvendo um sistema de monitoramento de hidrogradores, que resultou no projeto Monithidro. O seu objetivo era fornecer as equipes de operação e manutenção uma ferramenta de diagnostico, destinada, a partir do tratamento das grandezas monitoradas, a fornecer uma previsão de defeitos em formação.
O programa inicial contemplava principalmente variáveis mecânicas e térmicas, mas, para analisar melhor o desgaste do isolamento do estator, principal causa de defeito em grandes maquinas, foi necessário incorporar o monitoramento on line das descargas parciais, objeto de um P&D Aneel, hoje concluído em parceria com o Cepel.
Portanto, o monitoramento dos grandes hidrogeradores necessita de multiplicidade dos pontos de medição, levando a questionar a confiabilidade do sistema, e a eventual possibilidade de introduzir defeitos suplementares na maquina.
A Eletronorte abordou a questão da confiabilidade sob dois enfoques, realizados a partir de investimento em projetos P&D. A primeira abordagem consiste em investir na modelagem dos principais componentes da maquina, de maneira a checar as grandezas monitoradas por um lado, e a estabelecer intercorrelações entre as variáveis por outro lado, permitindo futuramente simplificar o numero de grandezas monitoradas. A segunda abordagem consiste em investir na confiabilidade dos sensores. Já que o mercado oferece sensores em fibras ópticas de temperatura, pressão e vibração, estão sendo desenvolvidos sensores de proximidade e de descargas parciais, visando, a médio prazo, monitorar uma máquina por um sistema totalmente óptico, acrescendo maior confiabilidade ao sistema de monitoração.
A ocorrência de descargas parciais nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão é um sintoma de fragilidade na capacidade dielétrica e cuja evolução pode vir a acarretar graves conseqüências para o equipamento e o sistema elétrico. A avaliação de equipamentos de alta tensão quanto à geração de descargas parciais é uma ferramenta preditiva que pode auxiliar na realização da manutenção prévia dos equipamentos. A partir da avaliação pode-se providenciar a intervenção no sistema ou sua substituição antes que estes possam sofrer danos mais graves ou até mesmo afetar o sistema como um todo. Descargas parciais ocorrem devido a

(*) Rodovia Campinas - Mogi-Mirim, km 118,5 CEP 13086-902 - Campinas, SP - Brasil
Tel: (+55 19) 3705-6796 – Fax: (+55 19) 3705.6119 – Email: rosolem@cpqd.com.br.

ação de vários mecanismos de falhas, como sobrecargas térmicas, movimentos mecânicos, má impregnação do isolamento, deterioração da camada semi-condutora, entre outros. Monitorando-se as descargas parciais, que são sintomas evidentes destes mecanismos, pode-se determinar se está ocorrendo deterioração do isolamento e se o mesmo apresenta risco de falha. Testes de descargas parciais também auxiliam a equipe de manutenção a determinar previamente qual o tipo de reparo necessário. De uma maneira geral esse envelhecimento acelerado dos materiais isolantes, com a ocorrência subseqüente de descargas parciais, é um ponto crítico na maioria dos grandes equipamentos elétricos.

Os hidrogeradores não constituem exceção e têm, no isolamento de suas barras estatóricas, um de seus elos mais fracos. Vibração nas barras, vazios no isolamento, contaminação do isolamento e deterioração das cabeças das bobinas são falhas no estator passíveis de serem detectadas monitorando-se descargas parciais.

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 diversas grandezas físicas são geradas no local, tais como, pulsos eletromagnéticos conduzidos e irradiados, luminosidade, ruído acústico, acréscimo de temperatura e reações químicas localizadas.

Baseadas nestes fenômenos diversas técnicas têm sido estudadas e empregadas para a detecção de descargas parciais em hidrogeradores. Entre as técnicas mais utilizadas para medições de descargas parciais destacam-se os capacitores de acoplamento e os transformadores de corrente. Alguns dos problemas típicos destas técnicas são a intrusão do sensor no sistema a ser medido e a baixa largura de banda do sinal do sistema de medição.

Com o advento da tecnologia de sensores de fibras ópticas, novas alternativas de medição se apresentam. As vantagens dos sensores ópticos são: imunidade das fibras ópticas frente às interferências eletromagnéticas, capacidade de transmissão de sinais de elevada freqüência e largura de banda, capacidade de multiplexação de sinais de vários sensores em uma única fibra, compactação e uso de espaços reduzidos, possibilidades de medidas não invasivas, além do baixo custo proporcionado pela escolha de elementos adequados para a monitoração.

Neste trabalho apresentamos os resultados do desenvolvimento de um sensor baseado em tecnologia óptica inovadora para a detecção de descargas parciais em hidrogeradores, que pode também ser utilizado em várias outras aplicações correlatas. O projeto foi desenvolvido pelo CPqD para a Eletronorte como parte de uma estratégia de estabelecimento de uma rede óptica de sensoriamento nos hidrogeradores e é baseado em um dispositivo eletro-óptico que transforma o sinal eletromagnético emitido pelas descargas parciais em sinal de luz que é transmitido por uma fibra óptica.

Na seção de número 2 deste trabalho revisamos o assunto descargas parciais em hidrogeradores detalhando os locais e os fatores de ocorrência bem como os métodos atuais de monitoração. Na seção de número 3 revisamos os tipos de sensores ópticos usados para monitoração de descargas parciais em sistemas elétricos de alta tensão. Na seção de número 4 descrevemos a tecnologia de sensor óptico escolhida no projeto de desenvolvimento com a Eletronorte bem como os resultados de sua caracterização feitas no CPqD. Ainda na seção descrevemos os resultados de testes práticos do sensor realizados no Cepel (RJ).

2.0 - DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADORES

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. descargas parciais são efeitos que se constituem em uma ferramenta fundamental para a avaliação do desempenho elétrico do enrolamento estatórico de hidrogeradores. Descargas parciais podem ser originadas por inúmeros modos e dependendo das fontes podem existir características muito particulares. As fontes das descargas parciais em máquinas rotativas são [1]:

- Em bobinas estatóricas, como resultado de descontinuidade na camada semicondutora, valores de alta resistividade de cobertura, porosidade, separações, defeitos de migração, e erosão ou defeitos de abrasão. As descargas podem também ser causadas por certos tipos de contaminação química.
- Na cobertura *anti stress* elétrico (uniformização de campo elétrico) na saída das bobinas como resultado de defeitos, tais como concentração de campo elétrico na interface entre a camada semicondutora e a cobertura do controle anti stress, pontos de dano mecânico, etc.
- Na cabeça do enrolamento do estator, em função da contaminação química, partículas de metal em flutuação, danos mecânicos, movimento relativo das cabeças de bobina nas ranhuras, etc.
- Pontos externos ao enrolamento do estator tais como cabos instalados inadequadamente, dentro das buchas de alta tensão; sobre a superfície das buchas de alta tensão, etc.

Embora existam muitas fontes potenciais de descargas parciais, deve-se lembrar que não existe hoje nenhuma tecnologia que possa localizar precisamente o ponto de geração da descarga para cada um dos defeitos listados previamente. Isso porque muito embora alguns defeitos produzam características específicas ocorre sobreposição com outras fontes de descarga, dificultando portanto a interpretação e a localização da mesma.

Descargas parciais são acompanhadas por várias manifestações: pulsos elétricos e os pulsos de rádio freqüência resultantes, pulsos acústicos, luz, bem como reações químicas com os gases de refrigeração.

Em função da descarga parcial envolver um fluxo de elétrons e íons através de uma pequena distância em um período finito de tempo, uma pequena corrente flui sempre que a descarga parcial ocorre. A corrente total será governada pelo transporte de um certo número de picocoulomb de carga. A corrente que flui cria um pulso de tensão através da impedância do sistema isolante. Um dos métodos primários de detectar descarga parcial é medir remotamente o pequeno pulso de tensão que acompanha cada descarga parcial, ou o pulso de corrente resultante. O pulso de tensão pode ser detectado por meio de capacitores de alta tensão, que servem de filtro

para a freqüência de 60 Hz. O sinal captado pelo capacitor é levado até um osciloscópio e um analisador de espectro onde é analisado.
Além da tensão e corrente a descarga gera também ondas eletromagnéticas tipo RF que se propagam a partir do local da descarga. Essas perturbações eletromagnéticas estão na faixa de 100 kHz até centenas de MHz.
Como a descarga gera emissões de RF, ruído acústico e luz isso significa que cada descarga absorve uma certa quantidade de energia. Como essa energia adicional deve ser suprida pela fonte de energia isso pode ser considerado como um aumento nas perdas dielétricas da máquina (ou do enrolamento da máquina). Portanto uma maneira indireta de se medir o nível de descargas parciais é o de se medir o fator de potência ou fator de perdas da isolação, embora esse tipo de medição seja menos sensível que os métodos convencionais de medição de descargas parciais.
Com a ocorrência de descargas na superfície dos barramentos e enrolamentos do estator em máquinas com sistemas de resfriamento a ar são geradas reações químicas no ar adjacente a essas descargas e um dos subprodutos dessas reações químicas é o ozônio. A concentração de ozônio é dependente da temperatura e umidade, além de sua dependência direta do grau de intensidade da descarga. Para sua detecção podem ser utilizados métodos químicos ou sensores elétricos.
A descarga parcial provoca uma onda acústica causada pelo rápido aumento da temperatura do gás ao redor da descarga. Esse ruído acústico ocorre na faixa de freqüência que vai desde alguns hertz até 150 kHz, com concentração maior na faixa de 40 kHz. Para sua detecção podem ser utilizados microfones direcionais para avaliar sua amplitude assim como sua localização. Podem ser ainda utilizados hastes de fibra de vidro como guias de onda acústicos, que tem a vantagem de serem isolantes.
Uma outra maneira de se detectar a presença de descargas parciais, principalmente em testes em barras individuais, é se realizar um ensaio em total escuridão e se visualizar o ponto de descarga. Isso pode ser feito utilizando-se também equipamentos para detecção de pontos luminosos.
O IEEE Guide 1434 [1] descreve um grande número de sensores para captação de sinais elétricos com a respectiva faixa de freqüência, os prós e contra de cada sistema e a bibliografia referente. Capacitores são utilizados como elemento de acoplamento servindo para filtrar as baixas freqüências (funciona com alta impedância para 60 Hz) e com baixa impedância para as altas freqüências, como aquelas produzidas pelas descargas parciais. O capacitor necessita ser livre de descargas parciais intrínsecas para poder atuar como sistema sensor. São utilizados capacitores com valores de capacitância da ordem de 80 pF, e para medidas *on line* esses capacitores podem ter como dielétrico epóxi – mica ou então serem feitos com cabos de alta tensão tipo XLPE (isolação de polietileno).
Pode-se utilizar também como meio de adquirir os sinais de descargas parciais os transformadores de potencial que possuem resposta em altas freqüências. Os transformadores de potencial são normalmente instalados na baixa tensão, terra, ou neutro dos equipamentos monitorados.
A ponta de prova eletromagnética ou TVA é um sensor que responde às altas freqüências radiadas pelas descargas parciais. Consiste de uma haste isolante de 1 m com uma bobina em núcleo de ferrite numa das pontas. Essa bobina é ligada via cabo coaxial ao instrumento de medição. Sua faixa de freqüência é normalmente estabelecida de 200 kHz a 10 MHz, com seu ponto ótimo em 5 MHz.
Antenas para campos próximos podem também ser utilizados nas medidas de descargas parciais. O SSC (*Stator Slot Coupler*) é uma antena tipo stripline, que age como um acoplador eletromagnético, sendo sensível a energia eletromagnética da descarga parcial. É normalmente instalada na cabeça da bobina.
A ponta de prova capacitiva consiste de uma placa, normalmente de latão, que capta as descargas eletrostaticamente. O outro eletrodo fica na alta tensão do equipamento
A Eletronorte possui um sistema de medição de descargas parcias em hidrogeradores desenvolvido pelo Cepel [2]. O sistema proposto utiliza como hardware de medição, cartões digitalizadores de alta velocidade em um computador industrial PXI e foi concebido para operar on-line, registrando remotamente mapas estatísticos de descargas parciais, consolidando um banco de dados de medições ao longo do tempo.
Os sinais de descargas parciais são medidos a partir de capacitores de acoplamento conectados em pontos pré-definidos ao longo dos circuitos das fases do enrolamento estatórico. Em função da dificuldade em definir um número mínimo necessário de acopladores e de estabelecer uma posição relativa dentro do estator, a medição de descarga parcial deve buscar um comportamento estatístico do enrolamento como um todo, e identificar evolução dos níveis de descarga ao longo do tempo. Conforme a técnica de análise utilizada é possível também estimar o tipo de defeito ocorrendo no estator.

3.0 - TIPOS DE SENSORES ÓPTICOS PARA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

O sensoriamento à fibra óptica é uma das áreas que tem alcançado recentemente grandes progressos em função da disponibilidade tecnológica de novos dispositivos e componentes ópticos à fibra. Os sensores à fibra óptica possuem grandes vantagens em relação aos sensores clássicos pelo fato da fibra óptica ser um dielétrico natural, o que a torna ideal para instalações em ambientes com alta tensão.
Os sensores a fibra possuem a capacidade de enviar ou receber sinais ópticos em grandes distâncias permitindo a construção de redes de sensores distribuídos que podem ser usadas para monitorar vários pontos simultaneamente sem a necessidade da conversão óptica/elétrica em cada ponto de sensoriamento, possibilitando desta forma a redução de custos e aumentando a flexibilidade e confiabilidade da solução. A supervisão da rede de distribuição e sub-transmissão de energia elétrica possibilitará um controle e detecção de degradações e falhas localizadas, permitindo o controle e a atuação mais rápida no reparo da mesma, aumentando com isso a qualidade do serviço prestado ao cliente.

Conforme já comentado a ocorrência de descargas parciais gera uma série de fenômenos passíveis de detecção. Além de pulsos de corrente no circuito, podem ser gerados: luz, sinais acústicos, alteração local de temperatura, ondas eletromagnéticas, bem como transformações químicas dos compostos vizinhos ao local das descargas parciais. Ttodas estas alternativas de detecção são testadas na prática e relatadas na referência [3].

A detecção de luz gerada tem sido estudada como método de detecção das descargas parciais [4-6]. Estudos do processo de degradação de polímeros usados como isolantes de cabos de alta-tensão, por exemplo, sugerem que a descarga parcial pode ser prevista antes da sua ocorrência. De fato, tal processo ocorre em duas fases distintas [4]. Inicialmente ocorre a eletroluminescência (EL) responsável pelo início do defeito e posteriormente a descarga parcial, na fase de crescimento do defeito. A emissão óptica na EL é de intensidade menor do que durante as descargas parciais, mas pode vir a servir como um alarme para as descargas parciais.

Sabe-se que o comprimento de onda da luz gerada depende do tipo de descarga parcial. Para descargas tipo corona o comprimento de onda é menor que 400 nm com luz na região do ultravioleta sendo dominante. Para uma descarga em *flash* a luz emitida está entre 400 e 700 nm, a maior parte pertencendo à região visível do espectro. Já o espectro da luz para uma descarga superficial em um dielétrico sólido é mais complicado sendo influenciada por fatores como composição de gases, material sólido usado, condições da superfície, tipo de eletrodo, etc.

Estudos experimentais para medição de descargas parciais por efeitos luminosos são reportados em [5] através da comparação com o método usual de detecção de pulsos de corrente elétrica. Para aumentar a sensibilidade de detecção e reduzir a influência externa um certo número de fibras ópticas foi usado em conjunto para aumentar a seção transversal de captação, o sinal óptico é convertido em elétrico usando um tubo fotomultiplicador com sensibilidade elevada e baixa corrente de escuro. Além disto, o sinal elétrico obtido é muito fraco necessitando de amplificador elétrico de mais de 60 dB para elevar o sinal. Em outras palavras: o aparato para captar o sinal é sofisticado e a montagem não trivial.

Uma alternativa para melhorar a detecção óptica das descargas parciais é descrita em [6]. Este artigo estuda a detecção das descargas parciais em subestações isoladas por gás. A vantagem comparativa está na maior área de detecção devido ao uso de fibras fluorescentes. Em fibras comuns, apenas a luz dentro do cone de aceitação será detectada pela extremidade da fibra. Ao contrário, nas fibras fluorescentes a luz pode excitar o núcleo luminescente mesmo entrando pelas laterais da mesma. A eficiência quântica de emissão de fibras fluorescentes comerciais varia de 30 a 95%, apesar de apenas uma pequena porcentagem ser guiada pela fibra (cerca de 4%). Além disso, apenas a parte da luz emitida pela descarga parcial cujo espectro coincide com o espectro de absorção do elemento fluorescente é detectado.

Em resumo, a detecção de descargas parciais através da detecção da luz da descarga pode ser utilizada nos casos em que há facilidade de observação da mesma. De fato, na comparação com técnicas elétricas usuais (norma IEC-270) esta se mostrou superior na detecção de descargas superficiais e internas. O possível emprego de fibras fluorescentes aumenta a sensibilidade de detecção. Por fim, há indícios da ocorrência de uma eletroluminescência débil que antecede a descarga parcial fenômeno que poderia ser utilizado para prever eventuais descargas parciais.

Um segundo método muito utilizado de medir a presença de descargas parciais é pela detecção acústica que é bastante utilizado no monitoramento de transformadores. Este sinal é criado quando o calor formado dentro da falha é vaporizado. Esta vaporização causa uma explosão de energia mecânica, que se propaga pelo tanque do transformador na forma de campo de pressão. Sistemas que empregam este método são subdivididos em duas categorias: sistemas internos e externos. Sistemas de detecção externos que são mais empregados em sistemas de potência usam sensores montados fora do tanque do transformador para detectar o sinal acústico da descargas parciais. Sistemas internos usam sensores imbutidos dentro do tanque do transformador para medir as ondas de pressão diretamente no interior do óleo mineral.

A maior vantagem de usar detecção acústica sobre detecção elétrica é a de se obter informações de posição, severidade e o tipo da ocorrência da descarga parcial. Outra vantagem é a de ser imune a interferências eletromagnéticas possibilitando medições on-line devido ao melhor qualidade sinal-ruído. Vibrações mecânicas nos hidrogeradores são as principais fontes de ruídos acústicos, mas as freqüências destas vibrações são muito menores do que as de descarga parcial.

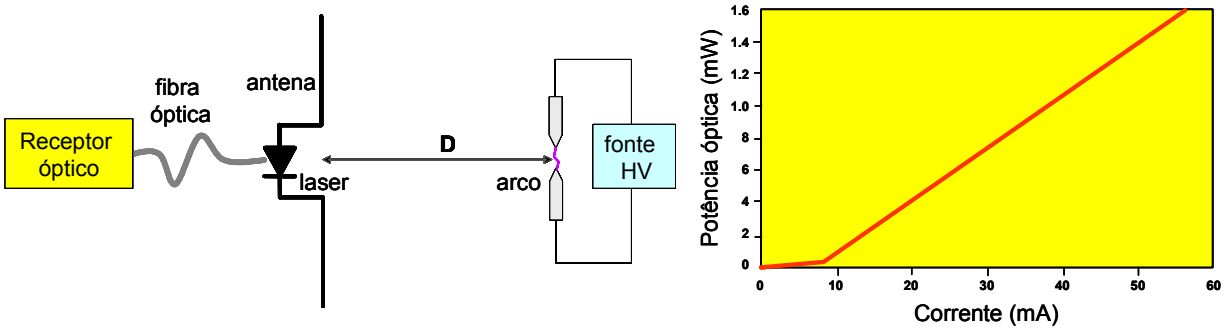
A detecção acústica também tem suas limitações. O primeiro problema que aparece é a complexidade da natureza da propagação de ondas acústicas. Como os hidrogeradores não são dispositivos homogêneos, as ondas não viajam em formas de onda esféricas perfeitas. Além disso, como os sinais recebidos são muito baixos, os sensores devem ter sensibilidade elevada para detectar uma descarga parcial. Em [7,8] encontramos alguns resultados sobre o desenvolvimento de sensores ópticos acústicos de descargas parciais para transformadores.

As descargas parciais emitem ondas eletromagnéticas de alta freqüência (na faixa de megahertz). Esta emissão tem sido explorada para detecção de descargas parciais através do uso de antenas [9 -12]. A utilização de um sensor óptico que capte radiação de radio-frequência é um método bastante promissor para uso em hidrogeradores. Sensores ópticos de campo elétrico são disponíveis na atualidade, porém não há notícia na literatura da aplicação destes sensores para medidas de descargas parciais em hidrogeradores. Em [13] encontramos detalhes de uma aplicação sobre o uso de um modulador eletro-óptico de $LiNbO_3$ (Niobato de Lítio) para captação de descargas parciais em um cabo de transmissão de energia elétrica. Moduladores eletro-ópticos são componentes que executam a função de modular o sinal contínuo de um laser do tipo DFB (*distributed-feedback laser*). São utilizados em telecomunicações em sistemas de altas taxas (> 2,5 Gb/s) e grandes distâncias (> 60 km) onde a modulação direta do laser implica em problemas de desempenho sistêmico. Moduladores eletro-ópticos são fabricados depositando-se guias ópticos configurados em uma estrutura chamada de Mach-Zhender em um cristal de Niobato de Lítio ($LiNbO_3$). Este cristal tem propriedades eletro-ópticas bastante acentuadas. Ou

seja, sob a aplicação de uma tensão elétrica, as propriedades ópticas (índice de refração) deste material são mudadas. Os principais parâmetros do modulador são: a largura de banda elétrica, a perda de inserção e as tensões de polarização e modulação. No experimento descrito em [13], que utiliza um modulador de $LiNbO_3$, a potência óptica de um laser é transmitida ao longo de um trecho de fibra óptica, passa pelo modulador no ponto de monitoração e volta ao ponto de recepção óptica através de uma outra fibra ópticao remotamente.
Um acoplador capacitivo foi usado para detectar a atividade das descargas parciais e agir como a fonte da tensão de entrada do modulator. O modulador eletro-óptico é passivo e o não requer uma fonte de alimentação no local onde o sensor está instalado. No caso deste experimento a entrada do modulador foi excitada não exatamente por uma onda eletromagnética, mas sim por uma indução capacitiva. O uso de moduladores eletro-ópticos para medidas de descargas parciais tem a vantagem de serem seguros, compactos e fáceis de operar, por outro lado o custo destes dispositivos ainda não é atrativo para sensoriamento. Além disso algumas dificuldades técnicas devem ser superadas tais como a necessidade do uso de uma fibra especial em sua porta de entrada, que é do conhecida como fibra de polarização mantida, ou então usar procedimentos que controlem a polarização do sinal óptico de entrada do dispositivo.
O sensor desenvolvido neste projeto para detecção de descargas parciais no estator do hidrogerador utiliza a técnica da captação das ondas eletromagnéticas emitidas pelas descargas, modulando a seguir diretamente um laser semicondutor. Esta técnica é inédita, e apresenta as vantagens de não intrusão, baixo custo, grande flexibilidade e boa sensibilidade. A seguir descrevemos a técnica escolhida com maiores detalhes.

4.0 - DESENVOLVIMENTO DO SENSOR ÓPTICO DE DESCARGAS PARCIAIS

O sensor óptico consiste basicamente no uso de uma antena dipolo (ou outro tipo) acoplada diretamente nas portas (anodo e catodo) de um laser semicondutor de baixa corrente de limiar. A Figura 1(a) mostra um diagrama do arranjo do sistema de sensoriamento baseado nesta técnica. A Figura 1(b) mostra uma curva típica de potência óptica em função da corrente injetada em um laser semicondutor de baixa potência utilizado em telecomunicações. Observando a curva de potência da Figura 1(b) notamos que a emissão como laser só é conseguida a partir de 8 mA e abaixo deste valor, que é conhecido como corrente de limiar, o laser se comporta como LED (*light emitting diode*), produzindo baixa potência de saída. Isto significa na prática que variações negativas do sinal produzido pela antena não poderão ser transmitidos pelo laser na configuração adotada e mostrada na Figura 2(a). Denominamos esta configuração de sensor passivo. Como será visto mais tarde esta configuração que é mais simples pode ser utilizada quando a forma temporal da onda de descarga parcial não precisar ser totalmente visualizada, mas apenas a variação dos maiores picos de intensidade.

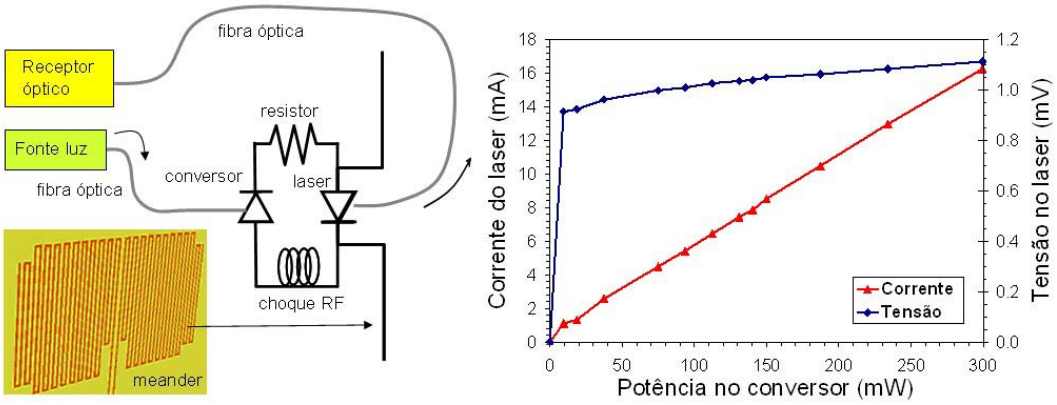


(a) (b)

FIGURA 1 – (a) Diagrama esquemático do sistema de sensoriamento de descargas parciais baseado no laser semicondutor na forma passiva e (b) curva de potência óptica em função da corrente em um laser semicondutor.

Para que o sensor laser possa transmitir a forma de onda completa é necessário polarizá-lo 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. No entanto os requisitos deste projeto fornecidos pela Eletronorte, foram para que nenhuma alimentação elétrica fosse instalada junto ao sensor para não causar quaisquer eventuais problemas ao hidrogerador. Para solucionar este problema de tal forma a polarizar o laser com corrente contínua sem a necessidade de uso de uma fonte de alimentação local adotamos a técnica de alimentação óptica [14]. Nesta técnica uma fibra óptica diferente da fibra do laser conduz uma potência óptica em um comprimento de onda e em um nível adequado para uma célula fotovoltaica instalada ao lado do laser. A célula fotovoltaica tem a função de transformar a potência óptica detectada em tensão e corrente para alimentação do laser. A Figura 2(a) ilustra o diagrama do sensor de descargas parciais utilizando um laser semicondutor conjugado a uma antena de rádio freqüência e com a técnica de alimentação óptica, a qual denominamos de sensor ativo. A célula fotovoltaica utilizada neste projeto é um dispositivo já adequado para alimentação de sensores, porém sua capacidade de fornecimento de potência é limitada. São disponíveis comercialmente células fotovoltaicas para uso com fibras multimodo nas janelas de 810 nm e fibras monomodo para a faixa de 1000 a 1600 nm [15]. Tipicamente para uma potência óptica de 100 mW em uma carga de 100 Ohm, o valor de tensão é da ordem de 1,0 V para uma corrente de 6 mA. A Figura 2(b) mostra uma caracterização do sensor laser com a célula fotovoltaica incorporada. Foi utilizada neste caso uma fonte de alimentação óptica de alta potência no comprimento de onda de 1480 nm.
Outra importante consideração sobre o sensor é relativa ao tipo de antena a ser empregada. A antena escolhida para o sensor deve atender aos seguintes requisitos: ter freqüência de ressonância dentro da faixa de interesse

das medições de descargas parciais, possuir a maior largura de banda possível, ter resistência de radiação adequada para casamento de impedância com o laser semicondutor, boa direcionalidade e ter dimensões adequadas para instalação nas cabeças das barras do estator do hidrogerador.
Diversos tipos de antenas são disponíveis para este desenvolvimento. Entre estes tipos podemos citar: a antena monopolo, a dipolo e a "*loop*". A antena escolhida para o desenvolvimento foi à antena do tipo dipolo por sua simplicidade, maior ganho, maior largura de banda além da resistência de radiação mais adequada para casamento de impedância com o laser semicondutor. A vantagem da antena *loop* reside na possibilidade de obter um comprimento menor (metade) para o mesmo comprimento de onda de ressonância do que a antena dipolo simples, porém com diversos outros parâmetros desvantajosos tais como baixa resistência de radiação da antena, baixo ganho da antena em relação ao dipolo e baixa banda passante. As antenas dipolo de meia onda são as mais utilizadas em sistemas de radiocomunicação e assim são chamadas porque o seu comprimento é igual à metade do comprimento de onda para a faixa de freqüência em que irá operar. Em outras palavras, em cada parte da antena, o sistema irradiante (comprimento), terá um quarto (1/4) do comprimento de onda para a faixa de operação.



(a) (b)

FIGURA 2 – Diagrama esquemático do sistema de sensoriamento de descargas parciais baseado no laser semicondutor na forma ativa e (b) caracterização do sensor laser com a célula fotovoltaica incorporada.

Escolhemos uma variação na construção da antena dipolo linear que é utilizada em espaços restritos como é o caso dos hidrogeradores. Esta antena dipolo é conhecida como antena dipolo "*meander*" (serpentear). Na antena meander (ver Figura 2(a)) os braços lineares da antena dipolo são confeccionadas conforme uma estratégia de ida e volta no eixo perpendicular ao eixo normal da antena dipolo, até completar seu tamanho estimado. A antena meander é confeccionada em circuito impresso, o que lhe garante bastante robustez. Um estudo inicial e mais aprofundado da antena dipolo meander pode ser encontrado na referência [16].
As seguintes características técnicas foram adotadas para o projeto da antena meander:
Impedância de entrada (laser) = 120 ohm, dielétrico = FR4, espessura do dielétrico = 1,6 mm, largura da trilha da antena = 2 mm, separação entre trilhas = 2 mm, largura máxima meander = 100 mm, comprimento máximo meander = 180 mm e comprimento da antena dipolo meander = 4,5 m.
A simulação no software comercial *EMPicasso* forneceu entre outros parâmetros os seguintes dados: freqüência de ressonância (através do coeficiente de espalhamento S_{11}) = 6,2 MHz e relação de onda estacionária VSWR ("Voltage Standing Wave Ratio") = 1.3.
Para testar a antena meander com o laser semicondutor e o circuito de alimentação óptica conforme Figura 2(a) em diversos comprimentos, montamos um protótipo através da adaptação de uma placa de circuito impresso para uso universal, com trilhas de dimensões próximas daquelas simuladas. A Figura 3(a) mostra os resultados das medições das descargas medidas em um receptor óptico acoplado a um osciloscópio. Foi utilizada neste caso uma fonte de alimentação óptica de alta potência no comprimento de onda de 1480 nm operando com 120 mW. Como pode ser observado e esperado as intensidades dos valores de campo medidos aumentam conforme se aumenta o comprimento da antena dipolo meander. Utilizando agora um comprimento de antena de dipolo meander máxima, realizamos um estudo de sensibilidade de detecção em relação à distância entre o gerador de descargas e o sensor com e sem o uso de alimentação óptica Figura 3(b). Conforme pode ser observado o sensor ativo (com alimentação óptica) apresenta uma sensibilidade maior do que o sensor passivo.
Finalmente como pode ser visto na Figura 4(a) o sensor definitivo foi confeccionado conforme os dados de simulação. Na Figura 4(b) mostramos uma caracterização do mesmo através da curva de potência óptica contínua do laser de sinal pela potência óptica de alimentação na célula fotovoltaica. Algumas curvas temporais das descargas são mostradas também para três níveis de potência óptica de alimentação.
Para testar o sensor desenvolvido em condições mais próximas as da sua operação real, ou seja, para monitorar descargas parciais provenientes do estator, foram realizados testes no Cepel utilizando-se de uma barra de um estator proveniente de um hidrogerador da Eletronorte. A barra em questão foi escolhida por já apresentar alto índice de ocorrência de descargas parciais.

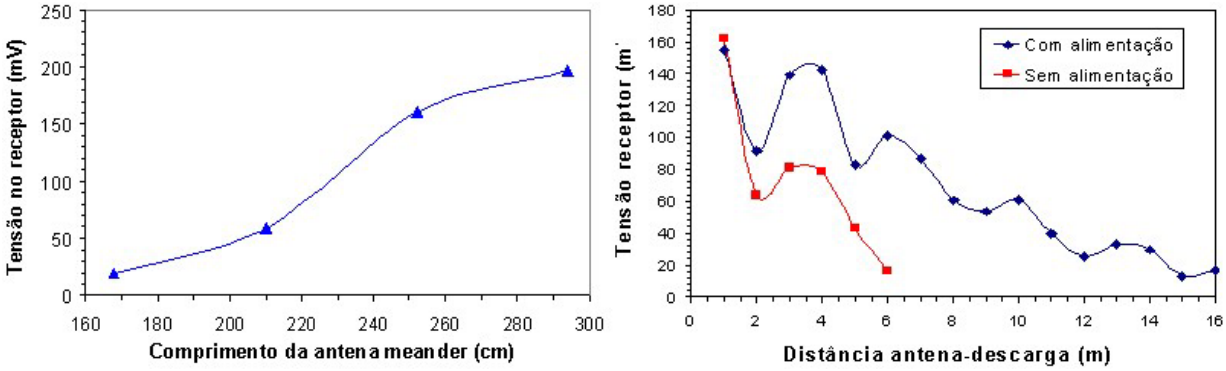


FIGURA 3 – (a) Sensibilidade do sensor com o comprimento do dipolo meander e (b) sensibilidade do sensor em função da distância da descarga.

Nos testes realizados no Cepel os dados das descargas foram obtidos tanto utilizando o sensor desenvolvido bem como através do sistema de monitoramento padrão baseado em acoplamento capacitivo disponível no Cepel. A Figura 5(a) mostra uma foto do sensor posicionado 30 cm da extremidade da barra, sendo que esta posição é a posição prevista para seu funcionamento real, ou seja acima das barras do estator. A Figura 5(b) mostra a resposta em freqüência e no tempo de uma amostra de descarga parcial colhida pelo sensor para uma tensão na barra de 8 kV.

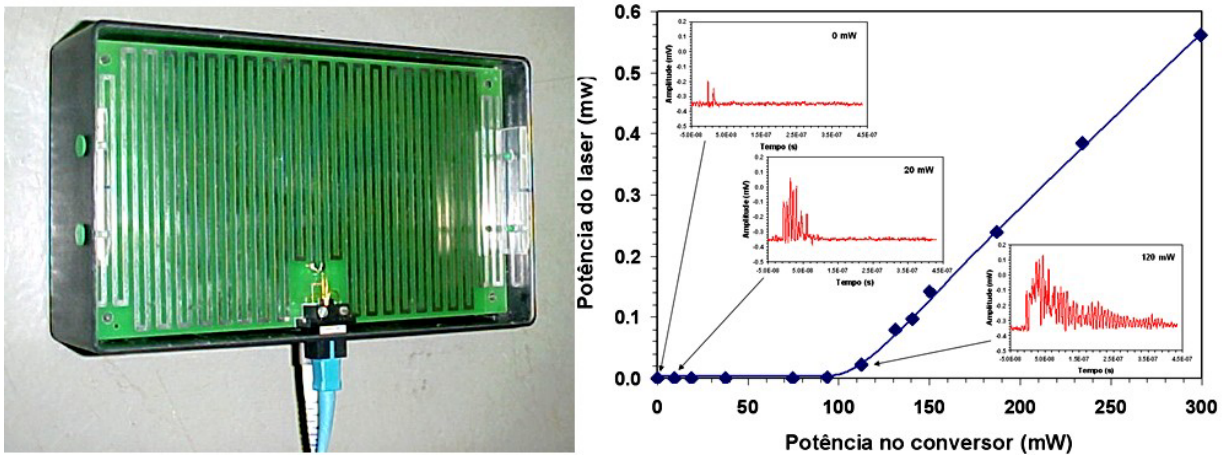


FIGURA 4 - (a) Sensor definitivo confeccionado conforme os dados de simulação e (b) curva de potência óptica de contínua do laser de sinal pela potência óptica de alimentação na célula fotovoltaica

Pode-se observar na Figura 5(b) que as emissões se concentram na faixa do espectro que vai de 10 até 230 MHz. Neste espectro pode se observar que os picos mais proeminentes se concentram em torno das seguintes freqüências: 15, 63, 76, 83, 113, 148 e 225 MHz. Sendo que o maior pico está em 113 MHz. Os resultados destas medições apontam que a faixa de freqüências em torno de 100 MHz pode ser mais atrativa para a monitoração das descargas. Este fato já havia sido detectado em medições nos laboratórios do CPqD.

Conforme comentamos anteriormente as descargas foram medidas também utilizando-se do sistema padrão baseado em acoplamento capacitivo. O valor obtido no sistema padrão para a mesma medição obtida pelo sensor óptico (valor máximo de 47 mV pp) foi de da ordem de 10 nC.

Observou-se nestes experimentos que o sensor conseguiu monitorar de forma linear as descargas para níveis de tensão de alimentação da barra a partir de 4 KV, de forma semelhante ao sistema padrão utilizado pelo Cepel. Os níveis medidos cresceram proporcionalmente a tensão aplicada.

O próximo passo neste desenvolvimento é testar o sensor no estator de um hidrogerador. Para tanto, outros fatores tais como a temperatura de operação e o acondicionamento do sensor acima das barras do estator devem ser analisados antes de sua instalação. A elevada temperatura na proximidade das barras das bobinas do estator (aproximadamente 70 a 80 graus Celsius no ar e 90 graus Celsius no metal da barra) pode comprometer o desempenho do sensor. Provavelmente nesta etapa de testes o sensor deverá ser afixado na tampa do defletor do sistema de ventilação do gerador, onde a temperatura esta entre 60 a 65 graus Celsius, minimizando portanto sua condição de operação. Um sistema automático de controle para manter a potência do laser sensor estável será utilizado para compensar as variações da temperatura de operação.

Apesar de descrevermos neste artigo o sensor descargas parciais utilizando a antena do tipo meander, outros tipos de antena estão sendo pesquisadas e desenvolvidas tais como por exemplo uma linha de transmissão diretamente acoplada e colada na barra do estator, sendo conectada ao laser por um cabo coaxial. É importante também mencionar que esta tecnologia pode ser utilizada em outras situações para medições de campo elétrico

gerado por descargas elétricas ou não. Outros exemplos de aplicação em sistemas elétricos são nas medições de descargas de transformadores, subestações blindadas isoladas a gás SF6, cabos de transmissão etc...

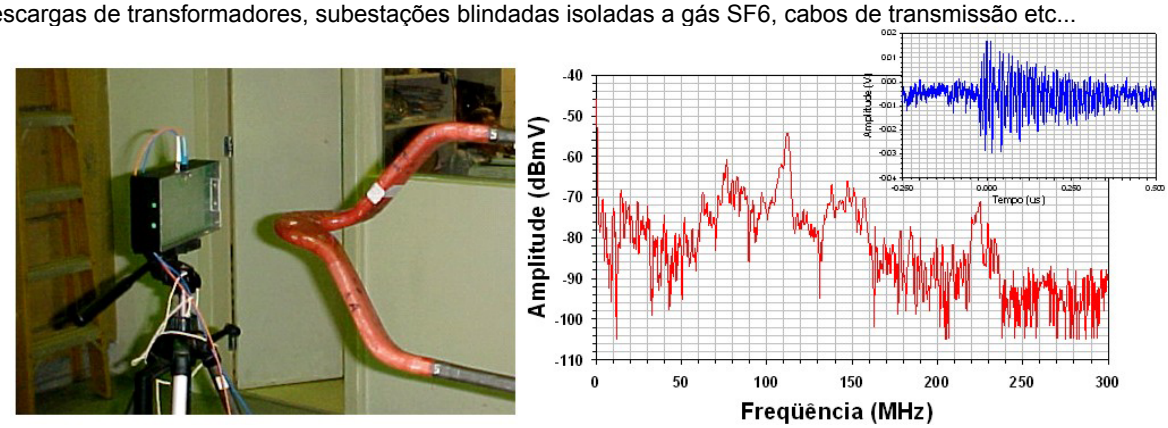


FIGURA 5 – (a) Sensor posicionado na extremidade da barra e (b) resposta em freqüência e temporal do sensor na extremidade da barra para uma tensão de 8 kV.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentamos os resultados do desenvolvimento de um sensor baseado em tecnologia óptica inovadora para a detecção de descargas parciais em hidrogeradores, que pode também ser utilizado em várias outras aplicações correlatas. O projeto foi desenvolvido pelo CPqD para a Eletronorte e é baseado em um dispositivo eletro-óptico que transforma o sinal eletromagnético emitido pelas descargas parciais em sinal de luz que é transmitido por uma fibra óptica. O sensor foi desenvolvido, testado com sucesso nos laboratórios do CPqD e do Cepel e deverá será testado em campo em uma das máquinas geradoras da Eletronorte.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEEE 1434, “Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery”, 2000.
[2] A. T. CARVALHO, H. P. AMORIM, A. F. S. LEVY, R. O. ROCHA, J. P. SANS, W., G. NASCIMENTO, J. A. REBELO, M. A. P. FERREIRA, Sistema para medição, análise e diagnóstico de descargas parciais – uma proposta de arquitetura econômica versátil e integrada, XVIII SNPTEE 16 a 21 de outubro de 2005.
[3] B.J. BEGGS, I.J. KEMP, A. WILSON, “Characterization of discharge phenomena in voids”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation (1990), p.145-148, Toronto, Março e Junho, 1990.
[4] F. ZONG-HUAI, T. TAKAHASHI, J. SUZUKI, H. MIYATA, S. IEMURA, T. ITOH, T. NAKIRI E N. SHIMIZU, “Relation between electroluminescence and degradation in XLPE”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 91-96, v. 8, no. 1, 2001.
[5] X. YANG, Y MING, C XIAOLONG, Q CHANGRONG E G. CHEN, “Comparison between Optical and Electrical Methods for Partial Discharge Measurement”, Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 300-303, China, 2000.
[6] R. MANGARET, J. FARENC, B. AI, P. DESTRUEL, D. PUERTOLAS E J. CASANOVAS, “Optical detection of partial discharges using fluorescent fiber”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 783-789, v. 26, no. 4, 1991.
[7] Z. ZHIQIANG, M. MACALPINE, M. S. DEMOKAN, “The Directionality of an Optical Fiber High-Frequency Acoustic Sensor for Partial Discharge Detection and Location”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 6, p. 795-806, June 2000.
[8] B. YU, D. W. KIM, J. DENG, H. XIAO, A. WANG, “Fiber Fabry-Perot Sensors for Detection of Partial Discharges in Power Transformers”, Applied Optics, Vol. 42, No. 16, p. 3241-3250, Junho, 2003.
[9] T. Ozaki, K. Abe, T. Umemura, “Partial Discharge Detection Using Ferrite Antenna”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation (1992), Baltimore, Junho, 1992.
[10] 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.
[11] 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.
[12] P. J. MOORE, I. PORTUGUKS, 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.
[13] Y. TIAN ET AL, ”Partial Discharge On-line Monitoring for HV Cable Systems Using Electrooptic Modulators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 5; Outubro, pp.861-869, 2004.
[14] R. HEINZELMANN, A. STOHR, M. GROZ, D. KALINOWSKI, T. ALDER, M. SCHMIDT, D. IDGER, “ Optically powered remote optical field sensor system using an electroabsorption-modulator”, Microwave Symposium Digest, 1998 IEEE MTT-S International, Baltimore, p. 1225-1228, Junho, 1998.
[15] http://www.jdsu.com acessado em 28/12/2006.
[16] J. RASHED, C. TAI, “A New Class of Resonant Antennas”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 39, No. 9, Setembro, 1991.