



**XXIII SNPTEE  
SEMÍNÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/17  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

## GRUPO - 1

### GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

#### SISTEMA ÓPTICO DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO NOS ENROLAMENTOS DOS POLOS DE HIDROGERADORES

**João Paulo V. Fracarolli (\*)<sup>(1)</sup>, Claudio Florida<sup>(1)</sup>, João B. Rosolem<sup>(1)</sup>, Ariovaldo A. Leonardi<sup>(1)</sup>, Rivaél S. Penze<sup>(1)</sup>, Elias K. Tomiyama<sup>(1)</sup>, Rodrigo Peres<sup>(1)</sup>, Danilo C. Dini<sup>(1)</sup>, Claudio A. Hortencio<sup>(1)</sup>, Paulo Ivã G. Dilli<sup>(2)</sup>, Erlon V. da Silva<sup>(2)</sup>, Marcéu C. dos Santos<sup>(2)</sup>**

**FUNDAÇÃO CPqD (1)**

**TRACTEBEL ENERGIA S.A. (2)**

#### RESUMO

Este trabalho descreve o problema de curtos-circuitos nas bobinas dos polos de geradores síncronos e apresenta uma solução em desenvolvimento pelo CPqD com suporte financeiro da Tractebel Energia S.A. e ITÁ Energética S.A. de um sistema óptico com a finalidade de detectar a ocorrência desse defeito em um hidrogerador de grande porte por meio da medição do campo magnético gerado em cada polo. Será apresentado também o estado da arte em termos de sistemas de medição e monitoramento de curtos-circuitos nas bobinas dos polos do rotor, sejam comerciais ou em caráter experimental (projeto desenvolvido no âmbito do Programa de P&D da Tractebel Energia regulamentado pela ANEEL).

#### PALAVRAS-CHAVE

Curto-circuito no rotor, grade de Bragg em fibra, monitoração de campo magnético, hidrogerador.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo básico para diversos ramos econômicos ligados à agricultura, indústria e serviços, sem mencionar o seu papel crucial para o pleno desenvolvimento humano ao tornar possível o uso de bens de consumo. No processo de geração da energia elétrica no mundo, os hidrogeradores desempenham um papel fundamental. Particularmente no Brasil, foram responsáveis por 68,6% da geração de eletricidade em 2013 (1). Dessa forma, é fundamental o monitoramento permanente das suas condições de funcionamento, a fim de garantir que trabalhem dentro das suas especificações de forma segura e por longos períodos.

Falhas nos enrolamentos de campo representam um percentual significativo de defeitos em geradores síncronos. A referência (2) mostra que mais de 50% dos geradores em operação apresentam algum nível de curto-circuito nas espiras dos polos do rotor. A deterioração normalmente começa com um curto-circuito envolvendo poucas espiras. Curtos-circuitos entre espiras têm, dentre outras consequências danosas, a redução na capacidade de fornecimento da potência nominal, o desbalanceamento magnético gerando conjugado oscilante e vibrações, comprometendo a integridade não só do rotor, mas do gerador como um todo. Além disso, a corrente elétrica que circula no curto-circuito provoca aquecimento localizado que pode se estender para outras seções do enrolamento ocasionando a perda de bobinas ou polos e assim a indisponibilidade temporária do gerador (3).

A grande competitividade do mercado e alta demanda de energia faz com que as empresas geradoras operem suas máquinas cada vez mais próximas dos limites de projeto e com intervalos menores para manutenções. Isso torna as paradas não programadas extremamente indesejadas. Assim, a detecção de falha inicial nas espiras do enrolamento do gerador se apresenta como um tema de pesquisa atual e relevante. Por outro lado, o diagnóstico da falha não é uma tarefa trivial, pois a presença de pequenas porcentagens de espiras em curto-circuito no enrolamento de campo não traz, na maioria dos casos, grandes consequências para a máquina (4). Problemas operacionais começam a ser percebidos quando a porcentagem de espiras em curto-circuito ultrapassa 5% do total de espiras.

(\*) Rua Dr. Ricardo Benetton Martins, s/n – Parque II do Polo de Alta Tecnologia. CEP 13086-902, Campinas, SP, Brasil. Tel: (+55 19) 3705-4829 – Email: jpaulo@cpqd.com.br

Dentro dessa perspectiva, este artigo apresenta um sistema inovador empregando tecnologia óptica para detecção de curto-circuito nas espiras do enrolamento de campo de hidrogeradores. O projeto faz parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Tractebel Energia 2013 e vem sendo desenvolvido pelo CPqD com a Tractebel Energia S.A. e ITÁ Energética S.A. A detecção de curtos-circuitos nas espiras será feita através do sensoriamento do campo magnético produzido pelos polos do rotor da unidade geradora. Para isso, optou-se por utilizar um método baseado no emprego de um material magnetostritivo (Terfenol-D), isto é, um material que sofre deformação mecânica de acordo com o campo magnético aplicado sobre ele, associado a uma grade de Bragg em fibra óptica (FBG – Fiber Bragg Grating). A resposta da grade em relação a variações do campo magnético é traduzida como deslocamentos do seu comprimento de onda central. Desta forma, temos um tipo de resposta no domínio da frequência, que independe da amplitude do sinal óptico na fibra. Assim, houve a necessidade de trabalhar com um interrogador que possa detectar estes deslocamentos em comprimento de onda e fornecer esta informação de forma visual para análises do campo magnético, cuja intensidade é proporcional ao deslocamento da FBG. Testes iniciais nos laboratórios do CPqD utilizando discos com ímãs e um solenoide apresentaram resultados satisfatórios sob o ponto de vista de tempo de resposta e sensibilidade do sensor. Estão previstos ainda testes em um laboratório de máquinas elétricas de uma universidade e o teste em campo em um gerador da UHE Salto Osório, respectivamente, no segundo e terceiro trimestre de 2015.

## 2.0 - CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS NOS ENROLAMENTOS DO ROTOR

Os polos de um hidrogerador, mostrado na Figura 1a, têm a função de converter a corrente contínua fornecida pelo sistema de excitação em um fluxo magnético que, associado ao movimento do rotor, induz a tensão nos enrolamentos da armadura instalados no estator do gerador. Cada polo é constituído pela peça polar, enrolamento principal e enrolamento amortecedor. O enrolamento principal (Figura 1b) é do tipo concentrado e constituído por espiras de cobre eletrolítico de seção retangular. Cada espira é isolada uma da outra e da peça polar (Figura 1c). A Figura 2 mostra exemplos de curto-circuito entre espiras de um gerador (5).

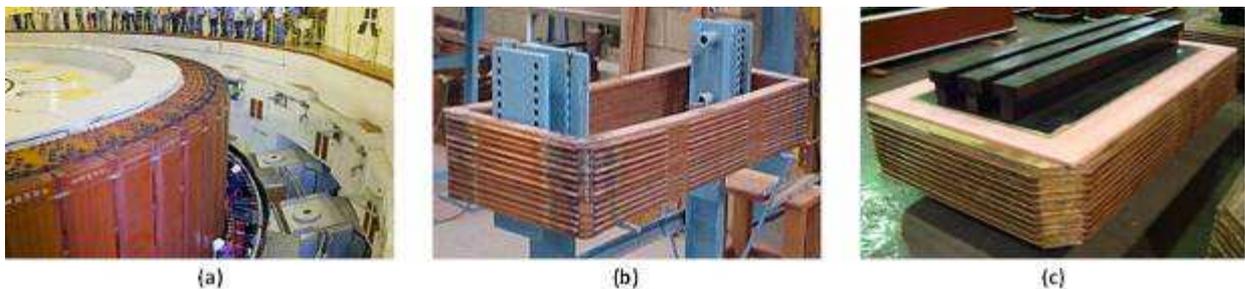


FIGURA 1 – (a) Rotor do hidrogerador, (b) montagem da bobina e (c) peça polar.



FIGURA 2 – Exemplos de curto-circuito entre espiras de geradores (5).

O curto-circuito entre espiras nos enrolamentos do rotor ocorrem geralmente pelas seguintes causas (6):

- Desgaste mecânico, por exemplo, causado por ciclos frequentes de partida/parada;
- Distorção, quebra e fissura devido ao carregamento mecânico centrífugo e ciclos de expansão/contração térmicos;
- Superaquecimento devido à sobrecarga, sobre-excitação ou refrigeração inadequada/reduzida;
- Superaquecimento local em juntas de alta resistência e em áreas em curto da bobina;
- Sobreensões induzidas a partir de eventos do sistema ou do circuito de disparo em excitatrizes estáticas;
- Contaminação por impurezas e umidade que podem se impregnar nas bobinas de campo e criar um caminho de baixa impedância entre as espiras ou para terra.

## 3.0 - PRINCIPAIS TÉCNICAS EMPREGADAS NA DETECÇÃO DE ESPIRAS EM CURTO-CIRCUITO NO ROTOR

**A. Análise do espectro de vibração mecânica:** baseia-se no fato de que, quando um curto-circuito ocorre em uma bobina do enrolamento (estator ou rotor) haverá uma mudança no comportamento da força magnetomotriz (FMM) e da indução produzida no entreferro (7). Ocorre que a FMM total induzida no entreferro é a soma das FMMs individuais de cada bobina do enrolamento. Uma vez ocorrido o curto-circuito em uma bobina, esse padrão

irá se alterar, afetando assim o comportamento da máquina. Assim, o padrão do espectro de vibração da máquina será alterado, uma vez que as forças que atuam sobre as partes mecânicas do gerador foram modificadas. Através da análise dessa alteração do espectro, é possível descobrir se a variação na dinâmica de vibração é causada por um defeito originado em um componente elétrico ou mecânico. Entretanto, é preciso conhecer a frequência natural de vibração dos componentes estruturais do gerador síncrono, e também o padrão do espectro quando na presença de defeitos mecânicos para assim distinguir a origem da anomalia.

A limitação desta técnica está no fato de que para detectar a presença do defeito, este deverá ser de grande amplitude e estar próximo da frequência natural dos componentes da máquina. Já as vantagens estão relacionadas à facilidade de coleta de dados uma vez que muitos geradores já dispõem de sensores de vibração.

**B. Análise do espectro da corrente de excitação:** trata-se de uma técnica aplicada em motores de indução conhecida como Motor Current Signature Analysis (MCSA), porém em geradores ainda não é uma prática comum (8). A distribuição assimétrica do campo magnético no entreferro, devido ao curto-circuito, gera componentes harmônicas adicionais na corrente do estator e conseqüentemente na corrente do rotor. Portanto, a análise das harmônicas da corrente de excitação permite o diagnóstico de curto-circuito nos enrolamentos da máquina.

Esta técnica tem a vantagem de permitir o monitoramento em tempo real dos dados da corrente de excitação além da não necessidade da instalação de novos sensores uma vez que a corrente de excitação já é adquirida pelos sistemas de monitoramento contínuo da máquina.

**C. Método da reflexão e transmissão de sinais de alta frequência:** propõe o uso de um gerador de sinais que, conectado aos terminais do enrolamento de campo, injeta dois pulsos idênticos e simultaneamente. Os sinais emitidos são refletidos e captados pelo circuito detector que faz a filtragem e o tratamento. Isso permite a criação de uma assinatura com as características dos sinais recebidos que se alteram na existência de um problema no enrolamento de campo (9).

Esta técnica é mais adequada de ser utilizada em geradores síncronos que possuam excitação através de escovas devido à facilidade de acesso aos terminais de enrolamento de campo. O método permite que a falha seja detectada, porém não localiza o ponto exato do defeito.

#### 4.0 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO ÓPTICO

O Terfenol-D ( $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$ ) é uma liga metálica composta de Têrbio, Disprósio e Ferro que possui um altíssimo nível de magnetostricção. Seu nome deriva dos elementos que o compõem e do seu desenvolvedor: *Ter* (Têrbio), *Fe* (Ferro), *NOL* (Naval Ordnance Labs) e *D* (Disprósio). Este material foi desenvolvido pelo NOL para aplicações militares, como o desenvolvimento de um sonar de alta potência com grande largura de banda e maior confiabilidade (10). Um material magnetostritivo é um tipo de ferromagnético que sofre mudanças de tamanho que dependem do campo magnético aplicado sobre o material. Sem um campo magnético aplicado, os dipolos magnéticos internos do material permanecem aleatoriamente orientados. Se, por outro lado, um campo magnético é aplicado, os dipolos se alinham com o campo, causando uma variação  $\Delta L$  no material, conforme representado na Figura 3.

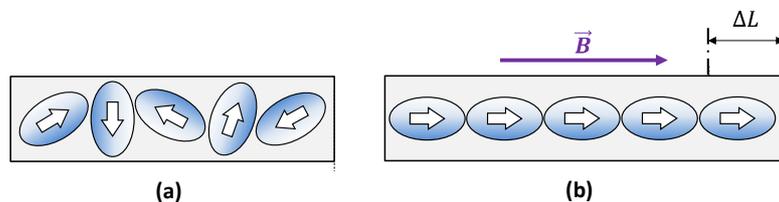


FIGURA 3 - Fenômeno da magnetostricção: (a) sem campo magnético e (b) com campo magnético.

Grades de Bragg em Fibra (FBG) são um tipo de refletor distribuído em fibras ópticas que atuam em certa faixa de comprimentos de onda enquanto transmitem as demais. São construídas variando-se periodicamente o índice de refração de um trecho do núcleo da fibra, gerando um espelho dielétrico, que reflete somente uma faixa determinada de comprimentos de onda. Assim, uma FBG funciona tanto como refletor seletivo quanto como um filtro. A FIGURA 4 representa esquematicamente as grades no núcleo, bem como o perfil ideal do índice de refração do mesmo.

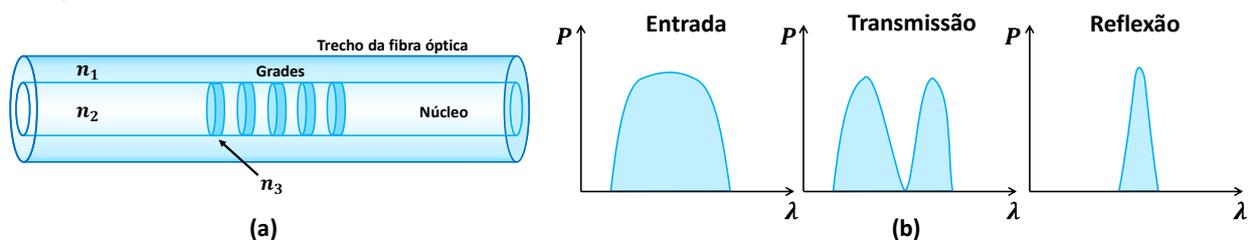


FIGURA 4 – (a) Representação de grades de Bragg em fibra, com o perfil do índice de refração do núcleo. (b) Exemplo de entrada na FBG, com os espectros transmitido e refletido.

A Figura 4b mostra um exemplo de espectro de entrada na FBG, representando também o espectro transmitido e o refletido. Nota-se que a FBG funciona como um filtro para uma faixa específica do comprimento de onda  $\lambda$ . É possível deslocar a resposta da FBG (espectro refletido) para outros comprimentos de onda variando-se a tensão mecânica ou a temperatura aplicada sobre ela.

Acoplando-se uma FBG a uma barra de Terfenol-D (Figura 5a), é possível obter um sensor óptico que responda a campos magnéticos. Como ilustra a Figura 5b, a tensão mecânica provocada pelo campo no Terfenol-D faz com que a fibra colada a ele também sofra a mesma tensão, variando então a faixa de comprimentos de onda refletidos pela grade. O deslocamento em comprimento de onda da resposta da grade já é em si só uma forma de detecção de campo magnético, bastando para processar esta informação um sistema interrogador de FBG de alta velocidade.

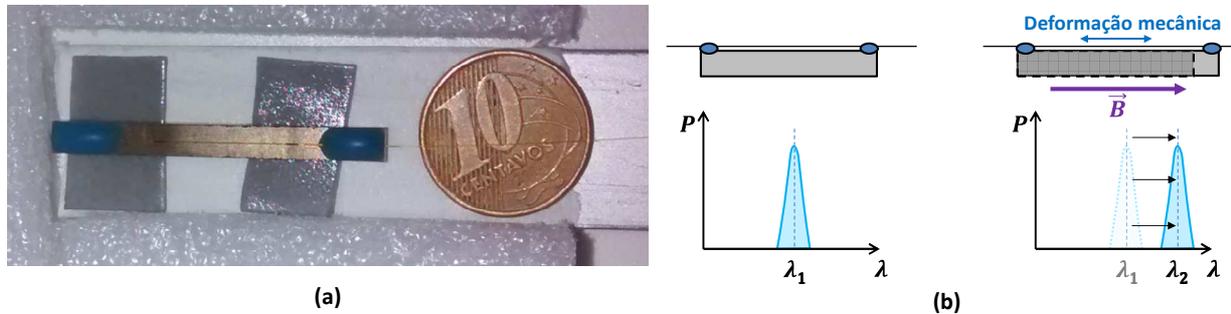


FIGURA 5 – (a) FBG acoplada a uma barra de Terfenol-D e (b) influência do campo magnético no Terfenol-D e na resposta da FBG.

#### 4.1 Sistema interrogador

O interrogador a ser utilizado deve atender a alguns requisitos, sendo o mais crítico a taxa de amostragem. Segundo os dados enviados pela Tractebel, as máquinas da UHE Salto Osório possuem 60 polos e operam a uma velocidade nominal de 120 RPM. Com estes dados, é possível calcular o tempo que leva para um polo passar totalmente diante do sensor, que, devido à proporção relativa das dimensões do mesmo em relação às dimensões dos polos, pode ser considerado como sendo pontual. Este tempo foi definido como tempo de polo,  $T_p$ , dado pela equação  $T_p = 60 / (N_n \cdot Pol)$ , onde  $N_n$  é a velocidade nominal da máquina em RPM e  $Pol$  é o número de polos. O tempo de polo é dado em segundos.

Assim, empregando os valores fornecidos, o tempo de polo com a máquina em operação contínua é de aproximadamente 8,3 ms. O interrogador deve, portanto, ser rápido o suficiente para que uma quantidade considerável de pontos seja coletada dentro deste intervalo de tempo, a fim de garantir uma boa resolução da distribuição do campo magnético detectado em um polo específico.

Como o módulo interrogador pode operar até 6 kHz, é possível calcular o número de pontos obtidos por polo, usando o parâmetro  $T_p$ . Como uma frequência de amostragem de 6 kHz significa que 6000 amostras serão adquiridas por segundo, o número de pontos por polo,  $n$ , é dado pela equação  $n = f_A T_p$ , onde  $f_A$  é a frequência de amostragem do módulo interrogador em Hz.

Portanto, o número de pontos por polo com uma frequência de amostragem de 6 kHz e usando o valor de tempo de polo obtido anteriormente é  $n = 50$  pontos/polo, ou seja, uma quantidade suficiente para uma boa resolução de amostragem.

#### 4.2 Software de monitoração

O software de monitoração dos polos do rotor tem a função de estabelecer a comunicação com os circuitos que realizam a aquisição de sinais e fazer o tratamento das informações coletadas, apresentando-as ao usuário através de uma interface conforme a Figura 6.

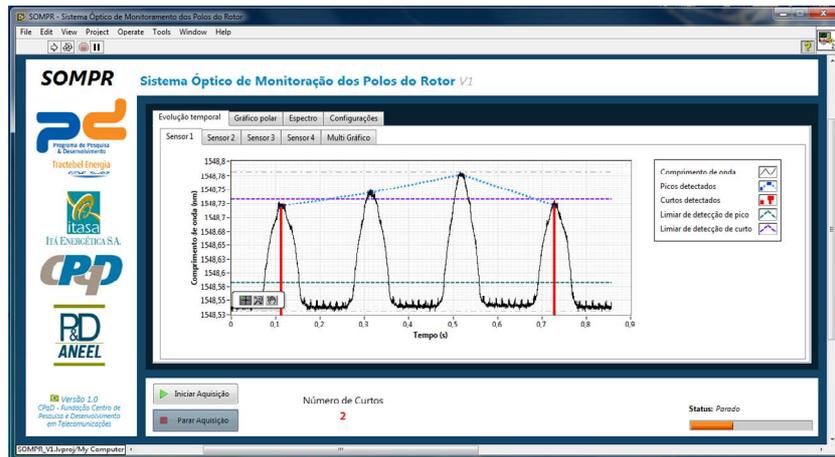


FIGURA 6 - Interface do protótipo do software de monitoração dos polos do rotor, desenvolvido em LabVIEW.

É importante destacar que a influência da temperatura sobre a grade de Bragg já apresenta uma compensação intrínseca no software, pois este trata as medições de forma relativa, ou seja, o que é considerado é o valor AC do sinal. Como o efeito da temperatura é apenas adicionar uma componente DC, sua influência não afeta a amplitude pico-a-pico que permanecerá constante. O fato de o software trabalhar com medições de forma relativa, traz também a vantagem do sistema poder detectar curto-circuito sem ter que se preocupar com o ponto de operação da máquina, ou seja, para quaisquer valores de corrente de campo.

### 5.0 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para os testes laboratoriais primeiramente foi empregado um disco de alumínio com 100 pequenos ímãs de neodímio encaixados ao longo do seu perímetro (Figura 7a). Este disco foi acoplado a uma máquina rotativa com velocidade máxima de 72 RPM. O sensor foi colocado rente à superfície lateral do disco, onde os ímãs estavam encaixados em sulcos especialmente feitos para acomodá-los. Desta maneira, o tempo de polo foi calculado com  $N_n = 72 \text{ RPM}$  e  $\text{Pol} = 100$ , chegando-se a um valor de aproximadamente 8,3 ms, que é o tempo calculado para a máquina da UHE Salto Osório. A FIGURA 6 mostra o diagrama do arranjo experimental montado para este teste e a Figura 7c mostra um trecho ampliado do gráfico obtido.

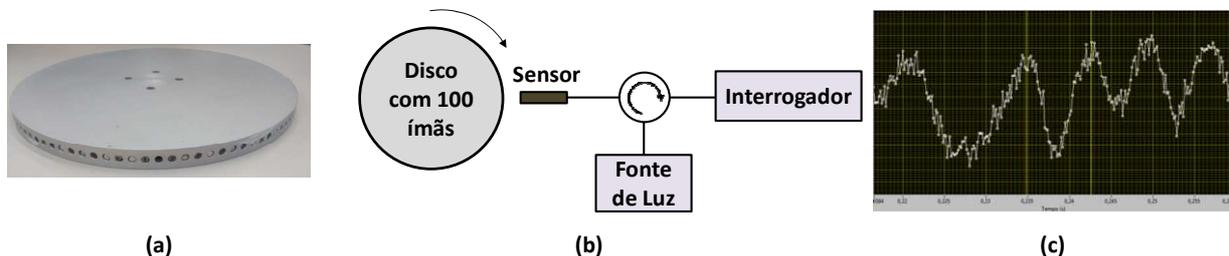


FIGURA 7 – (a) Disco com 100 ímãs, (b) diagrama do arranjo experimental e (c) gráfico obtido.

Como os ímãs utilizados possuem dimensões muito pequenas, existe uma influência significativa da sua geometria no deslocamento da grade, uma vez que suas dimensões são comparáveis à dimensão do sensor, de forma que a distribuição das linhas de campo magnético de cada ímã não pode ser considerada uniforme. Além disso, observou-se uma excentricidade do sinal obtido ao longo do tempo, indicando uma pequena descentralização do disco na máquina rotativa. Estas condições resultaram em um sinal de baixa amplitude e, portanto, ruidoso, conforme pode ser visto na Figura 7c. Mesmo com estes problemas, foi possível observar claramente a distinção entre cada polo. Medindo com a ajuda de cursores, obteve-se um tempo de polo de aproximadamente 7,7 ms. Para criar uma condição de campo mais uniforme, foi construído um solenoide (Figura 8a) onde foi aplicada uma corrente alternada de 60 Hz. Como o Terfenol-D responde igualmente independente da direção do campo magnético aplicado, o campo gerado por este solenoide corresponde a um sinal de frequência 120Hz (todos os ciclos negativos do campo são rebatidos para a parte positiva). O período do sinal detectado é então 1/120, ou seja, aproximadamente 8,3ms. Para o solenoide, o fluxo magnético calculado foi de aproximadamente 0,01 T. A Figura 8b mostra o diagrama do arranjo experimental montado para este teste e a Figura 8c mostra o gráfico obtido, onde se pode notar a regularidade entre os “polos” detectados. É possível perceber também que a quantidade de pontos por polo utilizada permite uma visualização clara da curva. Como é esperado que haja uniformidade do campo magnético dos polos da máquina a ser monitorada e que o sinal detectado terá uma alta amplitude em função da magnitude do campo magnético no entreferro (aproximadamente 1 tesla), é possível concluir que o módulo interrogador foi validado e atende todos os requisitos para a implementação em campo.

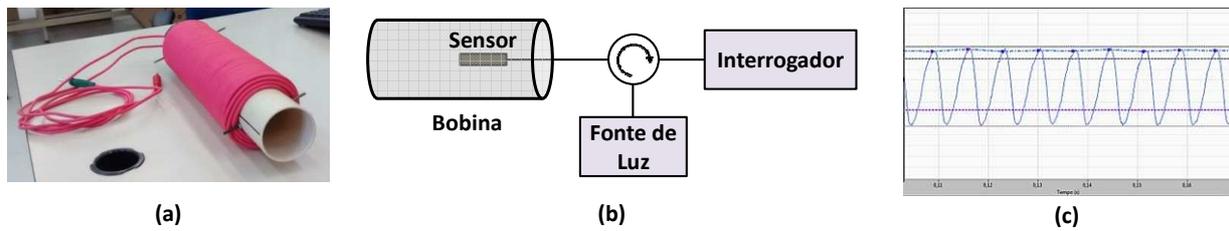


FIGURA 8 – (a) Solenoide, (b) diagrama do arranjo experimental e (c) gráfico obtido.

### 6.0 - INSTALAÇÃO E EMPACOTAMENTO MECÂNICO

O local definido para a instalação dos sensores ópticos foram os dutos de ventilação do núcleo do estator conforme as Figuras 9a e 9b. Esse local foi escolhido por permitir uma instalação simples dos sensores, demandar baixo tempo de parada da máquina, minimizar a desmontagem de partes mecânicas do gerador e evitar o uso de peças soltas. Os dutos de ventilação possuem dimensão de altura 6 mm, largura 10 mm e profundidade 306,5 mm. Protótipos do empacotamento mecânico foram fabricados e testados como mostram as Figuras 9c, 9d e 9e.

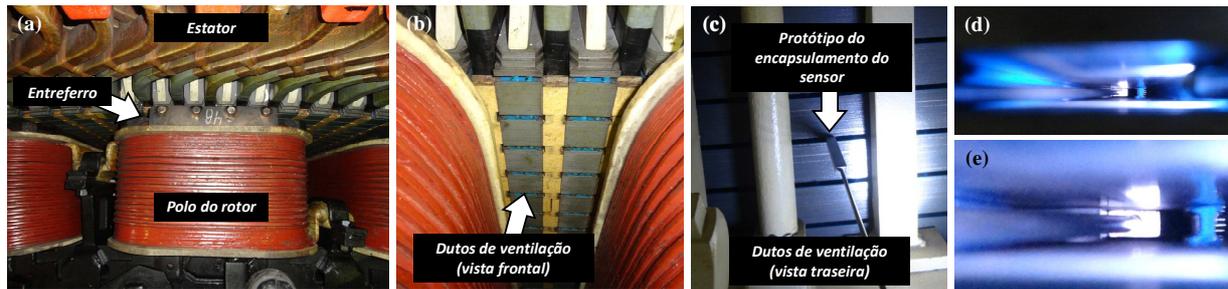


FIGURA 9 - Local de instalação dos sensores ópticos.

O empacotamento mecânico está sendo projetado na forma de uma haste para que possa ser instalado de maneira muito simples no duto de ventilação. A Figura 10a mostra o desenho de um dos protótipos já confeccionados para o teste em um laboratório de máquinas elétricas. O material utilizado nestes primeiros protótipos foi o PVC, porém para a versão final na ser instalada na UHE Salto Osório, pretende-se usar Teflon ou Poliacetal.

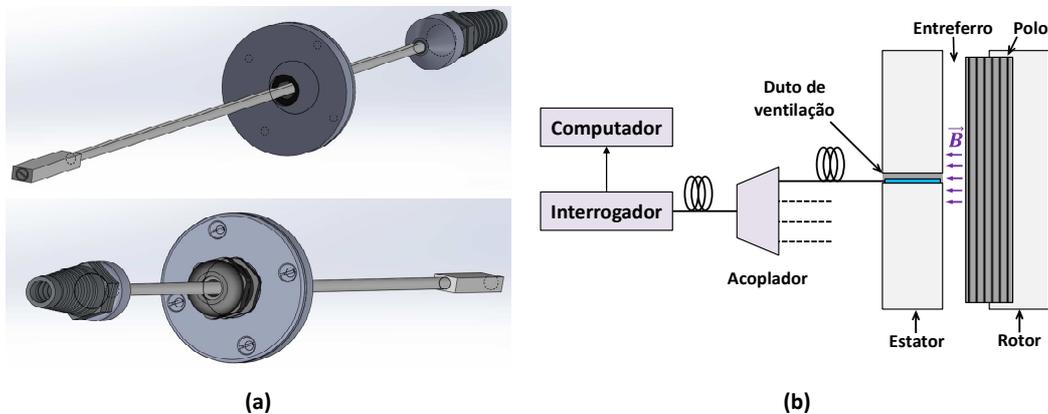


FIGURA 10 – (a) Empacotamento final do sensor óptico. (b) Arquitetura do sistema de sensoriamento

### 7.0 - ARQUITETURA DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO

A Figura 10b mostra um diagrama simplificado da arquitetura do sistema de sensoriamento. O interrogador, localizado na sala de controle da usina, emite um sinal óptico de banda larga (ASE – Amplified Spontaneous Emission) proveniente de um amplificador óptico de fibra dopada com érbio (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier) até o gerador a ser monitorado. O sinal então é dividido por meio de um acoplador em quatro outros sinais, cada um direcionado a um sensor instalado no estator. Os quatro sensores são posicionados nos dutos de ventilação do estator, em posições diferentes tanto em ângulo quanto em altura. Cada sensor é constituído por uma FBG com diferentes comprimentos de onda centrais, espaçados igualmente entre si. Desta forma, quando os quatro sinais refletidos são enviados de volta ao interrogador, é possível separar o sinal proveniente de cada FBG e monitorar simultaneamente diferentes pontos da máquina. Toda a instalação do cabeamento óptico e dos equipamentos é feita com cabos e caixas especiais resistentes à temperatura e a danos mecânicos, de forma a aumentar a robustez e confiabilidade do sistema de monitoramento. Além disso, o uso de múltiplos sensores proporciona maior segurança quanto a eventuais falhas dos elementos, garantindo que a monitoração não seja interrompida.

O interrogador é conectado a um computador via interface USB, onde o software de sensoriamento realiza a coleta, tratamento e interpretação dos dados. Apesar de neste caso termos quatro sensores instalados, é possível aumentar a quantidade de sensores com o uso de acopladores com mais portas. Por fim, o sistema é sincronizado com um sinal de trigger já existente no hidrogenador, para que cada polo monitorado possa ser identificado. Assim, quando houver um curto-circuito, o sistema de monitoração de polos do rotor indica em qual polo a falha ocorreu.

## 8.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados preliminares do desenvolvimento de um sensor óptico para monitoração do campo magnético produzido pelos polos do rotor visando à detecção de espiras em curto-circuito.

A escolha dos dutos de ventilação do núcleo do estator como local de instalação dos sensores vai permitir uma instalação simples, demandar baixo tempo de parada da máquina, minimizar a desmontagem de partes mecânicas do gerador e evitar o uso de peças soltas. Em razão de a tecnologia óptica possibilitar a fabricação de sensores bem compactos foi possível superar o desafio das reduzidas dimensões para instalação dos sensores nos dutos de ventilação (5 mm x 8 mm).

Os testes realizados nos laboratórios do CPqD puderam validar o sistema de monitoração no aspecto de tempo de resposta e sensibilidade do sensor. A próxima etapa consiste nos testes agendados para o segundo trimestre de 2015 em um laboratório de máquinas elétricas de uma universidade e devem trazer ricas informações a respeito do comportamento do sistema em um ambiente mais próximo ao do que será encontrado na instalação em campo na UHE Salto Osório.

Após a instalação em campo abre-se a possibilidade da aplicação do sistema em outras usinas, além do ganho de novos conhecimentos por parte da equipe técnica da Tractebel a respeito da problemática de curto-circuito nos polos do rotor, uma vez que atualmente a empresa não dispõe de um sistema de monitoração para esse fim.

## 9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014 ano base 2013, Empresa de Pesquisa Energética – EPE. <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>. Acessado em 27/01/2015.
- (2) C D. J. Albright, and D. R. Albright, "Generator Field Winding Shorted Turns: Observed Conditions and Causes," Advanced Generator Maintenance Technology Seminar.
- (3) D. R. Albright, D. J. Albright, and J. D. Albright, "Generator field winding shorted turn detection technology".
- (4) D. R. Albright, D. J. Albright, and J. D. Albright, "Flux Probes Provide On-Line Detection of Generator Shorted Turns," Power Engineering magazine, 1999.
- (5) <http://www.generatortech.com/cases.html>. Acessado em 27/01/2015.
- (6) Alexandre Pires Araújo, "Estudo de técnicas de detecção e diagnóstico de falhas em geradores síncronos," Projeto de Diplomação, UFRS, 2011.
- (7) Trutt, F.C.; Sottile, J.; Kohler, J.L., "Detection of AC machine winding deterioration using electrically excited vibrations," IEEE Transactions on Industry Applications Society, vol.37, no.1, pp.10,14, Jan/Feb 2001.
- (8) Penman, J.; Jiang, H., "The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous generators by analysing excitation current harmonics", Opportunities and Advances in International Electric Power Generation, International Conference on (Conf. Publ. No. 419), vol., no., pp.137,142, 18-20 Mar 1996.
- (9) Kulkarni, A.S.; El-Sharkawi, M.A.; Marks, R.J., II; Andexler, G.; Jian Xing; Kerszenbaum, I., "Development of a technique for on-line detection of shorts in field windings of turbine-generator rotors: circuit design and testing," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol.15, no.1, pp.8,13, Mar 2000.
- (10) Etrema Products Inc., "Terfenol-D Datasheet". Disponível em: <http://www.etrema.com/documents/Terfenol.pdf>. Acessado em 27/01/2015.

## 1.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**João Paulo Vicentini Fracarolli** nasceu em Itápolis, SP em 1989. Possui graduação em Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica pela USP (São Carlos, 2013). Desde 2013 trabalha no CPqD, atuando nas áreas de sensoriamento óptico, instrumentação eletrônica e microprocessadores.



**Claudio Florida** nasceu em Ancona, Itália, em 1971. Possui doutorado em Física pela UFPE (Recife, 2003). Desde 2005 é pesquisador do CPqD. Suas linhas de pesquisa compreendem: polarização em fibras ópticas, monitoramento de desempenho em sistemas de telecomunicações e sistemas e sensores de fibra óptica, como FBG, sensoriamento distribuído, sensores de corrente a fibra óptica, dentre outros.



**João Batista Rosolem** nasceu em Fartura, SP em 1963. Concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica pela USP (São Carlos, 2005). Atualmente é pesquisador do CPqD. De 1988 a 2011 coordenou equipes de P&D de sistemas de comunicações ópticas. De 2005 até o momento coordena equipes de P&D de sistemas de sensoriamento por fibra óptica com ênfase em aplicações no setor elétrico, do petróleo e de gás. É coordenador do Laboratório de Sensoriamento e Monitoração Óptica do CPqD. Suas áreas de atuação em sensoriamento são: dispositivos de fibras ópticas, sensores de fibra óptica.



**Ariovaldo Antonio Leonardi** nasceu em Campinas, SP em 1963. Possui graduação em Eletrônica Industrial pela UNISAL (Campinas, 2001). Tem experiência na área de telecomunicações. Atualmente é analista de desenvolvimento tecnológico no CPqD. Atua em projetos de monitoramento empregando sensores óticos, nos setores de energia, refinarias, barragens e estruturas.



**Rivaldo Strobel Penze** nasceu em Bandeirantes, MS em 1973. Possui mestrado em Engenharia Elétrica pela Unicamp (Campinas, 2002). Desde 2002 é pesquisador no CPqD. Atua no desenvolvimento de redes de acesso, sensores a fibra óptica e sistemas de informação geográfica (GIS).



**Elias Kento Tomiyama** nasceu em Indaiatuba, SP em 1981. Possui mestrado em Engenharia Elétrica pela Unicamp (Campinas, 2012). Desde 2012 atua no CPqD em projetos de sensores a fibra óptica aplicados a Sistemas de Energia Elétrica e de soluções em tecnologia e monitoramento ópticos.



**Rodrigo Peres** nasceu em São Paulo, SP em 1983. Possui graduação em Engenharia Física pela UFSCar (São Carlos, 2011). Desde 2012 atua no CPqD 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, também é um dos responsáveis pelos ensaios ópticos no laboratório de homologação de cabos ópticos.



**Danilo Cesar Dini** nasceu em Bueno Brandão, MG em 1956. Possui mestrado em Engenharia Elétrica pela Unicamp (Campinas, 1988). Atualmente é pesquisador no CPqD. Tem experiência na área de Comunicações Ópticas e presta consultoria em caracterização de redes ópticas metropolitanas e de longa distância. Tem atuado em P&D para o Setor Elétrico em projetos de sensores ópticos para o monitoramento e supervisão de linhas de transmissão, subestações e em barragens de usinas hidrelétricas.



**Claudio Antônio Hortêncio** nasceu em Caconde, SP em 1961. Possui graduação em Tecnologia em Eletrônica Industrial pela Universidade Salesiana (Campinas, 2001). É Pesquisador de Telecomunicações da Fundação CPqD desde 1984, atuando no desenvolvimento de dispositivos e acessórios para a rede externa de telecomunicações. Atualmente é responsável técnico de ensaios em conectores e divisores ópticos e desenvolve trabalhos de pesquisa e coordenação de projetos na área de sensores ópticos.



**Paulo Ivã Gonçalves Dilli** nasceu em Pelotas, RS em 1958. Possui formação Nível Técnico em Eletrotécnica pelo CEFET (Pelotas, 1978). Atualmente trabalha como Especialista de Manutenção Elétrica no departamento de Engenharia da Tractebel Energia - Usina Hidrelétrica Salto Santiago (Saudade do Iguaçu/PR) e Salto Osório (Quedas do Iguaçu, PR).



**Erlon Vagner da Silva** nasceu em Salto do Lontra, PR em 1981. Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela FAG, (Cascavel, 2012). Atualmente trabalha com Manutenção Elétrica na Tractebel Energia - Usina Hidrelétrica Salto Santiago (Saudade do Iguaçu/PR) e Salto Osório (Quedas do Iguaçu, PR).



**Marcéu Couto dos Santos** nasceu em Medianeira, PR em 1981. Possui graduação em Engenharia Mecânica pela FAG (Cascavel, 2014). Atualmente trabalha com Manutenção Mecânica na Tractebel Energia - Usina Hidrelétrica Salto Osório (Quedas do Iguaçu, PR).