

DETERMINAÇÃO DO TORQUE DE UMA TURBINA KAPLAN DE ALTA POTÊNCIA MEDIANTE A MEDIÇÃO NA DEFORMAÇÃO DO EIXO

Fernando Gabriel Pelinski

Acadêmico do curso de Engenharia Eletromecânica

LABSE - Departamento de Ingeniería Electromecánica. Universidad Nacional de Misiones,
Oberá, Argentina

fernando.pelinski@gmail.com

Facundo E. Gonzalez

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Eletromecânica

Centro de estudios de energía para el desarrollo CEED - J.M. de Rosas 325. Oberá, Argentina
fakgonzalez@gmail.com

Gabriel A. Tarnowski

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Eletromecânica

LABSE - Departamento de Ingeniería Electromecánica. Universidad Nacional de Misiones,
Oberá, Argentina

gabriel.tarnowski@gmail.com

Resumo. *O presente artigo descreve a metodologia empregada para a determinação do torque de uma turbina Kaplan de alta potência mediante a medição de deformação do seu eixo. Para a medição das deformações foram utilizados strain gages, conectados a um aquisidor de dados que transmite os resultados em tempo real utilizando tecnologia wireless. Os dados foram processados para o armazenamento com um computador para posteriores análises em distintos modos de funcionamento da máquina.*

Palavras-chave: *Torque, Turbinas Kaplan, Strain Gages.*

1. INTRODUÇÃO

Os altos torques de funcionamento das máquinas rotativas de alta potência e baixas revoluções dificultam a medição direta a traves de métodos convencionais (ex: o dinamômetro), tendo então que empregar alternativas como a que se apresenta em este artigo.

A análise realizada possibilita a determinação da deformação que experimenta o eixo quando a turbina

encontra-se em operação. Para isso foram colocados sensores de deformação elétricos, os quais se ajustam as recomendações da norma IEC 994, de maneira que possa ser determinado o torque sobre o eixo para logo ser enviado até um computador via wifi.

2. AQUISIÇÃO DE DADOS

Os ensaios foram realizados em uma turbina Kaplan de 155MW, onde a medição das deformações foi feita na região por debaixo do rolamento axial da turbina e por cima do rolamento guia (Fig. 1).

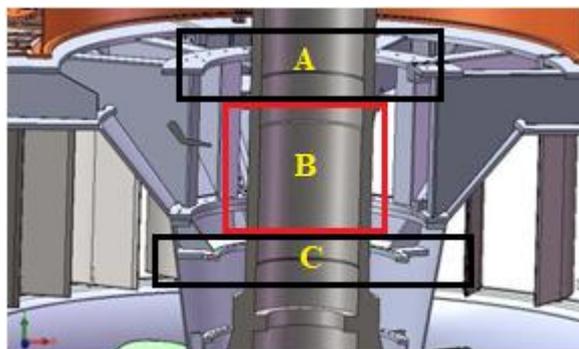


Figura 1 – A. Rolamento axial B. Local da medição C. Rolamento guia.

2.1 Considerações

Os *strain gages* se instalaram a 45° respeito do eixo de rotação (Fig. 2) para obter a deformação nessa direção. Para compensar a interferência das cargas normais e de flexão superpostas, instalou-se um outro sensor a 180° com respeito ao primeiro em configuração de ponte completa (HOFFMANN, 2013).

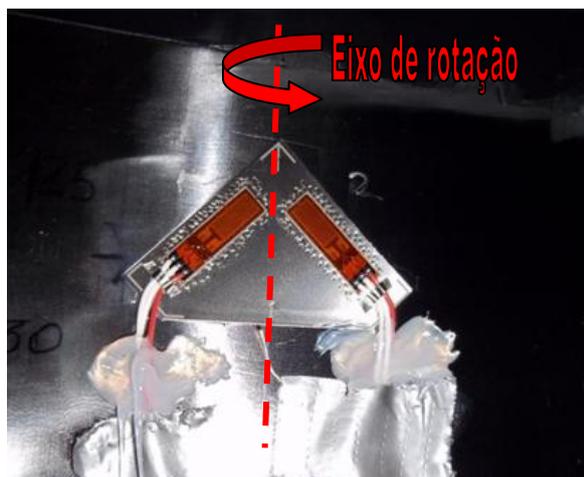


Figura 2 – Instalação dos SG's sobre o eixo.

Os efeitos de temperatura foram compensados colocando dois sensores transversalmente, um ativo e outro de compensação de modo que ambos variam exatamente da mesma forma devido à temperatura, dando como resultado uma compensação do efeito (HOFFMANN, 2013).

A localização dos *strain gages* e a sua conexão foram feitas segundo especificações da norma IEC 994 [IEC, 1991].

3. PROCESSO DE MEDIÇÃO

Pra poder medir as deformações os *strain gages* foram conectados mediante circuitos do tipo ponte de Wheastone em uma configuração de ponte completa, devido a que com a mesma se consegue uma maior sensibilidade do sistema e também a compensação dos efeitos não desejados.

As equações utilizadas assumem que a ponte encontra-se inicialmente equilibrada, onde a queda de tensão em cada resistência é igual, gerando uma saída entre pontos da

ponte igual a zero quando não atuem solicitações mecânicas. Esta condição inicial e improvavelmente obtida devido à existência de tensões mecânicas recorrentes da sua montagem sobre a máquina, também a mesma tolerância que têm o *strain gage* e a tensão mecânica induzida pelo uso da mesma gera uma tensão. O procedimento para anulação do *offset* foi realizado a traves de software (NATI, 1998).

Com os sensores instalados realizou-se o ajuste de calibração, foi então utilizada uma resistência *shunt* a qual causa no sensor uma variação da resistência associada a uma deformação conhecida, isto é feito para verificar o sistema de medida relativo à entrada mecânica ou carga predeterminada.

O desequilíbrio da ponte é captado por um sistema de aquisição responsável da amplificação do sinal e de tradução das deformações por meio de algoritmos previamente carregados, para logo poder ser armazenado no computador. A aquisição foi realizada com uma frequência de amostragem de 2 kHz, e os dados são enviados por meio do sistema de conexão *wireless*. Este sistema contém um router *wireless* e um aquisidor alimentado por um sistema de baterias (Tabela 1). Tudo o conjunto encontra-se girando solidariamente com o eixo dentro de uma caixa plástica vinculada mediante um sistema de ancoragem (Fig. 3).

Tabela 1 – Elementos empregados na medição

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Strain gages • Aquisidor de dados • Router wireless • Computador |
|---|

Os dados foram capturados remotamente por um computador que permitiu a visualização direta dos resultados e também o armazenamento dessas medições em função do tempo.



Figura 3 – Conjunto aquisidor, router e baterias solidárias ao eixo da turbina.

Durante a medição foi testada a turbina em diferentes modos de funcionamento passando por degraus de potência conhecidos e logrando estabilidade em cada uma delas (Tabela 2).

Tabela 2 – Tempos de operação em cada etapa de potência.

Operação	Tempo (s)
-Arranque	305
-Sincronização, subir a potencia hasta o mínimo técnico (60MW)	128
-Elevação de potencia hasta 100 MW	234

-Elevação de potencia hasta 130 MW	312
-Elevação de potencia hasta 155MW	464
-A 150 MW, colocar em modo de Regulación primaria de frecuencia	1052
-Descenso de potencia hasta 130 MW	372
-Parada	355

4. TRATAMENTO DOS DADOS

O conhecimento das deformações permitiu a determinação do torque aplicado sobre o eixo por meio de equações físicas conhecidas (Eq. 1), obtidas mediante o análise da mecânica dos sólidos. [SHIGLEY e MISCHKE, 1999]

$$T = \frac{\pi \cdot G}{8 \cdot D} * (D^4 - d^4) \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Sendo G: módulo de elasticidade transversal [Pa];
D: diâmetro maior do eixo [m];
d: diâmetro menor do eixo [m];
 ε : deformação específica [$\mu\text{m}/\text{m}$].

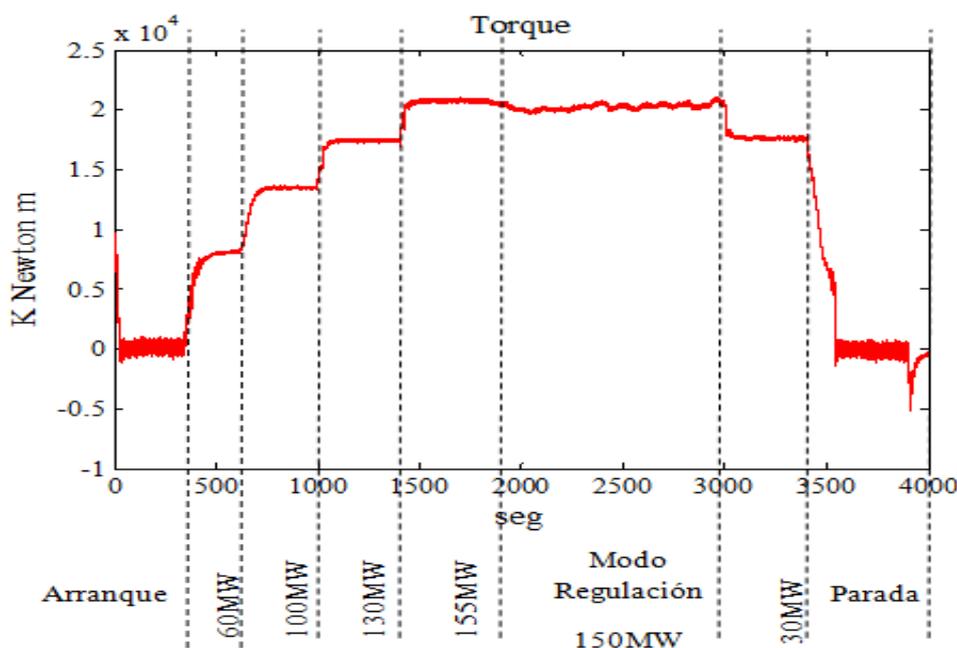


Figura 4 – Medição do torque em função do tempo indicando as diferentes etapas de potência.

Cumprido o objetivo procedeu a execução da gráfica correspondente a qual se apresenta na Figura 4 em função do tempo para as posteriores conclusões.

5. CONCLUSÕES

Pode ser apreciado na Fig.4 que durante o arranque obtemos um elevado torque que desce rapidamente, este comportamento corresponde ao momento onde a máquina vence a inércia passando do estado estacionário até sua velocidade angular nominal, a mesma atinge valores picos de aproximadamente 10 kNm e logo desce gradualmente até um valor aproximado de 0,8 kNm durante um tempo de 20 segundos. Logo no comportamento seguinte, observa-se a máquina em vazio; nesta etapa as oscilações de torque são as máximas dadas em tudo o ensaio, provocando as condições mais desfavoráveis para a turbina referindo-se a solicitações dinâmicas. Destaca-se além, que as oscilações não só aparecem sobre o eixo positivo senão também por debaixo, isto é associado a os esforços repetidos invertidos (totalmente alternantes).

Logo do processo de arranque, é elevada a potência da máquina sobre distintos estágios, repousando sobre cada um deles hasta sua estabilização e concluindo que os dispositivos de medição se comportam de forma correta, respondendo com ótima aproximação ao comportamento da turbina.

Foram alcançados valores máximos de torque de 21 kNm correspondentes a uma potencia elétrica de 155 MW, para uma velocidade de giro de 71,4 RPM durante a etapa de regulação onde também dão lugar a oscilações, as quais não são severas dinamicamente mas são de maior magnitude y de esforços repetidos em una sola direção comparando-se com as obtidas com a turbina em vazio.

Na etapa de parada pode-se apreciar novamente o comportamento totalmente alternante dos esforços, os quais culminam com um esforço pico negativo de -5 kNm,

que fisicamente representa o freio do eixo hasta sua posição de reposo novamente.

Este método de medição direta de torque permite a determinação da potência mecânica e, junto à potência elétrica, obter o rendimento elétrico da turbina. Também com estes dados pode-se inferir sobre o comportamento a futuro, dando lugar a manutenção preditiva da máquina.

6. AGRADECIMENTOS

Os ensaios foram realizados com o apoio e colaboração da Facultad de Ingenieria da Universidad Nacional de Misiones, a traves do Centro de Estudios de Energia para el Desarrollo. E feito um agradecimento especial ao departamento técnico da Entidad Binacional Yacyretá.

7. REFERENCIAS

HOFFMANN K.. Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas. Editor: Hottinger B. M. G., Darmstadt. Revised: Emilio E. C. Barcelona, Spain, 2013. 181 – 182 p. 246 – 250 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION Guide for field measurement of vibrations and pulsations in hydraulic machines (turbines, storage pumps and pump-turbines), CEI IEC 994. First edition 1991-01.

NATIONAL INSTRUMENTS. Strain Gauge Measurement – A tutorial. Application Note 078. August 1998. 6 – 7 p.

SHIGLEY J. E., MISCHKE C. R. Diseño en Ingeniería Mecánica. Editorial McGraw-Hill. Edición: 1999.