



GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE MICRODEFORMAÇÃO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO EM UNIDADES HIDROGERADORAS.

**ANDRÉ LUÍS COSTA FRANÇA(1);ANGELO TORRES MADUREIRA(2);FREDERICO RODOLFO PARENTE
DOERNER(2)
ELETRONORTE ELETROBRÁS(1);ELETROBRAS ELETRONORTE(2)**

RESUMO

Unidades hidrogeradoras possuem sistemas que são constantemente submetidos a esforços mecânicos. Através de medições da microdeformação nas peças desses sistemas, é possível conhecer os esforços mecânicos envolvidos. Os dados medidos podem fundamentar alterações de parâmetros operacionais destas unidades e suas semelhantes, como por exemplo otimização da rampa de partida da unidade, além de gerar diagnósticos de condições operativas que podem levar a fadiga precoce destes sistemas. Esses dados permitem uma gestão dos ativos da geração hidráulica mais eficaz, otimizando a operação dessas unidades e permitindo tomadas de decisão de manutenção mais precisas, contribuindo para a maximização da disponibilidade da função geração.

PALAVRAS-CHAVE

Microdeformação, Ensaios Mecânicos, Hidrogeradores, Extensômetros, Manutenção Preditiva.

1.0 INTRODUÇÃO

Em 2011, em função da necessidade do diagnóstico das causas de rompimento inesperados de pinos de cisalhamento no sistema de movimentação do distribuidor de uma unidade geradora de 22,5MW, surgiu a ideia de realizar medições dos esforços mecânicos no sistema, com a finalidade de determinar a razão dessas quebras e, baseado nas medições realizadas, propor uma solução de engenharia para solucionar o problema. Dessa maneira começou a experiência da Eletrobras Eletronorte de medições de microdeformações como ferramenta de diagnóstico para manutenção de unidades hidrogeradoras.

Este primeiro ensaio possibilitou que a engenharia da empresa elaborasse um projeto de redimensionamento de algumas peças do sistema de movimentação do distribuidor da unidade, utilizando as microdeformações medidas para calcular as forças envolvidas em cada ponto medido. De posse desses valores de força, foi possível desenvolver projetos de novas peças, com capacidade de suportar tais esforços sem colocar em risco a operação da unidade. Este novo sistema foi comissionado em fábrica e, após instalado na unidade geradora, um novo ensaio com a mesma configuração de sensores foi realizado, a fim de comissionar o novo sistema, visando certificar que os esforços medidos eram compatíveis com os esforços esperados quando calculados na fase de projeto.

Como a aplicação da metodologia de medição de microdeformações obteve sucesso na solução do problema acima citado, ensaios semelhantes passaram a ser realizados em diversas outras unidades hidrogeradoras de potências e instalações diferentes, buscando desde diagnósticos de outras falhas ocorridas até a otimização de condições operativas das mesmas, sempre com sucesso na obtenção desses dados que subsidiaram diversas tomadas de decisões de manutenção, redimensionamento e novas parametrizações de sistemas de controle dessas unidades. Entretanto a obtenção do sucesso na aquisição desses dados não é trivial. A execução deste tipo de ensaio apresenta inúmeras dificuldades que afetam a confiabilidade dos dados medidos, dentre as quais pode-se destacar como as mais significativas:

- a quantidade de sensores necessários para o correto diagnóstico, principalmente os extensômetros, que podem ultrapassar 100 sensores;
- as longas distâncias do cabeamento, que ocasionalmente chegam a até 40m de distância, o que afeta diretamente a qualidade da medição, principalmente dos extensômetros; e
- as condições de instalação dos extensômetros, que pode interferir de maneira severa tanto no momento de preparação da superfície e instalação do extensômetro, quanto durante as medições, quando alguns sensores podem ficar inclusive submersos, o que sem nenhuma proteção inviabilizaria a medição;
- Além de extensômetros, outros sensores são utilizados nos ensaios, assim como de informações de processo provenientes de outros sistemas da unidade geradora sob ensaio. A extração desses dados de outros sistemas deve ser realizada numa única base de tempo para permitir uma análise adequada dos dados.

Este trabalho visa compartilhar a experiência da equipe da Eletronorte na execução destes ensaios, indicando as soluções propostas para contornar cada uma dessas dificuldades, mostrar como os resultados desses ensaios podem contribuir para eficiência operativa de uma usina hidrelétrica bem como indicar outras aplicações dessa metodologia para diagnósticos de outros componentes de usinas Hidrelétricas.

2.0 MEDIÇÕES DE MICRODEFORMAÇÕES

Para que se entenda o que se trata os ensaios de Microdeformação, faz-se necessário uma breve contextualização da teoria, conceitos e princípio de medição envolvidos em medições de microdeformação.

2.1 EXTENSÔMETROS

O extensômetro é um sensor capaz de medir a deformação mecânica em uma peça. Ele deve ser instalado de forma que ele sofra a mesma microdeformação, normalmente medida em $\mu\text{m}/\text{m}$, que a peça sofre quando submetida a algum esforço. Dessa maneira, é possível correlacionar essa deformação medida pelo extensômetro com forças e tensões mecânicas aplicadas na peça.

O tipo de extensômetro de uso mais comum é basicamente composto por um condutor elétrico que, quando submetido a algum esforço mecânico, varia de maneira conhecida sua resistência elétrica. Essa variação ocorre em parte pela deformação de seu comprimento e seção transversal desse condutor (2ª lei de Ohm), parte pela variação da resistividade do material. Os extensômetros são construídos de forma a ser possível correlacionar a variação da resistência elétrica com o esforço mecânico que provocou esta variação. Dessa maneira, basta medir a variação da resistência elétrica do sensor para que seja possível determinar a Microdeformação à qual ele está submetido, e por sua vez a microdeformação na peça onde este foi instalado.

A Figura 01 mostra o princípio de funcionamento de um extensômetro.



Figura 01

Quanto à configuração de posição, os extensômetros podem ter diversas configurações, como por exemplo os uniaxiais (mede deformação num único eixo) ou rosetas, que são dois ou mais extensômetros fabricados num único invólucro e com ângulos bem definidos entre eles. Esta configuração de extensômetros permite que sejam feitos cálculos para determinar o estado de tensão (com direção e módulo) no ponto medido. Esta informação é importante para entender a distribuição de forças em mecanismos, especialmente os mais complexos. A Figura 02 mostra alguns tipos comuns de configurações de extensômetros tipo roseta.

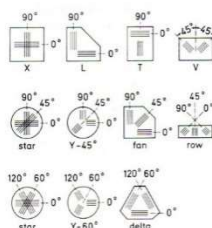


Figura 02

A Figura 03 mostra os tipos de extensômetros utilizados nos ensaios realizados até então na Eletrobras Eletronorte.

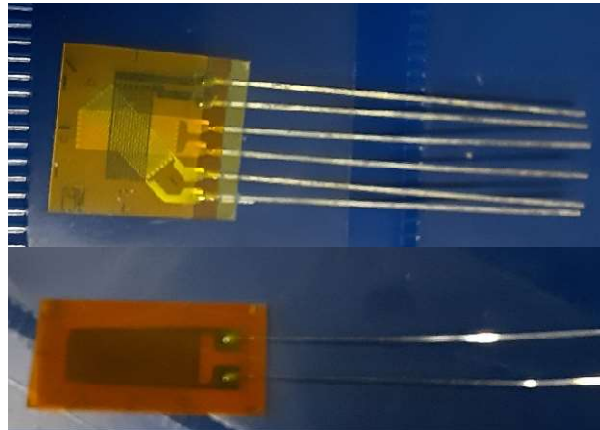


Figura 03

2.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Uma característica das medições com extensômetros é que as variações típicas de das resistências elétricas são muito pequenas para que possam ser medidas de maneira adequada com multímetros ou equipamentos similares. Faz-se necessário o uso de circuitos capazes de medir essas pequenas variações. O arranjo que é largamente utilizado pra esse tipo de medição são os circuitos em pontes, e especificamente nesse caso a ponte de Wheatstone. Este arranjo permite realizar medições de pequenas variações de resistência medindo-se a tensão entre dois pontos da ponte. Dependendo do arranjo da instalação, a variação da resistência do extensômetro pode ser calculado em função da variação da tensão entre estes dois pontos, conforme pode ser visto na Figura 04, que mostra um exemplo de uma utilizada para medição de um extensômetro

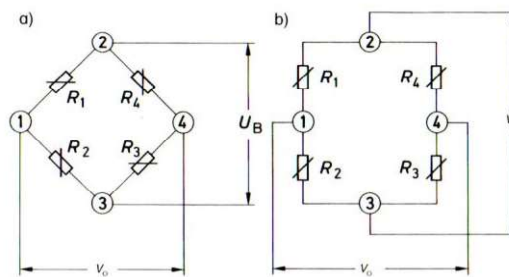


Figura 04

Como a ponte é composta por 4 elementos resistivos, o extensômetro pode ser instalado em um braço da ponte (arranjo conhecido como $\frac{1}{4}$ de ponte), dois braços (arranjo conhecido como $\frac{1}{2}$ ponte) ou nos quatro braços da ponte (arranjo conhecido como ponte completa). A combinação entre a posição de onde os extensômetros são colocados na peça com a posição dos mesmos no arranjo de ponte permite se amplificar a microdeformação que se deseja medir, eliminar efeitos indesejados (como o da temperatura), ou eliminar uma eventual microdeformação associada a um esforço que não se deseja medir. A Figura 05 mostra os arranjos possíveis e como eles deve ser conectados nos circuitos de medição.

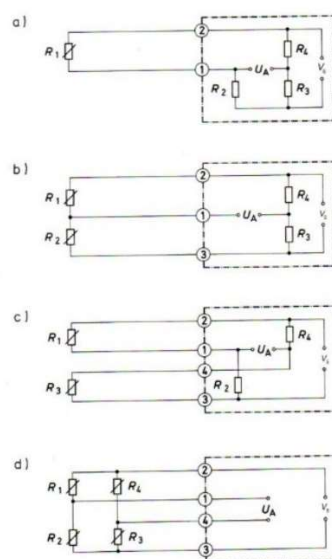


Figura 05

3.0 TÉCNICAS DE INSTALAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

A instalação dos extensômetros é parte crucial para a confiabilidade das medições realizadas. Detalhes como o adequado preparo da superfície, posição e alinhamento do sensor com o eixo de medição, uso da cola correta, tempo de cura da cola, aplicação de proteção mecânica dos sensores e instalação de cabeamento são partes que, quando não realizadas de maneira correta, podem levar à erros que comprometem a análise e diagnóstico da unidade que está sendo ensaiada. Um fator que dificulta bastante a execução dos corretos protocolos de instalação de extensômetros são os ambientes onde os mesmos foram instalados durante os ensaios já realizados na Eletrobras Eletronorte. Ambientes com contaminantes como água, óleo lubrificante e hidráulico, graxas etc, locais de difícil acesso, tempo curto para instalação, execução de outras atividades no mesmo ambiente são fatores que, além de dificuldades de execução, geram por vezes também o retrabalho quando é detectado alguma falha nos sensores instalados. Ao longo destes 10 anos, a equipe da Eletrobras Eletronorte responsável pela execução destes ensaios desenvolveu algumas técnicas para facilitar a instalação, bem como aumentar a durabilidade dos sensores instalados, visando campanhas de medições mais duradouras.

3.1 INSTALAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

A seguir são os principais passos adotados pela equipe na prática de instalação de extensômetros. O primeiro passo é a preparação da superfície de acordo com os seguintes passos:

- Lixamento da superfície, começando com a lixa mais grossa para a mais fina;
- Limpeza do local;
- Marcação da posição;
- Limpeza com álcool etílico e gaze;
- Limpeza com acetona ou álcool isopropílico e gaze;

Nessa etapa de preparação da superfície, a limpeza da superfície onde será colado deve ser realizada diversas vezes até que se garanta que a mesma esteja livre de contaminantes. A Figura 06 mostra uma superfície e preparação para a instalação de um extensômetro.



Figura 06

Por fim, deve ser realizada a marcação da posição do extensômetro de acordo com o projeto de medição previamente determinado. Após a superfície preparada, o sensor deve ser preparado para a colagem. O adesivo deve ser uma cola cianoacrilato adequada para a peça e ao extensômetro. Uma limpeza final deve ser realizada na superfície, e o extensômetro deve ser cuidadosamente posicionado de acordo com a marcação e colado. É necessário aguardar o tempo de cura da mesma (alguns minutos para cura rápida, e cerca de 24h pra cura completa). A Figura 07 mostra um extensômetro roseta já colado de acordo com a marcação.



Figura 07

Cuidados com a fiação também são necessários, sendo indicado que os cabos sejam soldados em terminais intermediários pra evitar que a fiação tensione e gere deformações indesejadas na extensômetro. A Figura 08 mostra um extensômetro uniaxial já colado e com a fiação soldada a um terminal.

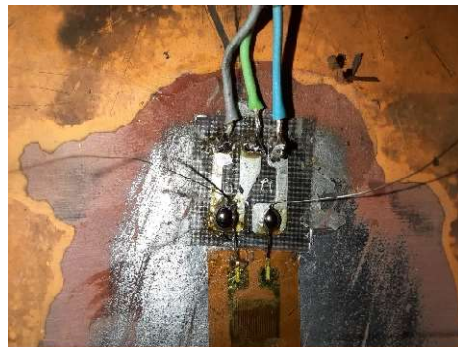


Figura 08

A seguir deve se fazer a instalação da proteção mecânica do sensor. Um suporte de PVC é colado ao redor do extensômetro já instalado, conforme mostra a Figura 09.



Figura 09

Após a cura da cola usada na fixação do suporte de PVC, se prepara uma resina epóxi comumente utilizada com fibra de vidro. Este produto é facilmente encontrado em lojas de material de construção. A resina deve ser despejada sobre o extensômetro dentro do suporte de PVC, tendo se o cuidado de submergir a fiação dentro da resina, a fim de garantir também a proteção da mesma, conforme mostra a Figura 10.



Figura 10

Logo em seguida, é indicado a fixação da fiação para evitar um eventual tensionamento e deslocamento da fiação que deve ficar submersa na resina até a sua cura, conforme mostrado na Figura 11.



Figura 11

A Figura 12 mostra o resultado final de uma instalação, já com a resina curada.



Figura 12

Diante de todos esses passos, a instalação de extensômetros é realizada em ambientes como mostram cheios de contaminantes como mostra a Figura 11, e em posições extremamente inadequadas e em peças muito robustas como mostra a Figura 13.



Figura 13

Importante também ressaltar que, quando na operação normal da unidade hidrogeradora, o sensor mostrado na Figura 11 fica submerso em uma lâmina de água. A resina permitiu que o extensômetro continuasse medindo mesmo nesta condição. Sem esta proteção, o extensômetro ficaria em curto e não seria possível coletar a medida de microdeformação.

4.0 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E DADOS OBTIDOS

Outra parte importante destes ensaios é a configuração do equipamento necessário para agrupar as informações oriundas dos sensores em uma única base de tempo. Nos ensaios realizados até hoje é utilizado um sistema de aquisição de dados comercial que permite a instalação de cartelas específicas para cada tipo de sensor, inclusive extensômetros em grande quantidade (um total de 112 extensômetros por rack). O equipamento tem cada um dos seus canais configurados também via software para adequação aos tipos de extensômetros, sensores de pressão e outros sinais de processo (4-20mA, 0 a 10V, etc), permitindo a visualização destes parâmetros em tempo real durante os ensaios, deste que sejam configuradas as telas de acordo com a necessidade de visualização. O equipamento também registra os dados para serem analisados após os ensaios, fornecendo inclusive possibilidades de tratamento de sinais mais rebuscadas que as utilizadas nas medições em tempo real.

As Figuras 14 mostra um exemplo de tela que mostra sinais medidos de diversos sensores numa mesma tela para visualização em tempo real em tempo real.



Figura 14

É possível também a criação de canais virtuais que executam cálculos em tempo real. A Figura 15 mostra exemplos de visualização de valores de torque calculados em tempo real através da medição com extensômetros do tipo roseta instalados no mecanismo ensaiado.

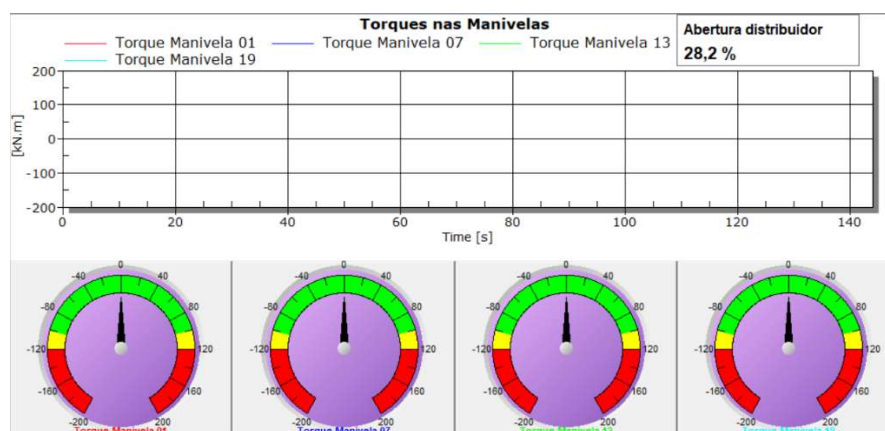


Figura 15

Dessa maneira, é possível realizar uma análise rápida durante a execução dos ensaios. E com os dados gravados, uma análise mais criteriosa dos resultados, sendo uma excelente ferramenta de diagnóstico e gestão destes ativos da geração.

5.0 RESULTADOS OBTIDOS DOS DIVERSOS ENSAIOS

Ao longo destes 10 anos, diversos ensaios foram realizados utilizando esta técnica. Tais ensaios normalmente consistem em aplicação de sensores para diagnóstico de funcionamento. Com base nestes dados se identifica os pontos críticos, para os quais se propõem soluções adequadas para correção dos problemas ou melhoria nas condições operativas visando evitar problemas futuros. Após a aplicação da solução proposta novos ensaios são realizados para comprovação da eficiência da solução aplicada. Esta metodologia foi aplicada inicialmente em uma unidade hidrogeradora de 22,5MW, onde o sistema de movimentação do distribuidor foi reprojeto e comissionado usando a técnica de medição de microdeformação. Posteriormente, a mesma técnica foi aplicada no diagnóstico operativo em uma unidade de 375MW, onde foram identificados pontos de melhoria tanto em peças do sistema de movimentação do distribuidor, quanto foi possível especificar uma nova rampa de partida para ser parametrizada no sistema de regulação de velocidade da unidade, tornando sua operação menos danosa à unidade hidrogeradora.

Nessa ocasião também foram realizados ensaios antes da aplicação da solução e após, para verificação da eficácia da solução.

Em seguida, esta solução foi aplicada em mais duas unidades geradoras semelhantes, e foram realizados os mesmos ensaios para verificação da eficácia da solução aplicada.

6.0 POSSIBILIDADES FUTURAS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA

Durante esses 10 anos, a aplicação de técnicas de medição de microdeformação ficou restrita à ensaios e monitoramento em unidades hidrogeradoras. Entretanto a versatilidade da técnica, aliada à experiência adquirida pela equipe em instalações de extensômetros em condições adversas inclusive de operação (como extensômetros submersos durante a medição), outras possibilidades de aplicação desta ferramenta.

Diagnóstico de funcionamento de sistemas de movimentação de comportas em usinas hidrelétricas é uma aplicação possível. Medição de esforços mecânicos em cruzetas de unidades hidrogeradoras, inclusive correlacionando dados de vibração mecânica com os esforços nestas estruturas, conforme recomendado pela ISO 13373-7:2017 - *Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 7: Diagnostic techniques for machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants* é outra aplicação de grande retorno para a manutenção preditiva de unidades hidrogeradoras. De maneira geral, onde houver esforço mecânico em peças críticas para o funcionamento de máquinas, é possível avaliar a aplicação da técnica de medição de microdeformação como forma de contribuir para diagnósticos de seu funcionamento.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) HOFFMANN, K. 1989 “An Introduction to measurements using strain gages”. Publisher: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt
- (2) <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>
- (3) http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Deformacao_Torque.htm
- (4) COB-2019-2066 MULTIPARAMETER MONITORING OF THE SPEED ADJUSTMENT SYSTEM OF A 390 MW FRANCIS TURBINE
- (5) ISO 13373-7:2017 - *Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 7: Diagnostic techniques for machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants*

DADOS BIOGRÁFICOS



Engenheiro Eletricista Formado pela UFPa, atuante no Centro de Tecnologia da Eletronorte em áreas de Metrologia, Ensaio Elétricos e Mecânicos.

(2) ANGELO TORRES MADUREIRA
 Engo. Mecânico pela Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2006. Mestrando em Engenharia de Infraestrutura e desenvolvimento energético pela U.F.P.A – Trabalhou como engenheiro e técnico industrial nas empresas FIAT Automóveis S/A , LIDER Aviação e Valourec Mannesmann. Atualmente é Engenheiro do Departamento de gestão da manutenção da geração hidráulica da Eletrobras Eletronorte – 15 anos de experiência em projetos de sistemas mecânicos e eletromecânicos industriais e de geração hidráulica. Atualmente, trabalha com sistemas de monitoramento de vibrações, microdeformações, análise estrutural e dinâmica de hidrogeradores e circuitos hidráulicos industriais.

(3) FREDERICO RODOLFO PARENTE DOERNER
 ENGENHEIRO ELETRICISTA ELETRÔNICO, UNIP-2007MBA EM GESTÃO ESTRATÉGICA DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, UNICAMP-2012.ATUOU COMO ANALISTA DE GESTÃO DE PROJETOS DE P&D E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E REDAÇÃO DE PATENTES NA ELETRONORTE, 2007 a 2018. ATUALMENTE CONTRIBUI NA DIVISÃO DE PLANEJAMENTO E DESEMPENHO DA MANUTENÇÃO DA GERAÇÃO NA USINA HIDRELETRICA DE TUCURUÍ.