

Novas Tecnologias para Medição de Rendimento em Gerador Hidráulico de Energia Elétrica

C. G. Filippin, LACTEC, B. W. D. Horbatiuk, LACTEC, Kimura, N., COPEL, A. C. de Paula, COPEL e C. G. Machado, COPEL

RESUMO

Como o sistema elétrico brasileiro é interligado, cada concessionária pode ser solicitada a gerar em sua capacidade máxima (nominal ou não, conforme o tipo de usina) em função de variações de demanda ou da ocorrência de eventos que impeçam outra unidade de gerar energia. O operador do sistema de energia interligado controla variáveis macro do processo. Do ponto de vista de geração de energia por meio hidroelétrico a capacidade do sistema é dada pela quantidade de água armazenada nos reservatórios em relação à potência instalada em cada unidade. Logo, o rendimento de cada unidade geradora (turbina e gerador) exigirá um determinado volume de água para cada MW de energia gerado. Logo, um trabalho buscando novas metodologias de medição de rendimento de hidrogeradores é justificável a partir da expectativa de se poder obter valores mais precisos para estes rendimentos e de se dispor de técnicas mais simples de medição.

PALAVRAS-CHAVE

Rendimento de gerador. Extensometria. Telemetria.

I. INTRODUÇÃO

O preciso conhecimento dos rendimentos da turbina e do gerador é vital para o gerenciamento do potencial do parque gerador de energia. Dois aspectos de relevância surgem:

1. Em situações críticas de geração de energia, particularmente em estiagens prolongadas, a interligação do sistema pode exigir de algumas unidades sua capacidade máxima de geração por períodos prolongados. Neste caso, o desconhecimento de forma precisa do rendimento do hidrogerador pode levar a falhas de logística de geração de energia por insuficiência de água no reservatório em função da potência líquida exigida;

2. As concessionárias celebram contratos de fornecimento de energia firme para com o sistema em função da capacidade de seus reservatórios e do rendimento dos hidrogeradores. O desconhecimento com precisão dos valores de rendimento pode levar à celebração de contratos que venham a lesar uma das partes.

É estudada a medição do rendimento de geradores elétricos através da deformação sofrida no eixo do mesmo sob carregamentos de flexão ou de tração, associados ao carregamento de torção. Em todo eixo, transmitindo esforços, haverá uma deformação equivalente à força aplicada agindo em sua estrutura. Determina-se, então, o torque interno resistente desenvolvido no interior do eixo, necessário ao balanceamento dos torques externos aplicados (ação/reação). Os torques externos e internos são numericamente iguais, porém de direções opostas.

II. DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO E TENSÃO NO EIXO DO HIDROGERADOR

No caso de um eixo de seção transversal circular sujeito a um momento torçor puro, existem tensões de cisalhamento iguais nos sentidos longitudinal e circunferencial, em toda a superfície do eixo. As tensões de cisalhamento que correspondem a estes carregamentos não podem ser medidas por extensômetros posicionados longitudinalmente e circunferencialmente, pois um extensômetro é sensível somente às tensões normais ao longo de sua linha central, e são totalmente insensíveis às tensões de cisalhamento. Mas, da mecânica dos sólidos, sabe-se que o cisalhamento puro produz tensões normais de valor igual em ângulos de 45° (Figura 1) positivos e negativos em relação ao sentido do cisalhamento. Sabe-se, também, dos princípios da mecânica que a soma vetorial entre as duas tensões normais principais é igual à tensão máxima de cisalhamento. Assim, as tensões de cisalhamento, que são proporcionais ao torque aplicado, podem ser medidas com um par de extensômetros instalados na superfície do eixo e orientados a 45° em ambos os lados de uma linha paralela a linha de centro do eixo.

O mais usual é instalar dois pares de extensômetros no eixo, como mostrado abaixo, para maximizar o sinal de saída e para fornecer o cancelamento dos componentes

C. G. Filippin trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: filippin@lactec.org.br).

B. W. D. Horbatiuk trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: borys@lactec.org.br).

N. Kimura trabalha na Companhia Paranaense de Energia (e-mail: kimura@copel.com).

A.C. de Paula trabalha na Companhia Paranaense de Energia (e-mail: aryc@copel.com).

C. G. Machado trabalha na Companhia Paranaense de Energia (e-mail: celio@copel.com).

estranhos ao sinal devido à tração ou outras tensões fora de interesse.

A seguir encontram-se as relações de projeto para um transdutor circular de torque na seção transversal:

$$\varepsilon_1 = \frac{T}{\pi GR^3} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$\frac{V}{V_0} = F \varepsilon_1 = \frac{F \cdot T}{\pi GR^3} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

onde:

T = torque

E = módulo de elasticidade

F = constante do extensômetro

ν = coeficiente de Poisson

e = deformação específica

R = raio do eixo

V_0 = tensão na ponte de Wheatstone

V = tensão de alimentação da ponte de Wheatstone

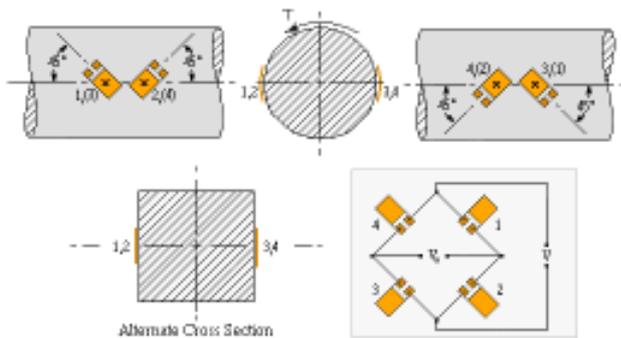


FIGURA 1 - Esquema da instalação de extensômetros.

Para o sentido do torque indicado na Figura 1, os extensômetros 1 e 3 são alongados e os extensômetros 2 e 4 comprimidos; todas as tensões devidas unicamente ao torque aplicado são iguais em valor.

Quando os extensômetros são conectados no circuito de uma ponte de Wheatstone, como mostrado, a resistência muda em cada par de braços adjacentes da ponte, os quais são opostos no sinal, enquanto aquelas em braços opostos tem o mesmo sinal. Em consequência, a saída da ponte é quatro vezes a de um único extensômetro. As respostas devido à temperatura de todos os quatro extensômetros são as mesmas no sinal e no valor nominal (se na mesma temperatura). Desde que a mudança de resistência seja a mesma em todos os braços da ponte não ocorrerá nenhum efeito no balanceamento; a tensão gerada no extensômetro devido à temperatura é cancelada dentro do circuito. Tal cancelamento ocorre também para as tensões devido a uma carga puramente axial no eixo, e pela mesma

razão. Entretanto, se o eixo for sujeito a um momento de flexão em qualquer plano, as tensões resultantes em extensômetros diametralmente opostos (1 e 3, e 2 e 4) serão sempre numericamente iguais mas opostas no sinal. Porém, estas tensões irão variar senoidalmente com amplitude igual à deformação máxima devido à flexão com frequência igual à de rotação da turbina, sendo assim, de fácil reconhecimento e filtragem.

Estas aplicações aritméticas da ponte de Wheatstone para aumentar o sinal de saída de torque ao cancelar componentes não desejados do sinal requerem que os extensômetros estejam precisamente posicionados e orientados. Os centros de todos os quatro extensômetros devem encontrar-se na mesma seção do eixo; devem ser orientados ao longo de hélices de 45° na superfície do eixo; os centros de cada par de extensômetros opostos devem encontrar-se em um diâmetro comum. Quando a medida do torque deve ser feita em um eixo continuamente girando existe o problema de se retirar o sinal de saída da ponte devido à instrumentação ser estacionária. Geralmente, nestes casos, usam-se anéis deslizantes ou telemetria com um transmissor girando com o eixo.

III. ENSAIO DE RENDIMENTO DO GERADOR

Devido à grande complexidade o ensaio de rendimento de geradores pelo método calorimétrico é proposta uma metodologia de ensaio de rendimento de gerador, porém com o ponto de vista das deformações elásticas sofridas pelo eixo. Segundo a literatura e a técnica de mecânica dos sólidos, todos os eixos transmissores de potência sofrem deformações provenientes da torção exercida sobre os mesmos. Esta torção provoca tensões de cisalhamento no plano de torção da peça, as quais, segundo a teoria de Mohr, podem ser também vistas como tensões de tração em um ângulo de 45° em relação ao eixo de rotação da peça. Estas pequenas deformações podem ser medidas a partir de extensômetros cuidadosamente colocados, conseguindo assim uma medida da tensão proveniente da transmissão de potência a qual é linearmente dependente da mesma.

Este ensaio pretende ter uma incerteza de medição menor que a encontrada no método calorimétrico, devido a este se basear em medições de transferência de calor em que muitas vezes a técnica é baseada somente em experimentos laboratoriais, e considerando muitas vezes situações hipotéticas. Por outro lado o método extensométrico já se mostrou confiável e esta em muito desenvolvido e reconhecido como um método eficaz. Se bem aplicado as incertezas de medição são pequenas.

Para conseguir a medida de potência tem-se:

$$P = T \cdot \omega \quad (5)$$

onde:

P = potencia (W);

T = torque medido no eixo (Nm);

ω = rotação do eixo (Hz).

Um ensaio foi realizado na usina hidroelétrica de Foz do Chopim, no município de Foz do Chopim – PR. A peça fundamental do ensaio é a precisão de colagem dos extensômetros e a perfeita transmissão dos dados para a respectiva aquisição. Para o perfeito posicionamento dos extensômetros foi confeccionado por corte a laser um gabarito para a colagem dos sensores no eixo. Este posicionamento é essencial para que se tenha realmente o valor da tensão de cisalhamento aplicada sobre o eixo, pois um deslocamento da direção de medição embute erros no ensaio.

Foram seguidos os seguintes passos:

A. Posicionamento e traçagem

O gabarito (figura 2) foi posicionado no eixo e a seguir foram demarcadas as áreas de colagem dos extensômetros. Após a demarcação o gabarito foi retirado e a tinta de proteção do eixo foi removida nas demarcações, deixando assim exposto o material do eixo. Depois de o material estar aparente, o gabarito foi novamente instalado, e com um bedame foram traçadas as linhas de 45° para posicionamento dos extensômetros.

B. Colagem

Logo após a traçagem foi iniciada a limpeza do material exposto e preparação do mesmo para receber o adesivo de aporte. A limpeza e tratamento da superfície requerem paciência e calma, pois um erro nesta etapa pode mascarar os resultados devido à má aderência do extensômetro ou à formação de bolhas de ar na camada de adesivo.

Foram então posicionados os extensômetros e colados, utilizando adesivo bi-composto de secagem rápida próprio para as condições de ensaio. Próximos aos sensores de tensão foram também coladas ancoragens para a fixação da fiação usada na alimentação e retirada de sinal dos transdutores, evitando assim esforços mecânicos desnecessários (figura 3).



FIGURA 2 - Gabarito para instalação dos quatro extensômetros.

C. Montagem do circuito

Após a cura da cola foi montada a ponte de Wheatstone, soldando os terminais aos cabos de alimentação e de sinal de maneira a formar o menor caminho possível, fazendo com que assim se consiga um circuito muito próximo ao teórico. Todos os cabos do circuito foram fixados à peça de ensaio através de abraçadeiras evitando assim que o circuito se abra pela influência da força centrífuga gerada.

D. Proteção dos extensômetros

Todos os extensômetros foram protegidos por uma camada de esmalte com alta constante dielétrica depois de checado o isolamento do mesmo. Acima desta camada foi aplicada outra de cera e acima desta uma fita especial de proteção com propriedade de autofusão para o isolamento do extensômetro com o meio externo.

E. Ligação do circuito ao sistema de telemetria

O circuito foi então soldado ao sistema de telemetria garantindo assim que não haveria erro por mau contato entre os terminais.

F. Realização do ensaio

Com a turbina hidráulica parada e o gerador sem carga, foi iniciada a aquisição. Após alguns minutos a turbina entrou em funcionamento. Este teste era necessário para que fosse possível se ter uma noção da sensibilidade alcançada, pois seria possível notar a deformação causada no eixo pela inércia do mesmo. Depois de alcançado o regime de rotação da turbina, foi aplicada uma carga gradual no gerador fazendo então com que se medisse a potência transmitida pelo eixo.



FIGURA 3 - Extensômetros instalados e preparados para a conexão com o equipamento de telemetria.

G. Materiais e equipamentos

Os principais materiais empregados no ensaio foram:

- Extensômetro de resistência elétrica semicondutor marca Kyowa modelo KSP-2-120-E3;
- Cola marca HBM modelo X-60;
- Sistema de telemetria e tratamento de sinais marca KMT modelo RTSE 600;
- Placa de aquisição de sinais marca National Instruments modelo DaqCard AI-16XE-50.

IV. RESULTADOS

O resultado bruto do ensaio é apresentado na figura 4. Estes resultados são referentes a uma rotação na turbina de 189,4 rpm. Efetuou-se, então, uma filtragem do sinal com filtro Butterworth de sexta ordem, com o sinal filtrado apresentado na figura 5.

A potência média alcançada pela turbina hidráulica é de aproximadamente 17 MW, enquanto que o gerador fornecia uma potência de aproximadamente 14 MW. As potências medidas dão como resultado um rendimento do gerador de 82%.

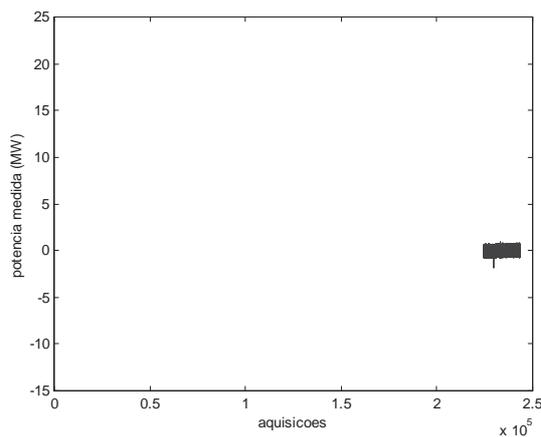


FIGURA 4 - Resultado bruto do ensaio.

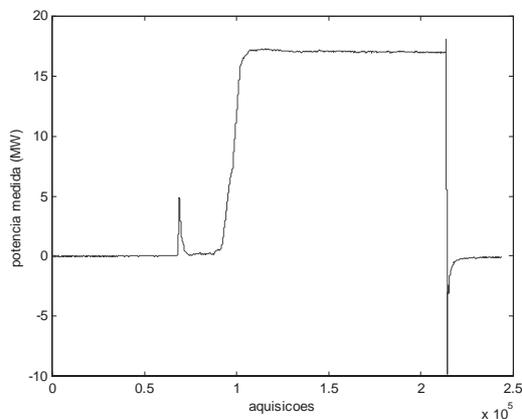


FIGURA 5 - Sinal filtrado.

Devido ao histórico já conhecido sobre geradores elétricos, é sabido que este rendimento se encontra abaixo do esperado para uma máquina daquele porte, e que portanto deve haver erros na medição e outras influências, como, por exemplo, do campo eletromagnético devido ao gerador.

No entanto, podem-se notar os estágios de carga que aconteceram durante o ensaio, na Figura 04:

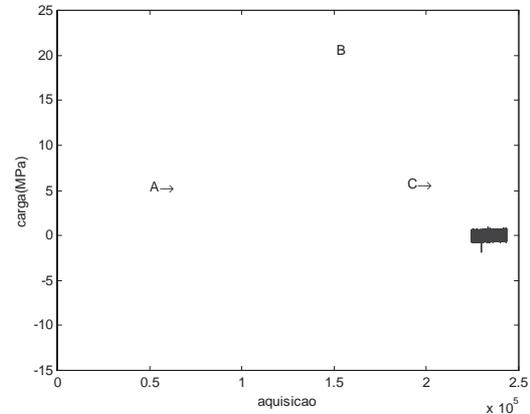


Figura 6 - Regiões de carga.

Pode-se visualizar na Figura 06 os três estágios principais:

- No estágio A pode-se identificar o surgimento de esforços provenientes da inércia do rotor ao entrar em movimento. Neste ponto nota-se a sensibilidade dos extensômetros instalados ao eixo, pois devido às proporções dimensionais da peça têm-se pequenas deformações periféricas, especialmente na partida da turbina, quanto não existe carga no gerador;
- No estágio B nota-se o patamar de carga a partir do qual se obteve a potência fornecida ao gerador pela turbina hidráulica; este patamar representa 100% de carga nominal do gerador;
- Em C nota-se a rejeição de carga e vêem-se claramente os esforços de pico de tração e posteriormente compressão aos quais o eixo foi submetido (durante a parada por frenagem o eixo é submetido a um contra-torque que gera deformações em sentido contrário, com valor negativo portanto).

V. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Em toda e qualquer medição existem erros intrínsecos aos próprios transdutores ou instrumentos utilizados. Em um sistema de medição onde existem diversas partes tais como transdutores, amplificadores e filtros, este erro se combina e se propaga (somando-se) desde a medição da grandeza física até a leitura final dos valores. Então para que se avalie se a medição traduz o valor medido com a precisão desejada deve-se ter em mãos a incerteza propagada pelo sistema. O erro em um sistema é dado pela equação (6):

$$Erro = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\Delta i_j \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial i_j} \right) \right]^2} \quad (6)$$

onde:

n = número de variáveis;

i_j = variável 'j';

Δi_j = incerteza da variável 'j';

f = função matemática do sistema;

$\frac{\partial f}{\partial i_j}$ = derivada parcial da função f em relação à variável i_j .

A incerteza na medição de potência em máquina hidráulica é calculada a partir da descrição do sistema segundo a equação (7):

$$P = E \cdot \left(\frac{s}{g \cdot a} \cdot \frac{1}{k} \right) \cdot \left[\frac{\pi}{2} \cdot (C_2^4 - C_1^4) \right] \cdot \left[\frac{1}{C_2 \cdot (1 + \nu)} \right] \cdot \frac{rpm}{60} \cdot 2\pi \quad (7)$$

onde:

P = Potência Calculada (W);

E = Módulo de Elasticidade do Aço (207 GPa);

s = Sinal medido (V);

g = Ganho do amplificador;

a = Alimentação da ponte de Wheatstone (V);

k = Coeficiente do Extensômetro;

C_1 = Raio interno do eixo (m);

C_2 = Raio externo do eixo (m);

n = coeficiente de Poisson

rpm = Rotação da Máquina (rpm ou 1/min).

A incerteza de medição para cada parâmetro é:

$$\Delta s = 0,2 \%;$$

$$\Delta a = 0,2 \%;$$

$$\Delta g = 0,2 \%;$$

$$\Delta k = 3 \%;$$

$$\Delta rpm = 1,58 \text{ rpm};$$

$$\Delta C_1 = 0,5 \text{ mm};$$

$$\Delta C_2 = 0,5 \text{ mm}.$$

As derivadas respectivas são obtidas pelas equações (8) a (14):

$$\frac{\partial P}{\partial s} = E \cdot \left(\frac{1}{g \cdot a} \cdot \frac{1}{k} \right) \cdot \left[\frac{\pi}{2} \cdot (C_2^4 - C_1^4) \right] \cdot \left[\frac{1}{C_2 \cdot (1 + \nu)} \right] \cdot \frac{rpm}{60} \cdot 2\pi \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial g} = E \cdot \left(\frac{-s}{g^2 \cdot a} \cdot \frac{1}{k} \right) \cdot \left[\frac{\pi}{2} \cdot (C_2^4 - C_1^4) \right] \cdot \left[\frac{1}{C_2 \cdot (1 + \nu)} \right] \cdot \frac{rpm}{60} \cdot 2\pi \quad (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial a} = E \cdot \left(\frac{-s}{g \cdot a^2} \cdot \frac{1}{k} \right) \cdot \left[\frac{\pi}{2} \cdot (C_2^4 - C_1^4) \right] \cdot \left[\frac{1}{C_2 \cdot (1 + \nu)} \right] \cdot \frac{rpm}{60} \cdot 2\pi \quad (10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial C_1} = E \cdot \left(\frac{1}{g \cdot a} \cdot \frac{1}{k} \right) \cdot \left[\frac{\pi}{2} \cdot (-4 \cdot C_1^3) \right] \cdot \left[\frac{1}{C_2 \cdot (1 + \nu)} \right] \cdot \frac{rpm}{60} \cdot 2\pi \quad (11)$$

$$\frac{\partial P}{\partial C_2} = E \cdot \left(\frac{1}{g \cdot a} \cdot \frac{1}{k} \right) \cdot \left[\frac{2\pi C_2^3}{1 + \nu} - \frac{\pi \cdot (C_2^4 - C_1^4)}{2 C_2^2 \cdot (1 + \nu)} \right] \cdot \frac{rpm}{60} \cdot 2\pi \quad (12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial rpm} = E \cdot \left(\frac{1}{g \cdot a} \cdot \frac{1}{k} \right) \cdot \left[\frac{\pi}{2} \cdot (C_2^4 - C_1^4) \right] \cdot \left[\frac{1}{C_2 \cdot (1 + \nu)} \right] \cdot \frac{1}{60} \cdot 2\pi \quad (13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial k} = E \cdot \left(\frac{-s}{g \cdot a} \cdot \frac{1}{k^2} \right) \cdot \left[\frac{\pi}{2} \cdot (C_2^4 - C_1^4) \right] \cdot \left[\frac{1}{C_2 \cdot (1 + \nu)} \right] \cdot \frac{rpm}{60} \cdot 2\pi \quad (14)$$

Processando os dados obtém-se um erro relativo de 3,32 %. Este erro total é formado por sete parcelas. Estas parcelas são referentes a cada uma dos parâmetros envolvidos na composição da potência a partir da medição de deformação no eixo. O peso de cada parcela no erro total é mostrado na figura 7.

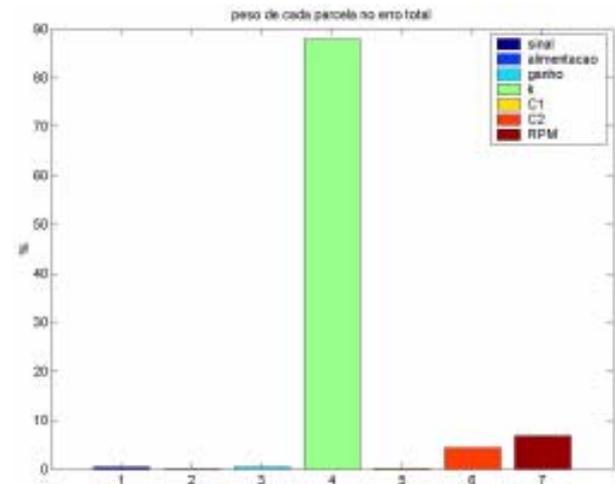


FIGURA 7 - Composição do erro.

VI. CONCLUSÃO

Como primeira experiência prática tinha-se em vista entender o comportamento da instrumentação e suas limitações. Os resultados qualitativos foram muito bons e pode-se vê-los nos gráficos apresentados. Os resultados quantitativos também mostraram fatos interessantes e além de tudo estão na mesma ordem de grandeza dos valores esperados. No entanto, tem-se de ressaltar que os valores obtidos são meramente ilustrativos já que apenas ajudam no aprimoramento do método extensométrico de medição.

Pode-se ver nos dados aquiridos a forte influência de ruídos, muito provavelmente de origem eletromagnética. Esses ruídos já eram esperados, pois se estava trabalhando embaixo de um gerador elétrico com capacidade próxima a 15MW e ao lado de outro de igual potência. Porém, era preciso se ter noção do efeito ocasionado na medição devido a interferência das duas fontes de ruído. Outro fato a ser notado foi que, devido a limitações técnicas, utilizou-se um amplificador de sinal de somente 10 vezes, quando o ideal seria um de 50 vezes. Dessa forma seria melhorado em muito o sinal, pois como o sinal se dava em valores baixos (pico de aproximadamente 1 V) é muito suscetível a interferências externas.

No entanto o ensaio é considerado de grande valia, pois mostrou o caminho a trilhar para o projeto extensométrico, indicando limites, quantificando valores e qualificando equipamentos para a seqüência dos trabalhos previstos neste projeto.

O método descrito neste documento apresenta vantagens em relação ao método calorimétrico, quer seja pela facilidade de implantação ou pelo menor tempo de máquina pa-

rada ou ainda pela possibilidade de medições contínuas avaliando-se assim a integridade de funcionamento da turbina.

VII. CONTINUIDADE DOS TRABALHOS

As atividades seguintes previstas no projeto necessitam da execução de uma calibração da estrutura de medição. Esta calibração será efetuada aplicando-se um torque conhecido no eixo da turbina através de um binário (figura 8) cuja força será monitorada por células de carga rastreadas (figura 9). A calibração permitirá o melhor conhecimento da efetividade da aplicação dos extensômetros no eixo e, também, permitirá que se avalie em campo as incertezas estabelecidas para os diversos parâmetros que compõem o valor da potência entregue pela turbina. Não é o objetivo do projeto a necessidade de calibração de cada estrutura de medição a ser implantada para a medição de rendimento em cada planta. Esta calibração pode se tornar inviável particularmente para equipamentos de grande porte, onde os valores de torque nominais são elevados.

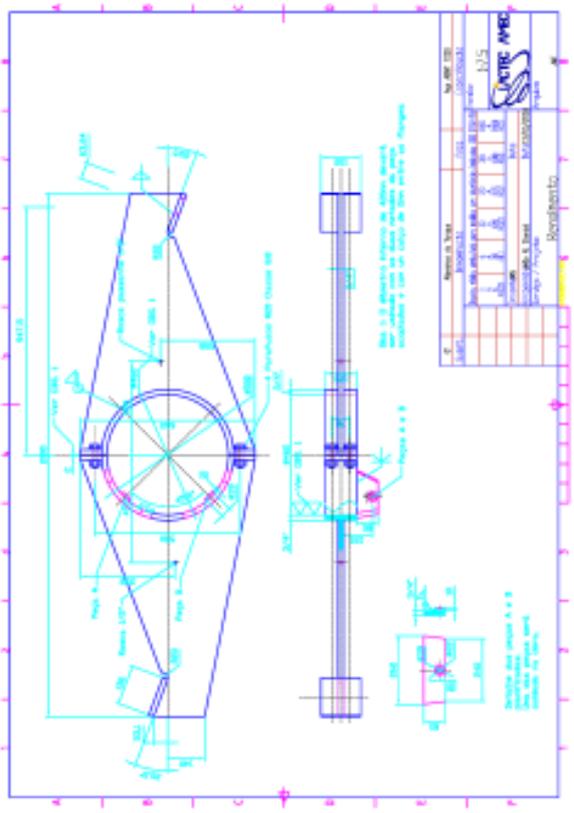


FIGURA 8 - Braço para aplicação de carga.

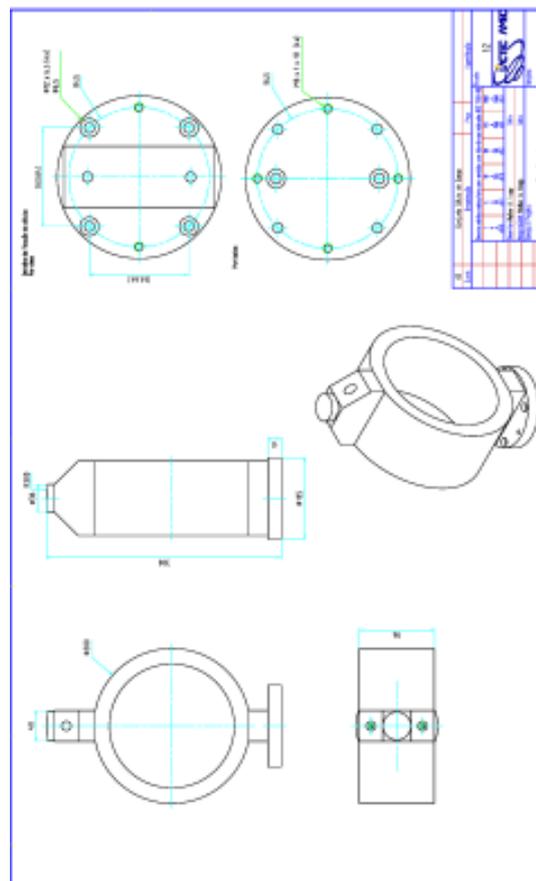


FIGURA 9 - Célula de carga

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Doebelin, E.O., *Measurement Systems: Application and Design*, McGraw-Hill, 1990;
- [2] Sinclair, I. R., *Sensors and Transducers: A guide for technicians*, Newnes, 1992;
- [3] Beckwith, T.G., Marangoni, R.D., Lienhard, J. H., *Mechanical Measurements*, Addison-Wesley, 1993;
- [4] Micro Measurement Guide, Micromasurement, www.measurementsgroup.com;
- [5] Effective Machinery Measurements Using Dynamic Signal Analyzers, Hewlett-Packard;
- [6] Beer, F.P., Johnston Jr, E.R., *Resistência dos Materiais*, McGraw-Hill, 1982;
- [7] Kapp, W.A., Machado, C.G., "Ensaio de Rendimento Absoluto", Relatório LACTEC, 2000;
- [8] Field Acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pumps-turbine, CEI IEC 41, 1991;
- [9] Computer Aided Pressure-time Method, Velensek, B., Pisljar, M., Yugoslavia;
- [10] Levesque, J.M., Tran, C., "The Importance of Prototype Efficiency Testing", 16th Sysposium of the IAHR, Brasil, 1992;
- [11] Melli, A., "Misura Portata nelle Condotte Forzate: Il Metodo Gibson", *L'Energia Elettrica*, 1928;
- [12] Mollicone, S., "Latest Developments of the Pressure-time Method", American Power Conference, Chicago, 1983;
- [13] Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, INMETRO, 1998;
- [14] Filippin, C.G., Horbatiuk, B.W.D., "Medição de Torque no Eixo da Turbina da Unidade #2 da Usina de Foz do Chopim", Relatório LACTEC, 2002.