



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

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PASSIVO DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA E DA DEFORMAÇÃO DO ROTOR DE HIDROGERADORES ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE FIBRAS ÓPTICAS**

**Claudio Florida\*   João Batista Rosolem   Flavio Borin   José Antonio Donizete Rossi  
Maria do Rosário Fabeni Hurtado   Antonio Amauri Juriollo   Edson Wilson Bezerra   Julio César Said  
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 sistema inovador de medição de temperatura e deformação do rotor de hidrogeradores utilizando tecnologia de fibra óptica. O projeto foi desenvolvido pelo CPqD para a Eletronorte e é baseado no uso de um sensor conhecido como fibra com grade de Bragg. O sistema foi desenvolvido, testado com sucesso nos laboratórios do CPqD e será testado em campo em uma das máquinas geradoras da PCH Luiz Dias em MG.

**PALAVRAS-CHAVE**

Hidrogeradores, Rotor, Sensor Óptico, FBG, Fibra Óptica

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Avaliações preventivas de equipamentos de alto desempenho constituem uma ferramenta de manutenção preditiva que pode auxiliar na realização da manutenção dos equipamentos providenciando-se a intervenção no sistema, ou sua substituição antes que estes possam sofrer danos mais graves ou até mesmo afetar o sistema como um todo. Instabilidades no hidrogerador podem gerar campos magnéticos localmente intensos, que induzirão correntes espúrias, levando a sobrecargas, deformações nas formas de onda e aumentos de temperatura. A partir desse processo diversas grandezas físicas são geradas no local, tais como pulsos eletromagnéticos conduzidos e irradiados, elevação de temperatura e surgimento de vibrações não harmônicas. Vibração nas barras, vazios no isolamento, contaminação do isolamento, descargas elétricas nas cabeças das bobinas, descarga elétrica nas ranhuras e deterioração das cabeças das bobinas são falhas que podem ocorrer no rotor ou no estator, causando efeitos indesejados no funcionamento do hidrogerador.

A estabilidade e temperatura de operação dos rotores são parâmetros dinâmicos que devem estar sempre dentro de margens pré-estabelecidas. A monitoração da evolução e o controle destes parâmetros de forma a impedir a operação fora destas margens podem evitar graves conseqüências para o equipamento e o sistema elétrico.

Em função de curtos-circuitos entre espiras do rotor, ocorre um aumento da corrente de magnetização levando ao aparecimento de pontos quentes no rotor e a diminuição do rendimento do gerador. Pode ocorrer também deformação mecânica no rotor em função da não homogeneidade do material e variação da temperatura ambiente. Essa deformação pode levar a distorção do campo magnético gerado, levando a perdas na máquina.

Por estes motivos é importante a medição de temperatura e da deformação sobre o rotor e a transmissão dessa informação para fora do gerador.

O objetivo deste trabalho é o de mostrar o desenvolvimento feito no CPqD para a Eletronorte de um sistema inovador de medição de temperatura e deformação do rotor de hidrogeradores utilizando tecnologia de fibra óptica. O sistema será utilizado para validar o sistema hoje empregado, que é baseado em algoritmos computacionais associados a transdutores de imagem térmica, e em uma segunda etapa substituir o sistema atualmente utilizado. Estes algoritmos têm apresentado até a presente data um funcionamento incorreto. A grande vantagem do uso de sensoriamento baseado em fibras ópticas reside no fato de que esses sistemas são passivos,

imunes a interferências eletromagnéticas, possuem 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.

Este trabalho descreve inicialmente uma revisão bibliográfica das tecnologias utilizadas até o presente momento para monitoração *in situ* do rotor. Em seguida descrevemos a tecnologia proposta, a qual apresentou um grande desafio de desenvolvimento para utilização em máquinas rotativas. Em seguida apresentamos os resultados dos testes do protótipo em laboratório simulando condições de campo para máquinas com diferentes velocidades de rotação.

## 2.0 - TÉCNICAS ANTERIORES DE SENSORIAMENTO PARA SISTEMAS ROTATIVOS

A primeira técnica que descrevemos foi desenvolvida pela EPRI [1] para monitoração do estator de hidrogeradores. Apesar da técnica ter sido desenvolvida para os estatores que são as partes fixas do hidrogerador, os sensores foram instalados na parte rotativa (rotor) para que através do movimento girante do rotor os sensores possam captar os sinais a serem monitorados do estator. A vantagem desta técnica é que os sensores podem captar sinais de todas as partes do estator, fato este que os sensores fixos não possibilitam. Desta forma alguns tipos de falhas poderiam ser localizadas com precisão.

O sistema foi desenvolvido para monitorar temperatura, descargas parciais e a deformações da estrutura do estator. Os desafios técnicos para este sistema foram o stress mecânico severo a que os sensores eram submetidos dentro do rotor, a comunicação de dados e de comandos entre o sensor e o operador remoto e a alimentação elétrica do sensor.

A primeira unidade deste sistema foi instalada em 1987 em um gerador 167 MVA na cidade de Seattle. A tecnologia desenvolvida usou diodos emissores de luz no rotor que transmitem os dados quando estão em alinhamento com um conjunto de fotodiodos no estator. Os dados recebidos pelos fotodiodos são transmitidos para um computador na sala de controle através de fibras ópticas. A transmissão por fibras ópticas blindo o sinal transmitido dos campos eletromagnéticos fortes presentes no ambiente do gerador. Um problema crucial foi a alimentação do conjunto de sensoramento composto de 54 sensores individuais. No primeiro protótipo, geradores de magneto foram usados. Tais geradores consistem em uma ou mais bobina de fio em que pulsos da corrente elétrica são induzidos quando passam por eletroímãs montados sobre o estator. Cada pulso de corrente das bobinas recarrega então um banco de capacitores, que fornecesse a energia ao sistema de sensoramento. Uma desvantagem de usar uma fonte de alimentação de magneto por períodos longos, entretanto, é que seus componentes estão sujeitados a forças mecânicas consideráveis por causa dos pulsos de potência. Para protótipos subseqüentes, a alimentação do sistema de sensoramento foi substituída pela alimentação direta pelas bobinas do rotor. Entretanto, a tensão nos enrolamentos pode variar de 50 a 500 Volts, e os circuitos do sistema de sensoramento devem ser alimentados por uma tensão constante de 15 Volts. Para resolver este problema, foi projetado um circuito regulado de tensão de alto desempenho que fornece uma tensão constante à eletrônica do sistema de sensoramento.

A referência [2] apresenta um sistema de sensoramento multicanal desenvolvido para medições e aquisição de sinais de tensão mecânica através de células de carga (*strain gages*) colocados no rotor. A parte principal do sistema de medições é o módulo eletrônico situado no rotor e que é baseado numa solução usando conversores A/D de 12 bits para gerar um único sinal de saída multiplexado sem uso de microcontrolador que é o gargalo quando sinais de frequências mais elevadas são transmitidos. Os sinais analógicos dos sensores são processados no módulo eletrônico o qual gera um único sinal digital que contem a informação de todas as medições. Este sinal digital é então transmitido através de LEDs para os receptores ópticos estacionários onde são então reconvertidos novamente para um sinal elétrico. O sinal elétrico é então convertido outra vez em um sinal óptico e transmitido através de fibra ótica até à unidade remota do decodificador com conversores D/A. Neste decodificador o sinal digital é decodificado, demultiplexado e convertido em cinco sinais analógicos normalizados (que correspondem aos cinco sinais de medição originais). A solução desenvolvida foi adaptada a partir de várias limitações impostas pelas propriedades mecânicas do rotor tais como o pequeno espaço disponível para colocar o módulo, baterias apropriadas para fornecer potência ao módulo e aos sensores, além de da necessidade de consumo de potência baixo devido à operação contínua requerida para o sistema. O bloco de transmissão óptica, consiste na parte transmissora do componente mecânico (LEDs) que gira e no bloco de recepção da parte estacionária. A placa receptora estacionária consiste de fotodiodos conectados em paralelo e posicionados em uma placa colocada em torno do eixo em forma de anel. No rotor três diodos emissores de luz infravermelhos em série são posicionados ao longo de um círculo oposto aos fotodiodos. Uma posição angular especial dos diodos emissores de luz infravermelhos assegura que a transmissão óptica de dados seja feita independente da posição angular e da velocidade do eixo.

A técnica descrita na referência [3] foi implementada em 1993 na medição de um hidrogerador de 167 MVA que havia sido repotenciado para 235 MVA. Trata-se da unidade 4 da usina hidrelétrica de Robert Moses, na cidade de Lewiston, New York, USA. A medição de temperatura ao longo do comprimento dos pólos do rotor, do anel magnético, da junção dos braços da aranha com o anel, foi feita utilizando-se de termopares tipo K (Krommel-Alummel) conectadas a um coletor de temperatura comercial, com as seguintes características: compacto, portátil, alimentado a pilha ou bateria comum, durabilidade das baterias de 48 horas, dispõe de memória para no mínimo 1000 registros e possui 6 canais de entrada de dados. O instrumento foi montado dentro de uma caixa suporte próximo ao eixo do rotor, em virtude das forças centrífugas. Os termopares são lançados em conduítes de aço que são presos aos braços da aranha do rotor. Ao final do ensaio de aquecimento do rotor que dura 24 horas o

instrumento é retirado e conectado a um computador pessoal para descarregar através de um software específico que acompanha o instrumento.

Finalmente na referência [4] é descrito um primeiro sistema de monitoramento de máquinas rotativas usando fibras ópticas. O sistema tem algumas semelhanças com o descrito neste trabalho e foi testado em turbinas movidas a gás.

### 3.0 - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ÓPTICO PASSIVO DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA E DA DEFORMAÇÃO DO ROTOR

Com base no estudo do estado da arte propomos um novo sistema de medição. A Figura 1 ilustra o diagrama esquemático do sistema de medição sem fio da temperatura e da deformação do rotor de hidrogerador. O sistema é composto pelos seguintes elementos e respectivas funções:

- Sensores de temperatura e/ou de deformação baseados em fibra com grade (FBG)
- Fibras ópticas cuja função é interligar os sensores ópticos com os outros elementos do sistema.
- Colimadores ópticos cuja função é permitir a conexão com menor perda possível do sinal dos sensores que estão em movimento no rotor com a parte fixa do gerador.
- Interrogador cuja função é adquirir, processar os dados dos sensores e transmitir os mesmos para um computador ou rede de computadores.
- Computador cuja função é alojar o software de aquisição de dados dos sensores e um banco de dados do sistema de aquisição.

#### 3.1 Fibras com Grade de Bragg

As fibras com grade de Bragg [5] são fibras ópticas especiais que apresentam em seu núcleo uma modulação periódica do índice de refração. Estas fibras vem sendo utilizadas como sensor para medição de diversos parâmetros como deformação, temperatura, pressão, tensão mecânica, corrente elétrica, campo elétrico e outros. A Figura 2(a) ilustra um segmento de fibra óptica com uma grade de Bragg, com período espacial  $\Lambda$ , gravada ao longo do eixo do núcleo da fibra. As grades construídas em fibra, com cerca de 10 a 100 mm de comprimento, são praticamente imperceptíveis a olho nu. As cores foram utilizadas para facilitar a apresentação da estrutura de uma grade.

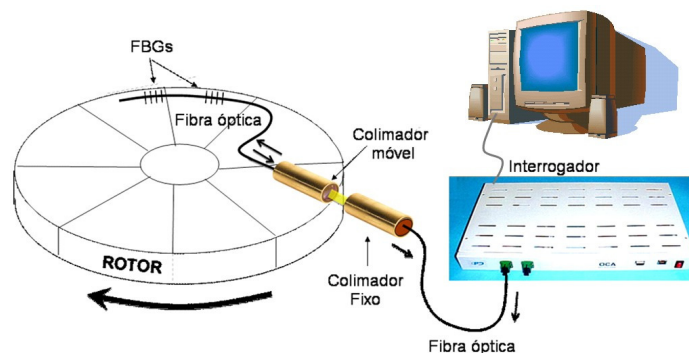


Fig. 1 – Sistema de sensoriamento proposto. FBGs, colimadores, interrogador e computador.

As grades de Bragg são previamente projetadas com períodos  $\Lambda$ , para retro-espalhar a luz em torno de um determinado comprimento de onda  $\lambda_B$ . Portanto a grade age como um refletor sintonizado em  $\lambda_B$ , reflete, com grande eficiência os comprimentos de onda próximos a  $\lambda_B$  e transmite os demais comprimentos de onda. A Figura 2(b) ilustra o mecanismo de operação de uma fibra com grade de Bragg sobre um feixe contendo várias componentes espectrais. A operação da grade de Bragg em fibra óptica é baseada na expressão  $\lambda_B = 2\Lambda n_{ef}$ , [6], onde,  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg, comprimento de onda retroespalhado pela grade de Bragg inscrita na fibra,  $\Lambda$  é o período da grade e  $n_{ef}$  do índice de refração efetivo.

Uma vez que a tensão mecânica e a temperatura podem mudar os dois parâmetros,  $\Lambda$  e  $n_{ef}$ , o comprimento de onda refletido por uma grade de Bragg varia em função destas perturbações externas, ocorrendo um deslocamento espectral da luz refletida pela grade que pode ser usada para medir estas e outras grandezas, permitindo desta forma, desenvolver e implementar variadas aplicações.

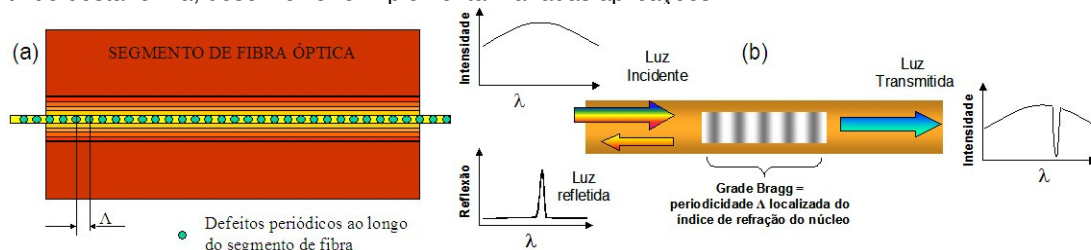


Fig. 2 – (a) Configuração de uma grade de Bragg ao longo de um segmento de fibra e (b) fibra com grade de Bragg atuando sobre os componentes espectrais transmitidos na fibra

Para a medição de temperatura ou deformação, portanto, é necessário um transdutor, isto é, um material sobre o qual a FBG é montada e que tenha maior sensibilidade a variações de temperatura (deformação).

O sensor de temperatura escolhido foi o modelo os4100 da Micron Optics. Para garantir estabilidade de longo termo o os4100 não usa epoxy ou outro tipo de cola como parte de sua estrutura. Este sensor pode ser usado sozinho ou como parte de uma rede de sensores por FBG. Pode ser facilmente montado diretamente sobre a maioria dos materiais com epoxy, parafusos ou ponto de solda. O os4100 é um dispositivo de grau industrial destinado a ambientes hostis encontrados em aplicações em energia, construção civil, transporte e indústria aeroespacial. Algumas especificações deste sensor são: faixa de operação = -40 a 120 °C, repetibilidade =  $\pm 0.75$  °C ( $\pm 21$  pm) e sensibilidade = 28.9 pm/°C,

O sensor de deformação óptico (Optical Strain Gage) escolhido foi o modelo os3100 também da Micron Optics. É uma alternativa ideal aos sensores de deformações elétricos, tendo como vantagens, a elevada acurácia, estabilidade de longo termo, desempenho superior em ambientes hostis e possui recorde de resistência à fadiga mecânica. Também é facilmente montado diretamente sobre a maioria dos materiais via epoxy, parafusos ou ponto de solda. Algumas especificações deste sensor são faixa de operação = -40 a 120 °C, limite de deformação =  $\pm 2500\mu\text{m/m}$ , fadiga  $>20 \times 10^6$  ciclos,  $\pm 1000\mu\text{m/m}$  e Gage Factor ( $F_G$ ) = 0.890 @ 22 °C .

### 3.2 Colimadores de Fibras Ópticas

Os colimadores de fibras ópticas são dispositivos ópticos passivos usados para alargar o feixe de luz, facilitando o alinhamento e o trabalho com estes feixes no que se chama de óptica de espaço livre. Os colimadores de fibra óptica podem ser do tipo monomodo ou multimodo. Seus diâmetros podem ser tão estreitos quanto a própria fibra, por exemplo, 125  $\mu\text{m}$ , ou tão largos quanto dezenas de milímetros. Sua estrutura básica, entretanto, consiste em uma lente e em uma fibra ótica. A seguir são descritos brevemente os tipos de colimadores [6].

Quase todos os tipos conhecidos de lentes foram usados para construir colimadores. Estas lentes incluem: lentes de fibra, lentes asféricas, lentes esféricas simples e duplas, lentes GRIN (GRaded INdex), objetivas de microscópio, lentes cilíndricas, e nenhuma lente como na caso da fibra com núcleo termicamente expandido. Os materiais da lente podem variar do vidro ao plástico ao silicone. As lentes GRIN são pequenas, fáceis de manipular, de baixo custo, e competitivas quanto ao desempenho ótico, entretanto, raramente vêm em tamanho grande. Enquanto as lentes GRIN são perfeitas para dispositivos usados em telecomunicações, não são apropriadas para gerar feixes óticos grandes tais como aqueles usados nas aplicações de comunicação óticas de espaço livre (FSO) onde o tamanho do feixe pode variar de alguns milímetros à dezena de milímetros.

Para um tamanho do feixe de 1 mm a 5 mm, as lentes asféricas são ideais principalmente pela sua habilidade de corrigir a aberração esférica. Para feixes maiores do que alguns milímetros, lentes esféricas simples ou duplas podem ser a melhor escolha, pois seu custo é baixo e são difundidos no mercado. Quase todas as lentes polidas formam superfícies planas e esféricas que limitam a habilidade das lentes de focalizar um feixe ótico gaussiano em um ponto limitado por difração. O termo técnico para este comportamento é aberração esférica. Em conseqüência, a eficiência do acoplamento entre os pares do colimador feitos com lentes esféricas não é ótima. As lentes asféricas usam um contorno de superfície ligeiramente modificado para reduzir significativamente a aberração esférica. Estas lentes são ideais para a maioria das aplicações com único comprimento de onda ou largura espectral relativamente pequena.

As fibras monomodo produzem feixes gaussianos perfeitos. Um feixe gaussiano colimado comporta-se muito diferentemente de um feixe multimodo. Os feixes gaussianos mantêm a colimação por uma determinada distância, chamada freqüentemente de parâmetro confocal do feixe que varia de fração de milímetro para colimadores muito pequenos a metros para colimadores de feixe largo. O centro do parâmetro confocal do feixe é chamado de cintura do feixe. É muito importante definir a posição da cintura do feixe para conseguir o melhor desempenho. A cintura do feixe pode ser ajustada para um dado colimador. Quanto mais longo o comprimento focal, maior o intervalo de ajuste. O que é importante de salientar é que dobrando o comprimento focal quadruplica-se o intervalo de ajuste e o parâmetro confocal do feixe. Os colimadores multimodos por outro lado na realidade nunca colimam o feixe, simplesmente formam a uma imagem do núcleo da fibra a uma determinada distância. Conseqüentemente, é crítico definir a distância da imagem entre o par de colimadores.

Os colimadores utilizados neste trabalho são os modelos F810FC-1550, F810APC-1550, F260FC-1550 e F240APC-1550 da Thorlabs que são pré-alinhados na fábrica para colimar um feixe que se propaga da extremidade de um conector FC/APC ou FC/PC. Desde que os colimadores não têm nenhuma peça móvel, são compactos e não são suscetíveis ao desalinhamento. A lente tem um revestimento anti-reflexivo que minimiza as reflexões nas superfícies da mesma. As características dos modelos escolhidos são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos colimadores usados no sistema de sensoriamento.

Modelo	Comprimento de Onda	Diâmetro do feixe (mm)	Ângulo de divergência (graus)	Abertura Numérica	Foco (mm)
F240APC-1550	1550 nm	1.50	0.075°	0.50	8.00
F260FC-1550	1550 nm	2.90	0.039°	0.16	15.3
F810APC-1550	1550 nm	7.00	0.016°	0.24	37.00
F810FC-1550	1550 nm	7.00	0.016°	0.24	37.00

### 3.3 Interrogador

O interrogador é o equipamento que permite a visualização do espectro óptico com a presença dos sinais de retorno das fibras com grade. Este equipamento que foi desenvolvido pelo CPqD em outros projetos é diferente dos analisadores de espectro óptico de laboratório. Destinado para o uso em sistemas de telecomunicações e sensoriamento, apresenta funcionalidades e custo reduzido. O equipamento integra os seguintes módulos: analisador óptico de canais (OCA), processador de dados baseado no sistema operacional LINUX, chave óptica, para a leitura de diversas entradas ópticas pelo mesmo equipamento, circulador óptico para rotear a luz de retorno para o módulo OCA, placa de comunicação Ethernet e fonte de luz ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), para gerar luz em banda larga para os sensores a fibra com grade. O módulo OCA comercial utiliza a tecnologia de fibra de Bragg (*Blazed FBG*) e matriz de fotodetectores para ler o espectro óptico da banda C (1528 nm a 1568 nm). A precisão do equipamento na leitura de comprimento de onda é de 50 pm e a precisão de potência lida é de 0.5 dB. O tempo de leitura de toda a banda espectral da banda C é inferior a 100 ms. O módulo de chaveamento óptico utiliza tecnologia MEMS e pode de acordo com a aplicação possuir até 16 portas ópticas de entrada. O módulo de processamento de dados possui microprocessador de 32 bit operando com *clock* de 50 MHz e 8 Mb de memória Flash. O módulo OCA já integrado com todos estes outros módulos exterioriza os dados via interface Ethernet 10BaseT ou via interface serial. A Figura 3(a) mostra uma foto do interrogador do CPqD e a Figura 3(b) o espectro de reflexão de algumas grades.

### 3.4 Software de aquisição

O software de aquisição de dados versão preliminar foi desenvolvido em Labview, mas é um programa executável, podendo funcionar em qualquer máquina sem que seja necessária a instalação do *software* Labview. Trata-se da interface do usuário com o *firmware* do equipamento. Este software permite a comunicação com o equipamento Interrogador via Ethernet, bastando para isso indicar o endereço IP na aba configurações. Ainda em configurações pode-se determinar qual porta da chave óptica está sendo lida. A parte principal da tela (Figura 3(b)) permite visualizar o espectro atualmente lido, os comprimentos de onda lidos para cada sensor em função do tempo e a temperatura lida (calibrada pelo fator de conversão do sensor FBG, ou eventualmente determinada experimentalmente). Deve-se indicar o número de sensores a serem lidos e o nível de limiar de potência a considerar para a leitura. À direita da tela está um botão de parar medida e os comprimentos de onda detectados.

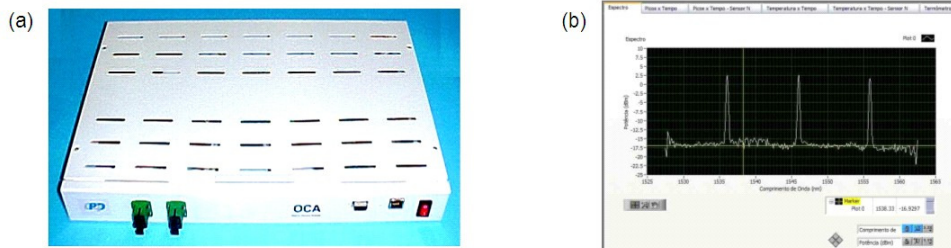


Fig. 3 – (a) Foto do interrogador do CPqD usado neste projeto e (b) uma das telas do software do interrogador.

## 4.0 - RESULTADOS DE TESTES LABORATORIAIS

### 4.1 Estatísticas de Captação Espectral de 0 a 800 RPM

Os testes foram realizados em um torno mecânico (Figura 4) cuja rotação pode ser ajustada de 0 RPM a 800 RPM. A idéia é simular rotores de hidrogeradores de baixa rotação, como o da Usina de Tucuruí (cerca de 80 RPM) e máquinas com elevadas rotações. Este é o caso do hidrogerador da PCH (Pequena Central Hidroelétrica) Luiz Dias que pertencente à Universidade de Itajubá, onde foi proposta a realização de um teste de campo do sistema. Esta máquina tem a rotação de cerca de 700 RPM e dimensões comparáveis ao do torno usado nos ensaios laboratoriais.

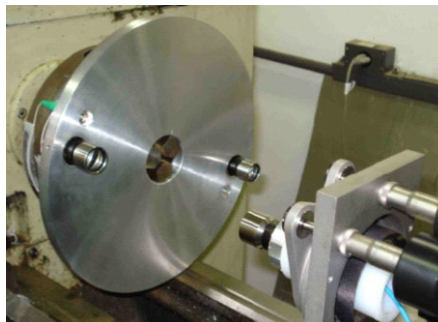


Fig. 4 – Torno Mecânico usado para os testes. Na parte à esquerda da foto está posicionado o colimador móvel e na direita o colimador fixo (com montagem mecânica para alinhamento).

Inicialmente, utilizamos o colimador F810FC-1550, com fibras monomodo e conectores angulares (APC). O Colimador fixo foi colocado à distância de 5 cm do colimador móvel. Na Figura 5(a) observamos o intervalo entre duas medidas consecutivas (capturas de espectro consecutivas, que equivalem a medidas de temperatura sobre o rotor) ao longo do tempo de ensaio (1 hora). Por exemplo, notamos que a 63 RPM a maioria dos espectros foram captados em menos de 10 segundos e em média a cada 8.7s. O tempo máximo entre uma captura e outra foi de 35 s. Já para 630 RPM (valor mais próximo do rotor do hidrogerador da PCH Luiz Dias), temos a maioria dos espectros sendo capturados em menos de 1.5 segundos, com valor médio de 1 s e tempo máximo de 3.3 s.

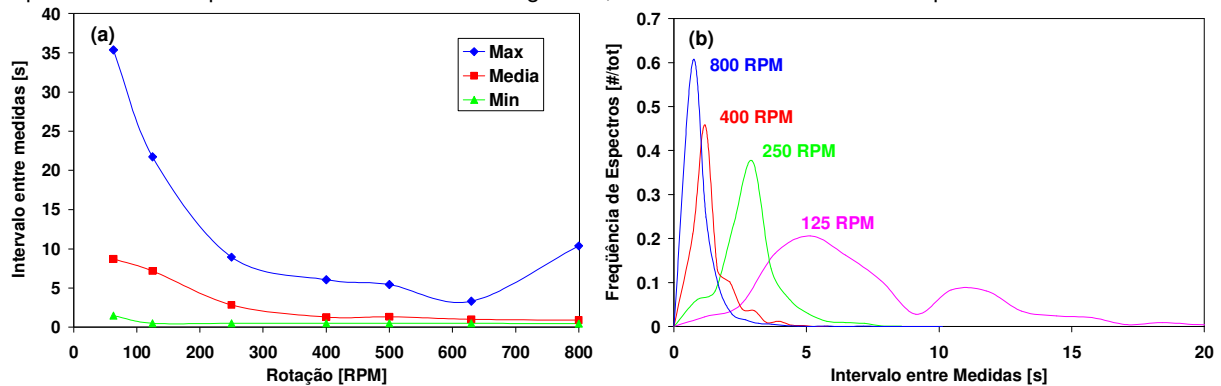


Fig. 5 – (a) Intervalos de tempo máximo, médio e mínimo de detecção de espectros consecutivos em função da velocidade de rotação do torno mecânico e (b) freqüência de captação de espectros em função do intervalo entre medidas para algumas rotações.

Na Figura 5(b) são mostrados os histogramas para algumas rotações. Pode-se observar que para rotações mais elevadas é mais provável a captura de leituras consecutivas em tempo menor e, à medida que a rotação diminui, maior o intervalo de tempo entre uma captura e outra. Isto é de se esperar, uma vez que para rotações maiores, os colimadores estarão alinhados mais vezes em um dado intervalo de tempo. Na verdade, poderíamos supor que uma captura ocorre a cada coincidência. Assim, a 800 RPM teríamos 800 espectros capturados por minuto e a 63 RPM, teríamos 63 capturas por minuto. Como veremos a seguir, devido a pequenos desalinhamentos e à falta de sincronismo entre a leitura do interrogador e a coincidência espacial dos colimadores, nem toda a passagem de coincidência de colimadores corresponde a uma captura espectral. De fato, fazendo testes para diversos tipos de colimadores em diversas configurações, chegamos, para a montagem utilizada que a cada 10 giros ocorre uma captura, aproximadamente.

#### 4.2 Comparação entre Diversos Colimadores

Realizamos ensaios com 4 tipos de colimadores, a saber, F810FC-1550, F810APC-1550, F260FC-1550 e F240APC-1550, cujas características estão resumidas na Tabela 1. O código FC indica colimador para uso específico com fibras com conectores PC (sem ângulo e, portanto com reflexão que propaga na fibra). O código APC significa que estes colimadores são adequados para uso com fibras com conectores APC (em ângulo). Observamos, entretanto que o uso de conectores APC em todos os casos melhora a relação sinal ruído óptica, e os ensaios aqui comentados foram todos realizados usando-se este tipo de conector nas fibras. Na Figura 6, temos os resultados dos estudos com os colimadores F810FC-1550, F810APC-1550 e F260FC-1550, já que o colimador F240APC-1550 não se mostrou adequado, como será explicado mais adiante. Para todos os casos graficamos na figura o número de espectros capturados por minuto (NEM) e a razão NEM/RPM, que dá o número de voltas por captura, conforme definição dadas pelas expressões (1):

$$NEM = \frac{\text{número de espectros capturados}}{\text{tempo total de medição em minutos}} ; \quad \text{Num. de Voltas por Captura} = \frac{NEM}{RPM} ; \quad (1)$$

A razão NEM/RPM nos fornece uma figura de mérito da capacidade de aquisição. Os ensaios foram realizados para diversas rotações (dadas em RPM). Nas Figuras 6(a) a e 6(b) estão ilustrados dois casos usando o colimador F810FC-1550, na Figura 6(a) o colimador fixo e móvel estão a 5 cm de distância e na Figura 6(b), a 17cm de distância (excursão máxima da montagem experimental). Em ambos os casos, a razão NEM/RPM é da ordem de 11, significando que a cada 11 giros do rotor, ocorre uma captura espectral (e, portanto, um registro das temperaturas dos sensores eventualmente instalados sobre o equipamento). Na Figura 6(c) temos o resultado para o colimador F810APC-1550 distanciado de 3.7 cm de seu par fixo e na Figura 6(d) o resultado para o colimador F260FC-1550 distanciado de 6 cm de seu par fixo. Nestes últimos dois casos a figura de mérito NEM/RPM é da ordem de 10, significando que a cada 10 giros do rotor ocorre uma captura. Salientamos que este é um valor médio para todas as velocidades de rotação e em algumas velocidades este valor pode ser um pouco maior ou menor. Porém em linhas gerais, para este sistema, o NEM cresce linearmente com um fator de 10 ou 11. Isso quer dizer, por exemplo, que a 700 RPM (velocidade de rotação do rotor da PCH Luiz Dias) serão capturados 70 espectros por minuto o que corresponde a uma medida de temperatura a cada ~1.2s.

A taxa de captura não é o único fator a ser analisado. Outros fatores importantes são a relação sinal ruído óptica (OSNR) e a potência de pico refletida por cada FBG.



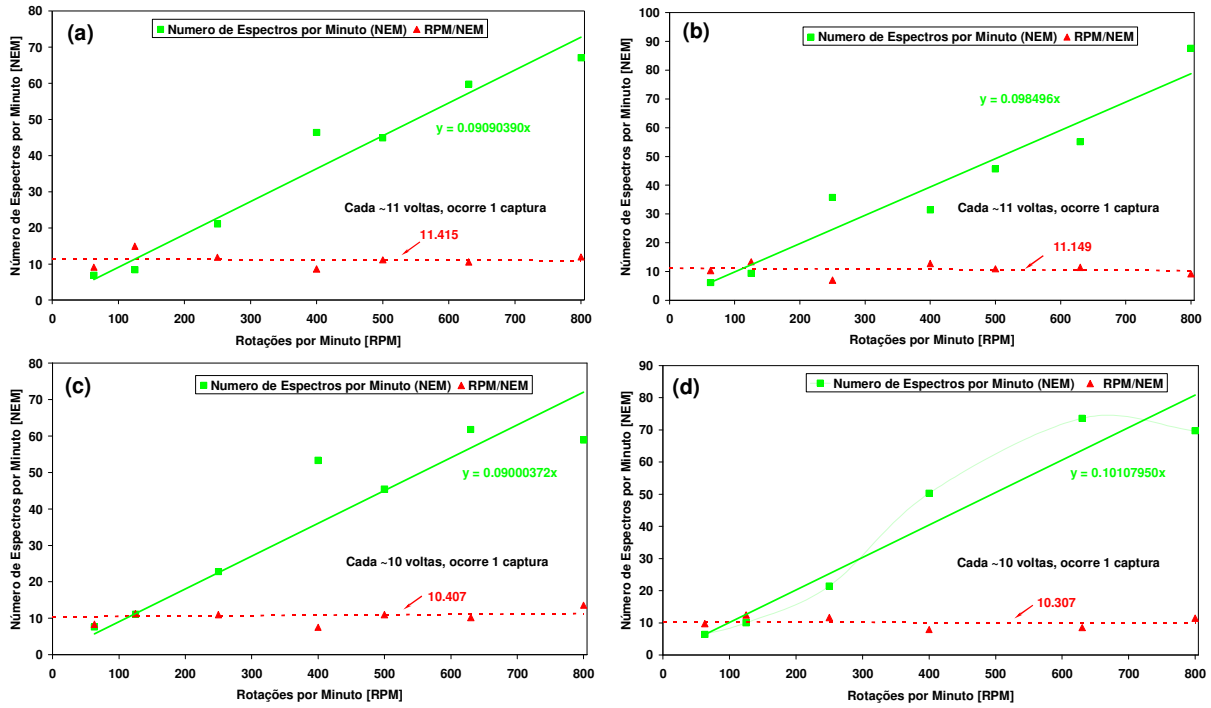


Fig. 6 – Número de espectros capturados por minuto (NEM) e figura de mérito dada pela razão NEM/RPM, para os colimadores: (a) F810FC-1550 a 5 cm de distância do seu par fixo, (b) F810FC-1550 a 17 cm de distância do seu par fixo, (c) F810APC-1550 a 3.7 cm de distância do fixo e (d) F260FC-1550 a 6 cm de distância do colimador fixo.

Estes parâmetros foram estudados para os 4 colimadores mencionados acima, para várias distâncias de separação entre colimadores móvel e fixo, variando a velocidade de rotação. Os resultados são mostrados na Figura 7(a) (potências de pico) e Figura 7(b) (OSNR). Inicialmente observamos que o colimador F240APC-1550 apresentou baixo desempenho devido a desalinhamento entre a mecânica e o conjunto óptico. Não ficou claro se isso foi um caso esporádico (deste conjunto específico) ou construtivo, ou seja, inerente ao produto com estas especificações. Com relação aos colimadores F810APC e F260FC, temos que as potências de pico registradas são praticamente as mesmas para quaisquer distâncias de trabalho, exceto para grandes distâncias, ex.17cm, onde o colimador F260FC apresenta menor potência de pico, e conseqüente piora na OSNR. Entre os resultados destes dois tipos de colimadores, temos cerca de 2.5 dB de diferença, sendo que o colimador F260FC, de área menor, apresenta desempenho pior. Entretanto, para rotações elevadas, a diferença parece se reduzir. Ao observarmos a Figura 7(b), vemos que a diferença cresce para 5 dB. Isto deve-se ao menor nível de ruído observado quando se usam colimadores para conectores APC (nível de ruído é de -17.5 dBm). Quando utilizamos conectores do tipo APC em colimadores desenvolvidos para conectores PC, o nível de ruído é de cerca de -15 dBm, significando um desempenho 2.5 dB pior somente devido a este fato.

A queda de OSNR da potencia de pico com o aumento da velocidade de rotação, deve-se ao tempo em que o array de fotodetectores do interrogador fica exposto à luz. Quanto maior a velocidade de rotação, menos sinal é captado, além disso, um colimador de área menor tem “tempo de coincidência” menor, e por isso o colimador F260FC apresenta sinal menor, em rotação, que o colimador F810APC (ou F810FC). Vale observar que as potências de pico observadas pelo F810FC são as mesmas que as observadas para o colimador F810APC, apenas o nível de ruído é diferente (não mostrado nas figuras).

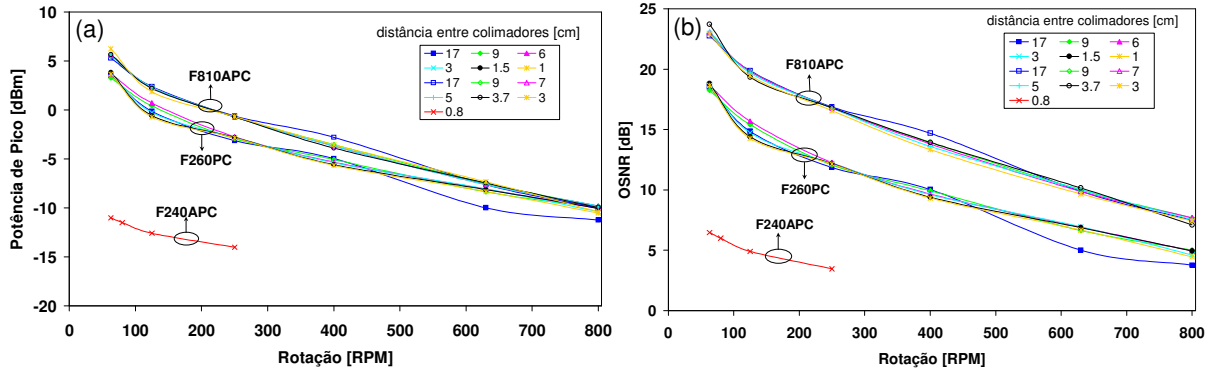


Fig. 7 –Evolução da potência de pico (a) e da OSNR (b) em função da velocidade de rotação, para várias separações entre colimadores.

### 4.3 Calibração Sensores de Temperatura

A calibração dos sensores FBG foi realizada por meio da comparação entre um sensor eletrônico LM35 e um sensor óptico com fibra com grade de Bragg da Micronoptics em um ciclo de aquecimento e resfriamento da temperatura ambiente até 65°C. O teste foi realizado aquecendo-se ambos os sensores e registrando os valores de temperatura fornecidos pelo LM35 e o comprimento de onda refletido pela FBG ao longo do tempo. Um gráfico com a curva de calibração do sensor FBG obtido pela comparação entre dados de comprimento de onda em função da temperatura registrada pelo sensor eletrônico LM35 e seu ajuste linear é mostrado na Figura 8(a). Na Figura 8(b) temos o ciclo térmico de aquecimento e resfriamento ao longo do tempo com os dados da FBG já convertidos em temperatura, mediante a expressão no *inset* da Figura 8(a).

A expressão que dá a temperatura do sensor FBG a partir do comprimento de onda lido é  $T = T_0 + (\lambda - \lambda_0) / S_T$  onde  $T_0$  e  $\lambda_0$  são a temperatura e o comprimento de onda iniciais, p.ex. à temperatura ambiente. A expressão acima é obtida pelo ajuste linear da curva da Figura 8(a). Onde  $T_0 = 24.10^\circ\text{C}$  e  $\lambda_0 = 1530.379 \text{ nm}$  e  $S_T = 0.033184 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . Para outros sensores à FBG do mesmo fabricante o valor de  $S_T$  é mantido inalterado (mesmo encapsulamento metálico responsável pela dilatação e/ou contração) e apenas obtemos os diferentes comprimentos de onda iniciais,  $\lambda_0$ , medidos na temperatura  $T_0 = 24.10^\circ\text{C}$ .

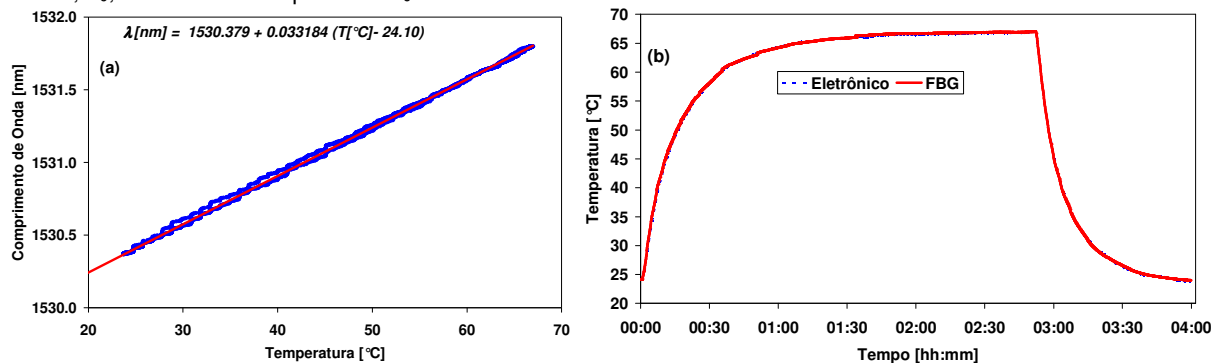


Fig. 8 – Curva de calibração do sensor FBG: (a) comparação entre dados de comprimento de onda em função da temperatura registrada pelo sensor eletrônico LM35 e ajuste linear; (b) ciclo térmico de aquecimento e resfriamento ao longo do tempo com os dados da FBG já convertidos em temperatura.

### 5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentamos os resultados do desenvolvimento de um sistema de medição sem fio da temperatura e da deformação do rotor de hidrogerador. O sistema foi desenvolvido e testado com sucesso nos laboratórios do CPqD e deverá ser testado em campo em um hidrogerador da PCH (Pequena Central Hidroelétrica) Luiz Dias pertencente à Universidade de Itajubá (UNIFEI). Foi apresentada a concepção do sistema proposto para a medição de temperatura do rotor do hidrogerador, bem como testes do sistema montado em laboratório que validam o sistema para uso em máquinas de diferentes rotações. A validação baseou-se no estudo das estatísticas de captação espectral de 0 a 800 RPM. Foram comparados resultados utilizando diversos colimadores adquiridos. Foi obtida a calibração dos Sensores de Temperatura comerciais (Micron Optics, os4100) comparando os resultados com um sensor eletrônico conhecido.

### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Douglas, "Hydro Generator Failure", IEEE Power Engineering Review, Págs. 4-6, Novembro 1988.
- [2] L. D. Jovanovic, "Optical Transmission System for Acquisition and Measurement of the Signals from the High-speed Rotating Shaft", Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000, Proceedings of the 17th IEEE, Págs: 1308-1312, Vol.3, 2000.
- [3] F. S. F. Sá, M. D. da Silva, "Máquinas Rotativas e Conversão de Energia", SNPTEE, 1995.
- [4] M. Willsch, T. Bosselmann, W. Ecke, I. Latka, M. Müller, H. Adolf, "FBG sensor interrogation on rotating parts of large machines in power generation plants", OFS - Optical Fibre Sensors Conference, Paper 7004-243, Proc. of SPIE Vol. 7004 70045I-4, 2008.
- [5] R. Kashyap, "Fiber Bragg Gratings", Academic Press, 1999, ISBN 0-12-400560-8
- [6] [http://www.princetel.com/tutorial\\_collimator.asp](http://www.princetel.com/tutorial_collimator.asp)