



**SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH 19
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH

SISTEMA ÓPTICO PARA MONITORAMENTO DE ENTREFERRO EM HIDROGERADORES

**Eduardo Shigueo Yugue* Victor Peyneau Gomes* Fernando Luiz Maciel* José Luiz da Silva Neto*
Cesar Cosenza de Carvalho* Sergio Ferreira Campos^A Marcelo Martins Werneck***

***COPPE – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
^AFURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA**

RESUMO

O "air gap" entre o rotor e o estator é o coração da unidade geradora, pois é o local onde a energia mecânica é convertida em energia elétrica. A dinâmica do entreferro é um importante parâmetro que revela fadigas e esforços estruturais, sumarizando o efeito de várias forças internas e externas interagindo com o hidrogerador, forças essas de origem hidráulica, centrífuga, magnética, térmica e geotécnica.

Este trabalho pretende mostrar uma nova técnica de monitoramento de entreferro por tecnologia fotônica, usando um sistema de aquisição de imagens sincronizado com o rotor do hidrogerador. Essas imagens processadas identificarão possíveis pontos críticos para diagnósticos de manutenção.

PALAVRAS-CHAVE

Entreferro, Hidrogerador, Fotônica, Imagem, Monitoramento.

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma eventual deformação do entreferro pode ser provocada pela interação entre um vetor de força de balanceamento dinâmico apontando para um lado e um vetor de balanceamento magnético para outro. Essa deformação dinâmica pode causar fadiga nas bobinas do rotor e do estator, superaquecimentos localizados, desbalanços consideráveis na parte girante da unidade geradora e outros problemas que diminuem a eficiência e levam a um envelhecimento precoce, ao mesmo tempo em que aumentam os custos de manutenção.

O monitoramento do entreferro tem o intuito de diagnosticar a deformação do estator e do rotor antes de alcançar valores críticos. Com entreferro estreitos, o rotor é fortemente atraído por um campo magnético cada vez maior (variação quadrática) devido à proximidade com o estator, evoluindo para um roçamento dos pólos no estator provocando, na grande maioria das vezes, a perda total do ferro e bobinas do estator e dos pólos do rotor, com altíssimos custos de reparo e, principalmente, de 6 a 8 meses de unidade indisponível para a operação.

De acordo com o "Guide for Applications of Plant Monitoring for Hydroelectric Facilities" (1) há um potencial benefício no custo quando se monitora a condição do hidrogerador, alguns deles tangíveis que podem ser medidos dependendo das circunstâncias individuais envolvidas, como por exemplo, a redução na frequência de inspeção, a redução na frequência de manutenção, a redução do tempo de reparo, o incremento no tempo de geração, a segurança proporcionada ao equipamento.

Usando tecnologia fotônica por imagem, pretendemos ter um total isolamento entre o lugar da medida e o lugar do monitoramento com a minimização da interferência eletromagnética do hidrogerador. Será fixado num ponto do estator uma câmera linear com 2048 pontos para capturar imagens ao longo de toda rotação do rotor, a partir dela será possível detectar as bordas do estator e do rotor identificando o tamanho do entreferro, neste ponto fixo.

(*) Centro de Tecnologia – Bloco I2000 sl 036 – Ilha do Fundão – CEP 21941-972 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2562-8200 – Fax: (+55 21) 2562-8202 – Email: shigueo@lif.coppe.ufrj.br

Outra câmera a 90° graus deve ser instalada para medir o deslocamento do entreferro em outro eixo. Neste trabalho será apresentado apenas os dados de uma câmera como validação do sistema.

2.0 - DESCRIÇÃO

Foram utilizados neste sistema de medição por imagem uma câmera linear, um computador portátil, uma lâmpada estroboscópica e um circuito de sincronização como mostra a Figura 1.

A câmera digital, LW-SLIS-2048-1394 da Imaging Solutions Group, foi escolhida por possuir uma série de características necessárias para a aquisição de imagens sincronizadas. Possui um barramento Firewire (2), também chamado de IEEE1394a, para a conexão com o computador, este barramento aceita transferência de até 400Mbits/s. O sensor linear óptico possui 2048 pontos com um comprimento total de 14,3 mm. As imagens podem ser capturadas a uma velocidade de aquisição de 27K linhas por segundo com um armazenamento de memória de 16 MBytes. Seu sincronismo pode ser programado como interno ou externo, outros controles como tempo de integração, ajustes de ganhos, offset e comprimento de profundidade de brilho também podem ser configurados por software.

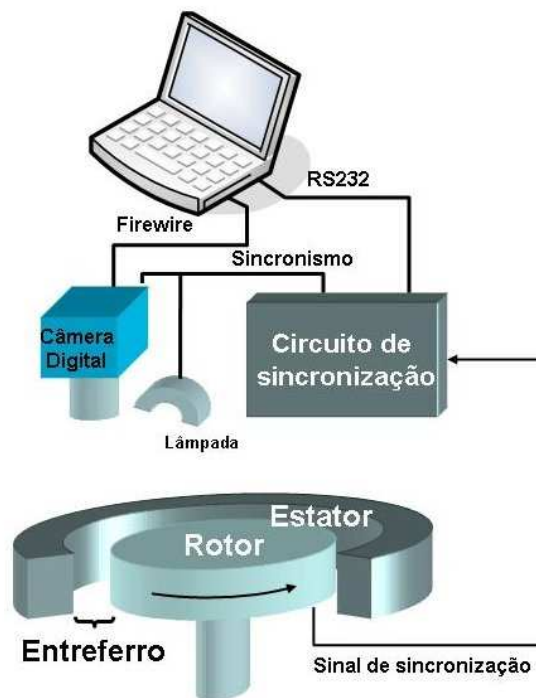


FIGURA 1 – Diagrama do sistema de monitoramento.

Foi tomado como base nesse estudo um hidrogenador que opera a 150 rpm, com raio de 4,485 m. Convertendo a velocidade para frequência o rotor gira a 2,5Hz. Foi instalado um sensor de passagem para gerar um sinal de sincronização para o sistema. Um pulso é emitido sempre que completar uma volta.

Está sendo usado nesse sistema um conjunto estroboscópico Icel modelo TC-5060 para medir velocidade de rotação de motores e principalmente para iluminar um ponto fixo entre o estator e o rotor, como mostra a Figura 1. Esse medidor estroboscópico é capaz piscar sua lâmpada de xenon a uma frequência de até 200Hz. O circuito da lâmpada estroboscópica possui uma entrada de controle de disparo externa permitindo sua sincronização com a câmera linear.

O circuito microprocessado de sincronização foi desenvolvido para atrasar o sinal de sincronismo do rotor, permitindo uma programação variável no tempo de atraso do disparo de sincronismo para a câmera digital e para a lâmpada estroboscópica. A programação do atraso pode ser realizada com uma resolução de um milissegundo variando de 0 até 255 milissegundos. O circuito possui uma interface de comunicação serial padrão RS232 para conexão com o microcomputador.

O entreferro é definido como o espaço de ar entre o rotor e o estator, que pode variar de 12 a 25 mm dependendo das dimensões do hidrogenador. Quando as bobinas do estator estão em operação elas trabalham a 15000 Volts, o ar apresenta um isolamento elétrico de 1000V/cm, a intenção é instalar o conjunto óptico a 75 cm acima do estator para garantir o isolamento dos equipamentos, todos os ensaios foram realizados a esta distância.

3.0 - METODOLOGIA

O sistema de medida óptico pretende caracterizar o tamanho do entreferro, em um ponto fixo do hidrogerador, usando equipamentos de captura de imagens sincronizada com a posição do rotor e com uma iluminação estroboscópica.

Na Figura 2 são apresentados 4 esquemáticos de estados possíveis de um hidrogerador. A Figura 2(a) apresenta um hidrogerador em estado normal que deve ter um estator circular com um rotor centralizado e circular, os outros esquemáticos apresentam o desenho de possíveis defeitos que em determinados níveis devem levar um hidrogerador para uma manutenção corretiva. O intuito desse trabalho é detectar e diagnosticar possíveis falhas que possam danificar a operação do rotor.

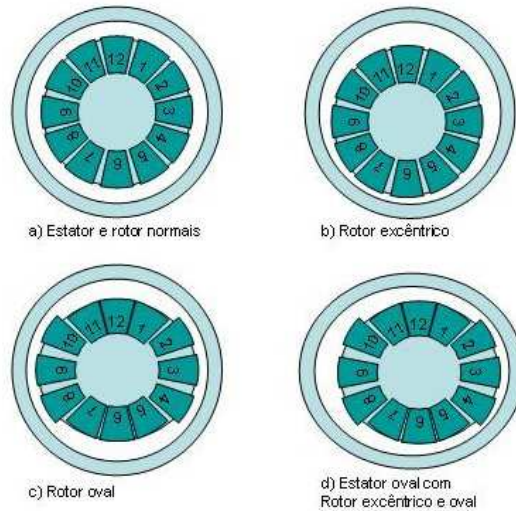


FIGURA 2. Alguns defeitos apresentados em hidrogeradores.

O ponto mais próximo entre o rotor e o estator é o centro dos pólos. Na Figura 2 cada esquemático representa um hidrogerador com 12 pólos, dependendo dos ajustes e das interações das forças mecânicas e eletromagnéticas o rotor e o estator podem se deformar. Na Figura 2 são mostrados três defeitos básicos: quando o rotor sai do centro de rotação dizemos que ele está excêntrico; quando o rotor por interações de diversas forças se deforma apresenta uma aparência oval; o estator também pode apresentar uma deformação aproximando perigosamente das paredes do rotor. Esse conjunto de problemas pode interferir na vida útil de um hidrogerador.

O intuito desse trabalho é medir o entreferro utilizando uma técnica de reconhecimento por imagem. Cada imagem, mostrada na Figura 3, corresponderá a uma medida em um ponto do rotor com o estator. A câmera fixará a imagem em um ponto do estator e irá monitorar os pontos críticos do rotor. Apenas os pontos mais próximos da passagem do centro dos pólos serão adquiridos. Este equipamento não dará um completo diagnóstico sobre o estator, mas fornecerá muitos dados sobre o estado do rotor.

Todos os testes em laboratório com os equipamentos ópticos foram realizados numa bancada óptica de granito. Foi desenvolvida uma jiga de teste para simular o entreferro, para isso foi construído um disco de 70 cm de raio em PVC, ficando fixo ao eixo de um motor trifásico de 1 CV da WEG, controlado por um inversor de frequência WEG. O disco alcançou uma velocidade de rotação de 2600 rpm. Um sensor óptico de passagem foi instalado para fornecer um sinal elétrico de sincronismo.

Foram adquiridas algumas imagens de um objeto padrão com 18,9 mm de largura a uma distância fixa de 740 mm do conjunto óptico. O objeto foi preso a jiga simulando um entreferro constante para ser usado como referência para calibração do sistema de medição.



FIGURA 3. Parte da imagem com 6 linhas adquiridas.

A câmera foi configurada para adquirir uma imagem com 2048 x 6 pontos, sincronizada com o acionamento da luz estroboscópica. O responsável pelo acionamento no tempo correto da aquisição é o circuito de sincronização a partir do sinal recebido do sensor óptico de passagem. O tempo de atraso do disparo é programado no circuito de sincronização por uma interface RS232.

A Figura 3, mostra parte de uma imagem capturada com 6 linhas horizontais. Não foi mostrada a imagem completa por apresentar um tamanho de 2048 pontos de comprimento, que atrapalharia a visualização das linhas. Na Figura A é possível observar que a segunda linha de cima para baixo é clara ao contrário das demais. Isso aconteceu devido ao sincronismo no acionamento da lâmpada estroboscópica com a captura da imagem. Apenas uma linha na imagem pode ser iluminada por disparo da lâmpada. As outras linhas são desprezadas no cálculo do entreferro.

Foi desenvolvido um programa de automatização para configurar a câmera, capturar a imagem, processar o sinal, calcular o entreferro, e programar o tempo de atraso do circuito de sincronização. Com isso é possível escolher o número de aquisições necessárias e calcular a média para um mesmo ponto, salvando todos os dados num arquivo.

A intenção não é varrer o entreferro em todo perímetro do rotor, mas apenas nos pontos críticos onde o rotor está mais próximo do estator. Esses pontos estão geralmente próximos da passagem dos centros dos pólos. Por exemplo, se uma máquina tiver 48 pólos serão medidos pelo menos 48 pontos do rotor, sempre buscando os centros dos pólos.

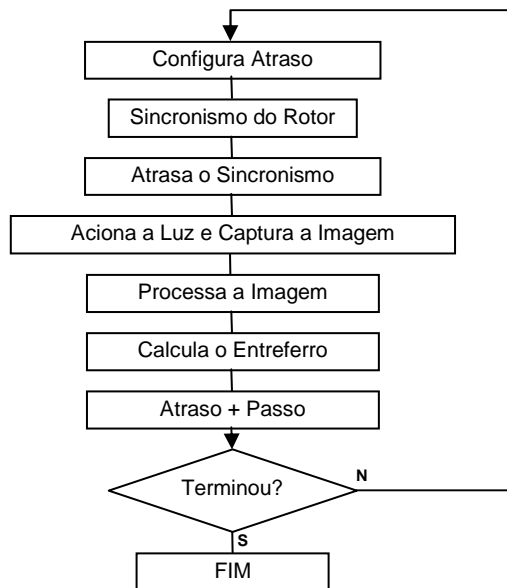


FIGURA 4. Fluxograma lógico da aquisição.

O diagrama lógico da aquisição de imagem é apresentado na Figura 4. Configura-se o atraso no circuito de sincronização pela interface RS232, espera-se o pulso de sincronismo do rotor e envia o sinal atrasado para a captura e acionamento da luz estroboscópica. A imagem é processada identificando-se a linha iluminada, separando-se os valores da intensidade recebida dessa linha em uma variável. No gráfico da Figura 5 é mostrado a intensidade de brilho no eixo y e o pixel correspondente no eixo x, ficando muito perceptível as bordas iluminadas com bastante intensidade luminosa e o entreferro caracterizado pelo poço de valores baixos. Identificando-se a posição das duas bordas o entreferro pode ser definido.

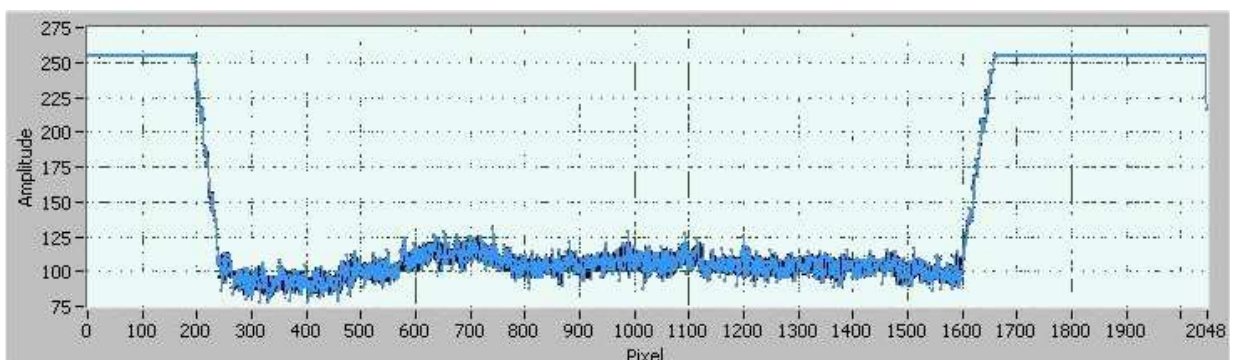


FIGURA 5. Gráfico da intensidade versus pixel de uma linha iluminada pela luz estroboscópica.

Para medir o entreferro em outro ponto do rotor basta alterar o valor do atraso e repetir todo o processo novamente. O número de pontos medido no rotor pode ser configurado pelo operador. O atraso pode ser programado com passo mínimo de um mili segundo.

4.0 - RESULTADOS PRELIMINARES

Foi desenvolvido um programa para aquisição de imagens e calcular o entreferro. Para isso foi necessária uma amostra padrão, que ficou a mesma distância da jiga de teste, com um tamanho definido de 18,79 mm confirmado com paquímetro digital de resolução de 0,01mm. A imagem capturada da amostra foi usada como padrão para a relação de resolução, metros por ponto, do sistema de medição por imagem.

TABELA 1. Valores de incertezas em milímetros.

Número de médias	Incerteza B	Incerteza C	Incerteza D
50	0,71	0,23	0,28
100	0,47	0,096	0,079
200	0,30	0,076	0,060
400	0,047	0,083	0,052

Foram adquiridas várias imagens desse objeto com diferentes parâmetros de configuração. A Tabela 1 mostra os cálculos da incerteza tipo A (3) para condições B, C e D para um nível de confiança de 95,45%. A Tabela 2 mostra as diferentes condições de aquisição das imagens. A coluna dois indica o limiar de brilho para a detecção da borda, que pode variar de 0 a 255 níveis. O nível máximo depende da cor da borda e da intensidade de luz incidente no objeto. O nível mais baixo corresponde ao entreferro. A escolha de um bom limiar influenciará no resultado final do cálculo. Para um limiar de 150 a velocidade de aquisição pouco influenciou no cálculo da incerteza. A coluna da frequência corresponde a velocidade de rotação da jiga de teste, foram realizadas duas velocidades, observou-se que o aumento na frequência não interferiu significativamente no valor da incerteza, para valores de médias superiores a 100 aquisições.

TABELA2. Condições de medidas.

Condição	Limiar (0~255 níveis)	Frequência (Hz)
B	180	3,00
C	150	3,00
D	150	8,90

Foi observada uma pequena influência na incerteza para amostragens maiores que 100, mas uma grande dependência em relação à escolha correta do limiar do brilho. A luz estroboscópica apresenta uma pequena variação de intensidade no brilho, provocando uma variação na qualidade da imagem adquirida. Foi notado que algumas imagens possuíam um nível máximo de brilho muito baixo (menor que 180). Isso explica o fato da incerteza da curva B, mostrado na Figura 6, ser bem maior que as demais. Novos circuitos de excitação da lâmpada estroboscópica deverão ser desenvolvidos para garantir a uniformidade na intensidade do brilho luminoso.

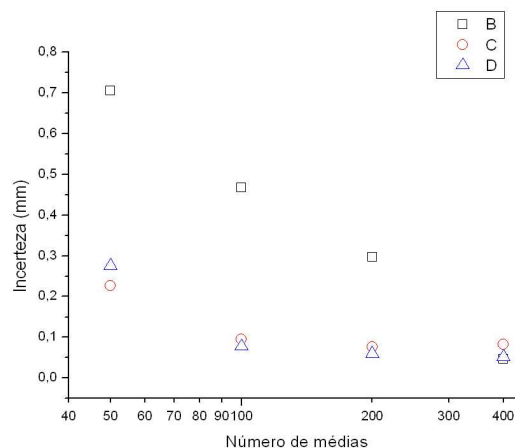


FIGURA 6. Gráfico da incerteza para diversas médias

5.0 - CONCLUSÃO

O sistema óptico para o monitoramento de entreferro em hidrogeradores é uma forma inovadora para permitir um diagnóstico mais preciso sobre o estado das máquinas. É um sistema de monitoramento não invasivo, permitindo medidas com o gerador em operação.

Os testes em bancadas preliminares mostraram uma incerteza mínima de 47 μm , possibilitando traçar linhas de tendência na operação da máquina, estabelecendo um limite mais preciso nas datas de manutenção, diminuindo os custos de conservação e maximizando o tempo de operação do gerador.

A técnica de medição por imagem é largamente conhecida na indústria, desenvolver novas aplicações usando esta tecnologia pode contribuir no desenvolvimento industrial de um país.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Potencial Costs Benefits of Plant Condition Monitoring – Guide for Applications of Plant Monitoring for Hydroelectric Facilities – IEEE P1438, Draft 1.5, January 1999.

(2) PC: Um Guia Prático de Hardware e Interfacemento – Ricardo Zelenovsky, Alexandre Mendonça – Mz Editora – 3ª Edição, pg 851-859, 2002.

(3) Metrologia e Incerteza de Medição – Alexandre Mendes e Pedro Paulo Rosário – Editora Epse, 2005.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Eduardo Shigueo Yague
Nascido no Goioerê, PR em 06 de fevereiro de 1969.
Graduação (1995) em Engenharia Elétrica: CEFET - Rio de Janeiro
Empresa: COPPE/UFRJ
Gerente de Projeto

Victor Peyneau Gomes
Graduação em Engenharia Elétrica: UFRJ
Empresa: Eletronuclear
Engenheiro Elétrico

Fernando Luis Maciel
Graduação em Engenharia Eletrônica: UFRJ
Empresa: COPPE/UFRJ
Engenheiro de Pesquisa

José Luiz da Silva Neto
PhD Engenharia Elétrica pela Université Laval (1999)
Empresa: COPPE/UFRJ
Engenheiro de Pesquisa

Cesar Cosenza de Carvalho
DSc Engenharia Biomédica – COPPE/UFRJ (2000)
Empresa: COPPE/UFRJ
Coordenador de Tecnologia e Pesquisa

Sergio Ferreira Campos
FURNAS Centrais Elétricas
Engenheiro da Divisão de Estudos da Transmissão do Departamento de Planejamento de Transmissão

Marcelo Martins Werneck
PhD Engenharia Biomédica pela University of Sussex (1984)
Empresa: COPPE/UFRJ
Coordenador Geral