

Bancada para Simulação do Comportamento Dinâmico de Hidrogeradores

M.O.M. Carvalho, F.J.R. Neves, C.V.S. Villa, L.B.R. Salomon, A.B.S. Oliveira, A.C.G.C. Diniz¹ e R.R. Gonçalves²

Resumo: Apresenta-se nesse trabalho o desenvolvimento de uma bancada de ensaios para estudos do comportamento dinâmico de modelos de hidrogeradores com turbinas do tipo Kaplan, considerando diferentes configurações de forma a reproduzir, sobre um modelo reduzido fenômenos típicos do funcionamento de hidrogeradores. Numa primeira fase as simulações se concentraram no comportamento mecânico e elétrico dos hidrogeradores, permitindo evoluções futuras, ampliando a aplicação da mesma em pesquisas e treinamentos.

Palavras-chave: Hidrogerador, Modelo Reduzido, Vibrações.

I. INTRODUÇÃO

São muitos os fenômenos dinâmicos presentes no funcionamento de geradores e turbinas Kaplan empregados nas usinas hidroelétricas. De modo a melhor estudá-los e permitir o desenvolvimento de profissionais qualificados, foi projetada e construída uma bancada para a simulação do comportamento dinâmico de hidrogeradores.

Para tanto, sua concepção teve como diretrizes, ter uma bancada flexível, de forma a permitir a modificação parâmetros de projeto e operacionais, cobrindo assim, um conjunto de situações e de comportamentos cujo estudo tem forte interesse para o setor elétrico.

Mais precisamente esta bancada se propõe a estudar temas onde, em diagnósticos preliminares, existe potencialmente o interesse da ELETRONORTE.

A bancada deverá propiciar:

- Modelamento Dinâmico de Rotores permitindo testes e ensaios a baixo custo
- Análise Modal do modelo de Turbinas Hidráulicas tipo Kaplan
- Estudo de métodos e de estratégias para Monitoração e Diagnóstico
- Validação experimental de modelos numéricos para o comportamento dinâmico de Hidrogeradores

Neste trabalho, particular interesse foi dedicado ao estudo do comportamento dinâmico de Hidrogeradores sujeitos a cargas cíclicas devidas a forças eletromagnéticas [1]. O a-

coplamento entre o problema de vibrações mecânicas e de oscilações no campo magnético afetando a qualidade da energia, a vida útil de mancais e o custo de manutenção são de particular interesse para este projeto [2].

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Construir uma bancada experimental para a validação de metodologias numéricas de estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas usando modelagem por elementos finitos e técnicas de subestruturação e análise modal, com o propósito de verificar o comportamento dinâmico de conjuntos rotor-gerador.
- Desenvolvimento de uma bancada experimental flexível que permita variar o *gap* no entreferro do gerador e, como decorrência, a sua influência na resposta dinâmica do mesmo.
- Desenvolvimento de metodologias de monitoração avançadas para estabelecimento de diagnóstico de falhas de partes mecânicas; e
- Capacitação de recursos humanos em tópicos avançados associados ao modelamento e diagnóstico de Hidrogeradores, envolvendo a formação de alunos em nível de graduação e pós-graduação, e formação continuada de engenheiros da concessionária parceira.

II. METODOLOGIA

O trabalho de cunho aplicado, eminentemente tecnológico, foi desenvolvido observando a seguinte metodologia:

Inicialmente foram realizados estudos gerais relativos à Semelhança Dinâmica e Análise Dimensional [3]. Em seguida um grupo Motor-Gerador foi adquirido, desmontado e, partindo dele, o projeto foi refeito e adaptado para os propósitos da bancada. Esse projeto buscou preservar as características construtivas do grupo motor-gerador que guardavam semelhanças com o gerador a ser simulado. Só então foi realizada a etapa de Construção/Fabricação da Bancada. Finalmente foi realizada a etapa de Instrumentação e de Ensaios.

A. Estudos Preliminares

Após uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados com o tema [4], [5] e [6], foi feito um detalhado estudo dimensional e de semelhança [3] de forma a avaliar as características que a Bancada deveria ter, com o propósito de garantir características mínimas de semelhança dinâmica a uma turbina Kaplan.

Os números Adimensionais Π que asseguram as características de semelhança dinâmica procuradas foram identificados e, a partir deste estudo, se pode identificar os parâme-

Trabalho desenvolvido no âmbito do Projeto "Bancada Experimental para a Simulação do Comportamento Dinâmico de Hidrogeradores" – Código ANEEL 0372-025/2003, financiado pela ELETRONORTE e executado pela Universidade de Brasília, ciclo 2003/2004.

¹Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Dinâmica de Sistemas. Contato: molavo@unb.br.

²ELETRONORTE–EEGM. Email: rogerio.goncalves@eletronorte.br.

tros para os quais a semelhança poderia ser assegurada. No que concerne àquelas características ou parâmetros sobre os quais não se consegue ter controle, através da Análise Dimensional, o erro cometido na simulação poderia então ser avaliado.

A modelagem tomou como referência a turbina 3 da UHE de Coaracy Nunes.

B. Desmontagem do grupo Motor-Gerador

Nesta etapa, o grupo motor-gerador, mostrado na figura 1, foi adquirido e integralmente desmontado de forma a permitir a identificação e seleção de características a serem preservadas. Da mesma forma, foram ainda escolhidas as características do grupo motor-gerador que seriam modificadas e as que deveriam ser controladas nos experimentos de forma a dar flexibilidade à bancada. O *know-how* construtivo do grupo motor-gerador foi também aproveitado ao máximo na construção da bancada.

O grupo motor-gerador foi então integralmente desmontado, modificado e reprojeto, de forma a permitir o ajuste de parâmetros associados aos diversos Números Adimensionais Π que asseguram as características de semelhança dinâmica procuradas.



Figura 1. Concepção da bancada

C. Projeto e Construção da Bancada

De forma a aproveitar o rotor do Grupo Motor-Gerador adquirido com seu comprimento integral, sem cortes ou emendas, foi adotado um Fator de Escala de semelhança geométrica de **1:14,8**. Baseado neste Fator de Escala, as

demais características gerais da Bancada foram então projetadas, dimensionadas e construídos subsistemas específicos

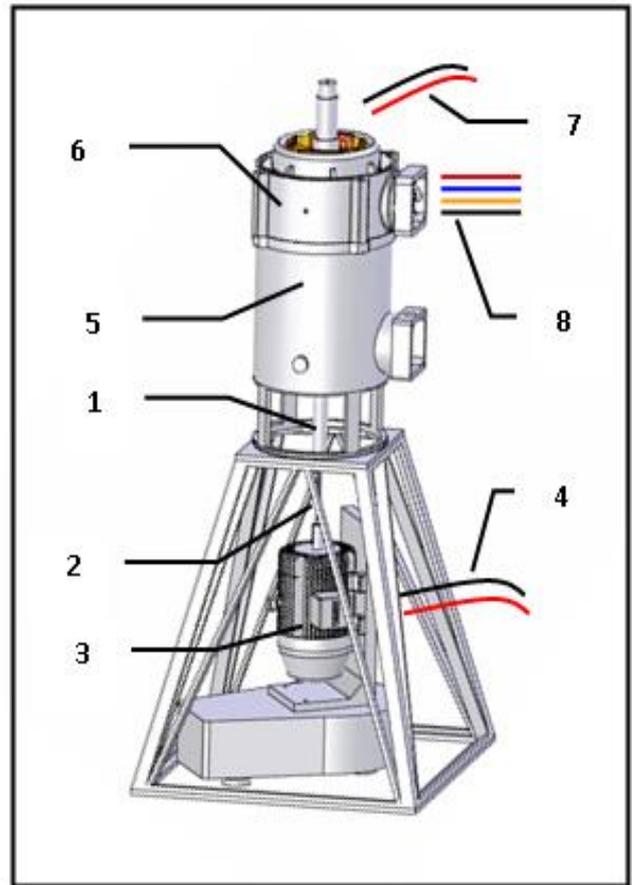


Figura 2. Concepção da bancada

de forma a compatibilizar os demais requisitos de projeto com a escala adotada. A saber:

- *Concepção da bancada*

A bancada foi concebida conforme apresentado na figura 2, de forma a permitir o acionamento do rotor (1) por um acoplamento elástico (2), através de um motor situado na parte inferior do conjunto (3), controlado pelo variador de frequência ligado em (4). O corpo do gerador valeu-se da base do antigo grupo motor-gerador (5), modificada para comportar o volante de inércia e os mancais guia e de escora (não apresentados no desenho).

O estator (6) é constituído de um bloco independente ao qual são presas as escovas (não apresentadas no desenho) alimentadas através de (7) para excitação do rotor. O estator é preso ao corpo principal da bancada através de um dispositivo que permite o ajuste e controle da excentricidade do entreferro. Dele sai, através de (8), a potência gerada para a carga.

- *Acoplamento elástico*

Como a parte hidráulica da turbina não foi simulada, não havendo escoamento na turbina, o rotor foi projetado para ser acionado por um motor elétrico através de um acoplamento elástico. Este elemento de baixa inércia e rigidez à flexão, desacopla os modos de flexão do eixo do motor de acionamento daqueles do rotor da turbina. Desta forma, somente o cisalhamento, devido à torção pode ser transmitido

do entre esses dois elementos, preservando os modos de flexão do rotor da turbina que se deseja estudar.

- *Base de suporte do gerador*

O gerador teve que ser suspenso por um suporte de forma a acomodar o motor de acionamento sob o mesmo. Essa estrutura foi concebida de forma a apresentar elevada rigidez e a ficar bem ancorada no solo, não contribuindo assim para a formação de modos de vibração espúrios de baixa frequência, não correlacionados com o protótipo.

- *Suspensão elástica com rigidez controlada*

O estudo realizado de Análise Dimensional indicou que a rigidez dos mancais deveria guardar a mesma proporção da escala geométrica do modelo, isto é, do Fator de Escala. Assim, esta teve que ser projetada observando este requisito. Um elemento elástico foi então desenhado para atingir esses objetivos. A figura 3 apresenta estes resultados.

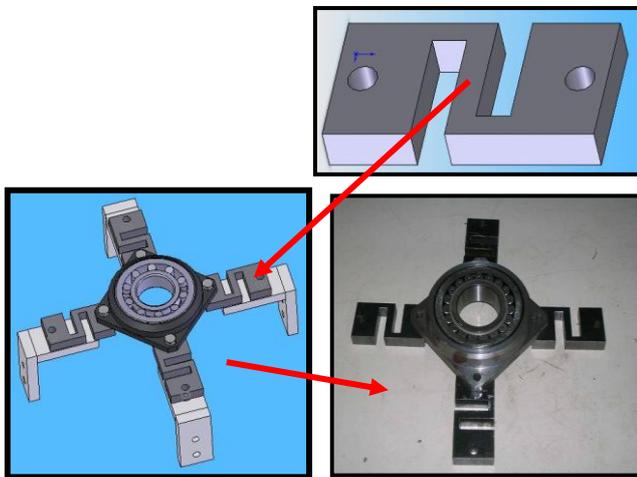


Figura 3. Suspensão Elástica

- *Volante de Inércia*

Conforme apresentado na figura 4, um volante de Inércia foi dimensionado e construído de forma a simular as características dinâmicas de inércia da turbina hidráulica, incluindo a possibilidade de desbalanceamentos deliberadamente impostos.

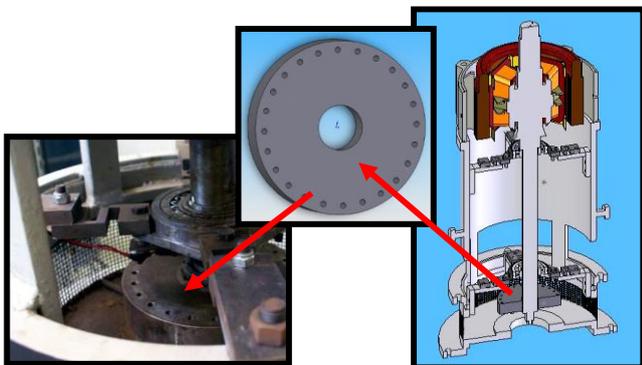


Figura 4. Volante de Inércia

- *Fonte de excitação para o rotor*

Dimensionado o campo de excitação do gerador, foi especificada e adquirida uma fonte de corrente / tensão controlável para variar o campo do rotor.

- *Árvore do Rotor*

Este elemento, de fundamental importância para a simulação, foi redimensionado a partir do rotor do grupo motor-gerador e usinado de forma a se atingir parâmetros de rigidez à flexão e de inércia compatíveis com os requisitos de semelhança projetados. Para se evitar as dificuldades construtivas de um eixo vazado como no protótipo, a semelhança geométrica no modelo foi preterida em favor da semelhança no que concerne às forças elásticas devido à rigi-

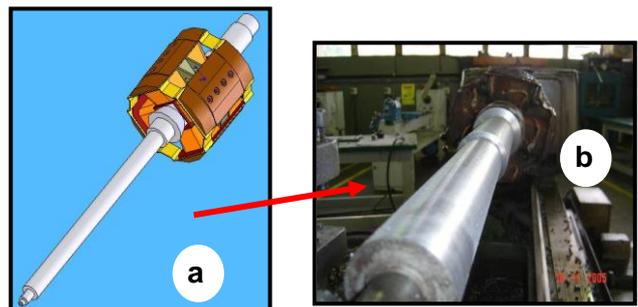


Figura 5. Rotor do Grupo Motor-Gerador sendo reprojetoado - a e sendo usinado - b

dez à flexão. As figuras 5a e 5b ilustram a modelagem e a usinagem do rotor nestas etapas de projeto.

- *Mancais de escora e mancais guia para o rotor*

Dois mancais de rolamento foram dimensionados para as condições de ensaio projetadas. Embora ambos possam resistir a cargas axiais, apenas o superior (figura 4a), mancal radial e de escora, junto ao gerador está apoiado de forma a resistir a estes carregamentos. O segundo mancal (figura 4b), junto ao volante que substitui a turbina, se comporta apenas como mancal guia (resistindo a cargas radiais).

- *Caixa dos mancais*

As caixas dos mancais foram projetadas e dimensionadas para permitir acoplamento dos mancais à suspensão elástica com a menor inércia possível, figura 6. Este cuidado procurou manter a proporção adequada da inércia do mancal no modelo reduzido, conforme indicado pela Análise Dimensional.

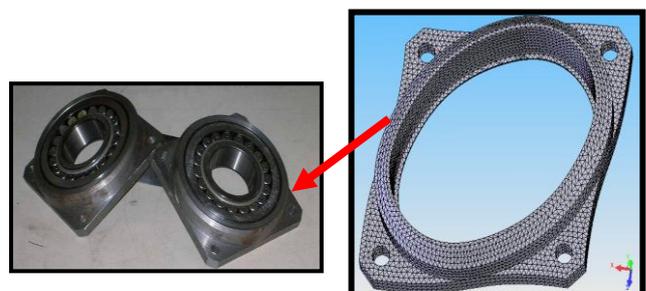


Figura 6. Caixa dos Mancais

- *Variador de Frequência e motor*

O Variador de Frequência foi dimensionado para acionamento do motor com velocidades controladas (figura 7).

Um suporte em "L" para o motor posiciona o mesmo para acionamento na vertical.

- *Controle de gap no entreferro*

A montagem final foi concebida, conforme figura 8, de forma a permitir o movimento do estator do gerador (1) em relação à carcaça (2) que é solidária ao rotor (3) e assim permitir a regulação do *gap* no entreferro ou, mais precisamente, permitir que a excentricidade do rotor em relação ao estator fosse controlada.

- *Alinhamento entre motor e rotor*

O alinhamento foi garantido através de um mecanismo de apoios reguláveis sob o suporte do motor (figura 7b) mantendo as tolerâncias de alinhamento compatíveis com os requisitos do acoplamento elástico empregado na bancada.

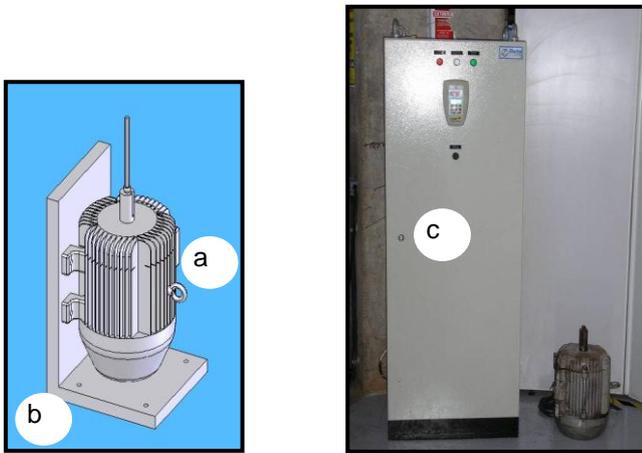


Figura 7. a) Motor, b) Suporte do Motor, c) Variador de Frequência

- *Alimentação do rotor*

A concepção, construção e montagem da alimentação do rotor foi realizada através de "escovas" de grafite com pistas de cobre. Tal dispositivo, fixado ao estator, conforme figura 9, se ajusta e se acomoda automaticamente quando se altera o *gap* entreferro. As escovas são energizadas por uma fonte de alimentação controlada.

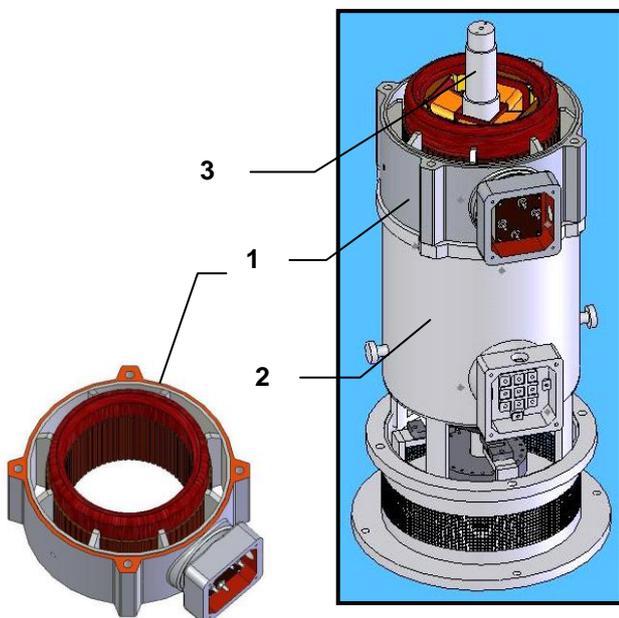


Figura 8. Acoplamento Elástico

C. Instrumentação da Bancada

A bancada foi instrumentada e foi concebido um sistema de aquisição, baseado em uma plataforma LabView, para e monitoração e controle de seus parâmetros de operação, ver figura 10.

Uma mesa de controle bem como um painel para monitoração da bancada foram construídos.

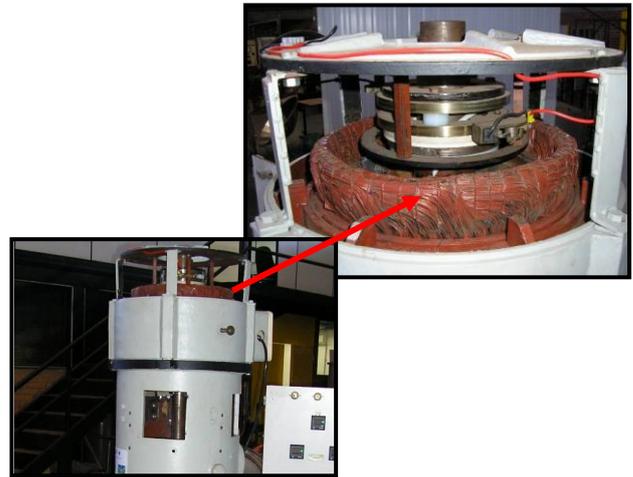


Figura 9. Detalhe da alimentação do rotor

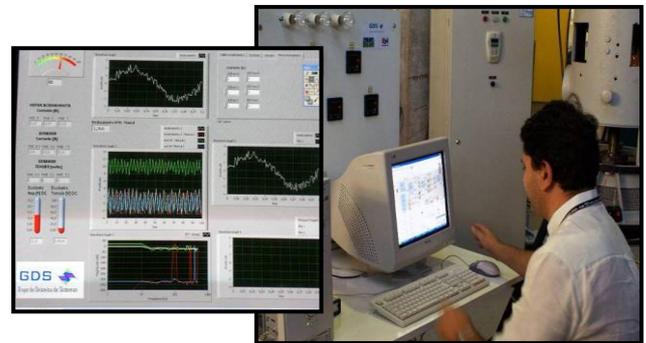


Figura 10. Bancada de Controle e Instrumentação

III. ENSAIOS DA BANCADA

De forma a caracterizar as propriedades dinâmicas do rotor, da suspensão desenvolvida, e da estrutura como um todo foram concebidos e realizados diversos ensaios para:

- Medir a rigidez da suspensão e do mancal projetados.
- Medir os momentos de Inércia do rotor (figura 11).
- Avaliar propriedades modais do rotor livre-livre.
- Avaliar propriedades modais da bancada

Foram ainda feitos ensaios e procedimentos de correção de forma a assegurar características e a confiabilidade metrológica da bancada:

- Calibração do *gap* no entreferro
- Alinhamento entre motor e rotor
- Fixação da base da bancada
- Balanceamento do rotor



Figura 11. Ensaio para avaliar o Momento Polar de Inércia do Rotor

Determinadas as características da Bancada, foram monitoradas as características dinâmicas da mesma, dentre as quais a órbita junto ao gerador é apresentada na figura 12.

Finalmente foram realizados ensaios para levantar as características operacionais da bancada de forma a assegurar requisitos de projeto, características e a confiabilidade da

bancada. Baseados nos resultados alcançados foram confeccionados materiais didáticos para realização de um curso de treinamento para a ELETRONORTE.

Finalmente foram realizados ensaios para levantar as características operacionais da bancada de forma a assegurar requisitos de projeto, características e a confiabilidade da bancada. O resultado obtido para o primeiro e segundo modos naturais de vibração da bancada construída na escala 1:14,8, foram obtidos por análise modal e são apresentados na figura 13. Quando comparados aos respectivos modos de vibração obtidos pela simulação numérica da 3ª máquina de Coaracy (protótipo) permitem avaliar a proximidade de comportamento dinâmico entre o protótipo e o modelo desenvolvido.

Um modelo com semelhança dinâmica perfeita deveria apresentar um Fator de Escala de Freqüência λ_f igual ao inverso do fator de escala geométrico:

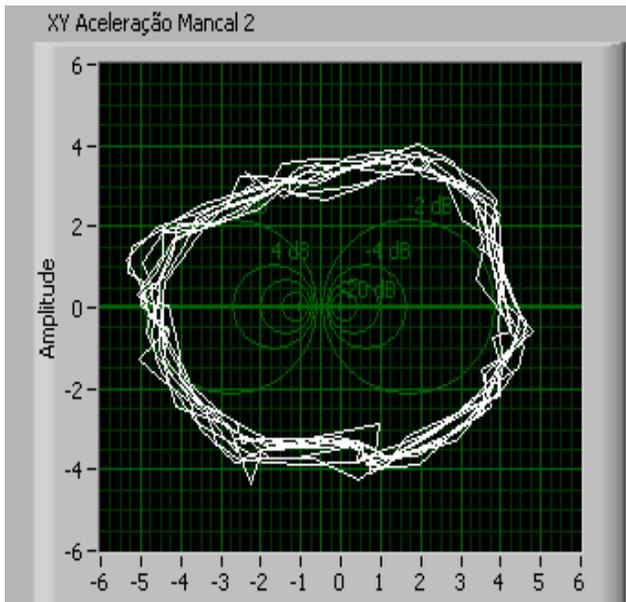
$$\lambda_f = \frac{1}{\lambda_L}$$

Isto é, para o caso em questão:

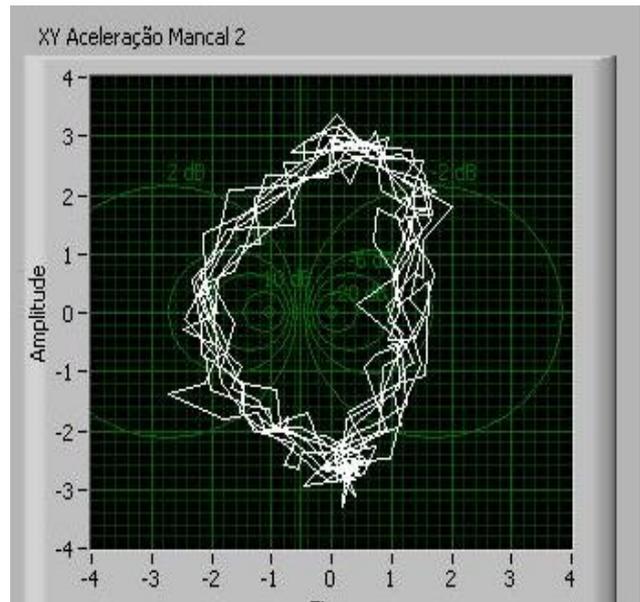
$$\lambda_f = \frac{f_{n_Bancada}}{f_{n_Coaracy}} = 14,8$$

Onde $f_{n_Bancada}$ é uma freqüência natural da bancada e $f_{n_Coaracy}$ é a freqüência natural correspondente da máquina 3 da UHE de Coaracy Nunes.

Esta relação para a bancada ficou em torno de $\lambda_f = 11,9$, indicando alguma não semelhança, já esperada, entre a bancada e o protótipo. Posteriormente poderemos introduzir fatores de correção, mas a proximidade do comportamento modal já pode ser bem observada nas figuras 13 e 14.



a



b

Figura 12. Órbita do rotor na posição do gerador, junto ao mancal de escora, para duas velocidades: a) 1818 rpm e b) 1622 rpm

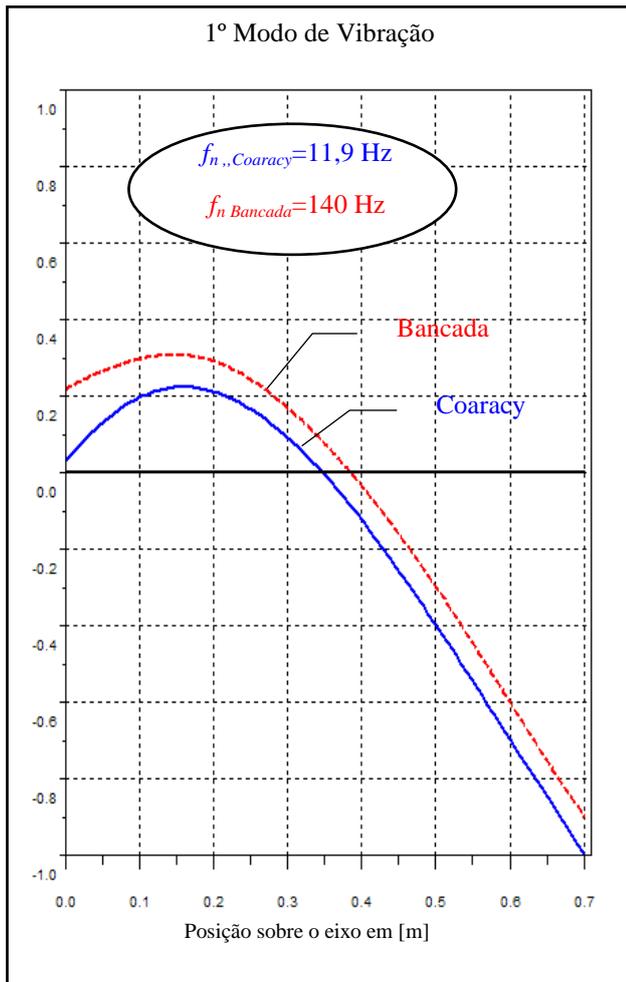


Figura 13. Comportamento do 1º Modo da bancada

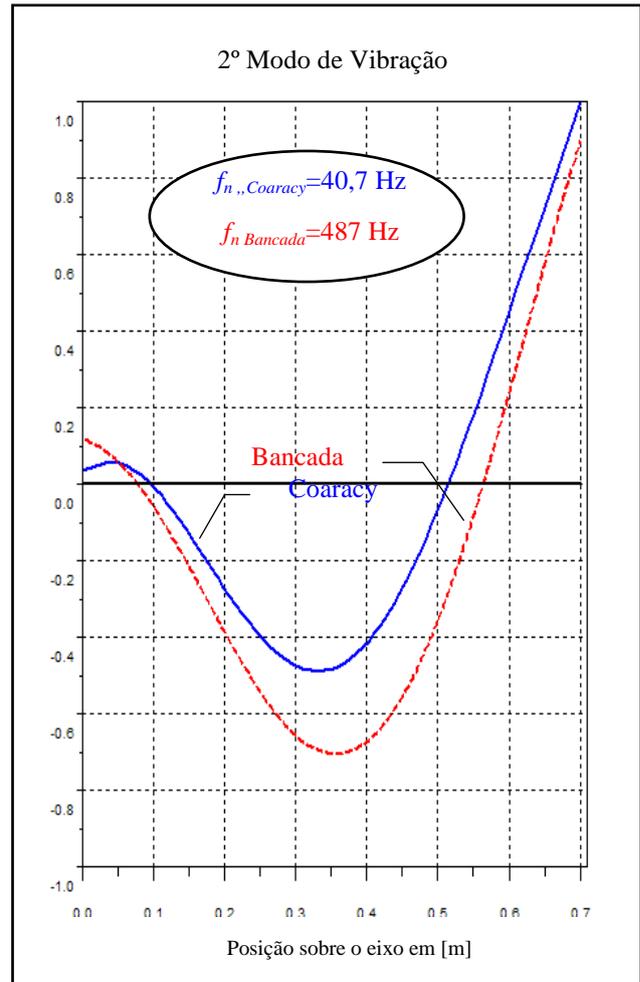


Figura 14. Comportamento do 2º Modo da bancada

IV. RESULTADOS ALCANÇADOS

Os resultados alcançados são apresentados em dois blocos mais relevantes. A saber:

A. Desenvolvimento de Protótipo

O resultado mais expressivo do projeto se materializa na concepção, desenvolvimento e produção de uma bancada experimental para simulação de comportamento dinâmico de hidrogeradores. Este resultado acompanhado dos estudos sobre critérios de semelhança entre modelo (Bancada) e protótipo (3ª máquina da UHE de Coaracy Nunes) permite o estudo, treinamento e pesquisa de diversos fenômenos envolvendo a dinâmica de hidrogeradores.

A bancada construída e instrumentada, ver figura 15, vem a constituir-se em uma ferramenta flexível para simulação do comportamento dinâmico de hidrogeradores.

Estudos sobre Análise Dimensional e Semelhança foram desenvolvidos de forma a permitir uma correlação entre os fenômenos dinâmicos observados na bancada e aqueles que ocorrem no protótipo (em escala 1:1).

Tal bancada permitirá ainda a validação de modelos numéricos que estão sendo utilizados e desenvolvidos (dentro de outros projetos no âmbito do CTNERG) para a simula-

ção do comportamento dinâmico e de metodologias de monitoração de vibrações em hidrogeradores pela ELETRONORTE.

Conforme especificado nos objetivos do projeto, este permitiu a disponibilização de uma bancada experimental para fins didáticos e de pesquisa.

B. Formação de Recursos Humanos / Capacitação

Além de pesquisa, a bancada também está preparada para ser utilizada em treinamento e capacitação de pessoal técnico, contribuindo para a compreensão dos fenômenos envolvidos na dinâmica de hidrogeradores. Para tanto será realizado um curso de curta duração para treinamento de pessoal da ELETRONORTE.

Dois alunos de Mestrado e dois outros de Iniciação Científica estão sendo orientados com abordagem experimental junto à UnB, usando a bancada para simulação de problemas em hidrogeradores trabalhando com temas relacionados a:

- Análise Dimensional e semelhança em Dinâmica de Rotores
- Balanceamento de Rotores
- Vibrações Não Lineares
- Projeto e Dimensionamento de Mancais



Figura 15. Montagem final da Bancada

Igualmente importante foi a qualificação da própria equipe de trabalho do GDS – Grupo de Dinâmica de Sistemas diretamente envolvida com o projeto.

V. CONCLUSÃO

Considerando os resultados alcançados, tanto na formação de recursos humanos como na materialização de uma bancada com o duplo propósito de treinamento e de pesquisa, podemos considerar que o projeto foi desenvolvido plenamente a contento. A competência adquirida capacita a equipe para projetos mais avançados aplicados ao estudo do comportamento dinâmico de hidrogeradores. Mais especificamente, a abordagem numérica, a simulação por modelos reduzidos, os estudos da excitação por desbalanceamentos mecânico e magnético, assim como o tratamento de sinais e monitoração de vibrações são áreas em que o Grupo de Di-

nâmica de Sistemas – GDS pode contribuir de forma expressiva com a pesquisa científica e tecnológica.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sato, K. *Numerical Investigation Into the Effects of a Radial Gap on Hydraulic Turbine Performance*, IMechE 2001, Vol 215, Part A.
- [2] Oliveira, A. G. *Técnicas de Caracterização de Excitações em Máquinas Rotativas*, tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Junho, 1999.
- [3] Carneiro, F.L. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*, 2ª ed., Editora UFRJ, 1996.
- [4] Lattfeld, A. H., Grein, H.; Dörfler, P. *Intense System Vibration in Hydroplants*, Water Power Dam Construct. 1981, 33(3), 34-37.
- [5] Meirovitch, L. *Elements of Vibration Analysis*, Mc Graw-Hill, 1986.
- [6] Q.W. Liang, C.G. Rodriguez, E. Egusquiza, X. Escaler, M. Farhat and F. Avellan, Numerical Simulation of Fluid Added Mass Effect on a Francis Turbine Runner, *Computers & Fluids*, In Press, Corrected Proof, Available online 17 January 2007.
- [7] S. Rothberg and J. Bell. On the Application of Laser Vibrometry to Translational and Rotational Vibration Measurements on Rotating

Shafts, Measurement, Volume 35, Issue 2, March 2004, Pages 201-210.

- [8] António Dente, Máquinas de Corrente Contínua - Máquinas Eléctricas IST - Ano Lectivo 2004/05
- [9] Características e Especificações de Geradores – WEG – Curso - WEG-DT-5
- [10] M. Kostenko & L. Pietrovsky – Electrical Machines - Foreign Languages Publishing House – Moscow, 1985.
- [11] Lalanne, M. and Ferraris, G., 1998, “Rotordynamics Prediction in Engineering”, John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England.
- [12] Pereira, J. C., 2003, “Introdução à Dinâmica de Rotores”, Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [13] Cameron, T. M., Griffin, J. H., 1989, “An Alternating Frequency Time Domain Method for Calculating the Steady State Response of Nonlinear Dynamic Systems”, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 56, No. 1, pp. 149-154.
- [14] Cardona, A., Lerusse, A. and Géradin, M., 1998, “Fast Fourier Non-linear Vibration Analysis”, Computational Mechanics, Vol. 22, No. 2, pp. 128-142.
- [15] Géradin, M., Rixen, D., 1997, “Théorie des Vibrations – Application à la Dynamique des Structures”, 2ème édition, Masson.
- [16] Guo, D., Chu, F. and Chen, D., 2002, “The Unbalanced Magnetic Pull and its Effects on Vibration in a Three-Phase Generator with Eccentric Rotor”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 254, No. 2, pp. 297-312.

a

b

Figura 12. Órbita do rotor na posição do gerador, junto ao mancal de escora, para duas velocidades: a) 1818 rpm e b) 1622 rpm