

# Desenvolvimento de Metodologias Avançadas para Modernização de Turbinas Hidráulicas

Antonio C. P. Brasil Junior, José Alexander Araújo  
Universidade de Brasília  
Departamento de Engenharia Mecânica

Cid Antunes Horta, Carmo Gonçalves  
ELETRONORTE S/A

**Resumo - Este projeto teve como objetivo geral o desenvolvimento de estudos avançados no sentido de contribuir com conhecimentos nacionais para a modernização do parque de turbinas hidráulicas instalado no país. Mais especificamente foram abordados os aspectos metodológicos associados à reconstrução virtual da máquina, sobre a análise da hidrodinâmica interna, sobre a estimativa de vida de componentes mecânicos, sobre o comportamento dinâmico de rotores, assim como sobre a estratégia de atualização de sistemas de monitoração de turbinas e geradores.**

## 1. INTRODUÇÃO

A crise energética brasileira do começo do século 21 é caracterizada em grande parte pela carência de investimentos públicos para a implantação de novas unidades geradoras, principalmente durante as duas últimas décadas. Na espera da transição de um modelo de Estado empreendedor, para um modelo neoliberal onde os investimentos no setor de energia elétrica deveriam ser supridos em parte pela iniciativa privada, a crise se instala, exigindo medidas emergenciais no sentido de evitar colapsos de fornecimento de energia elétrica. O reaquecimento da economia brasileira do final de século, em conjunto com a ocorrência de anomalias climáticas, que reduziram drasticamente o volume de reservatórios de hidrelétricas, colocam problemas a serem resolvidos no que tange o setor de geração. No contexto das políticas públicas para o setor de energia elétrica, esforços importantes de investimento são planejados para o início do milênio, com ênfase na instalação de novas unidades geradoras tanto termelétricas quanto hidrelétricas. Um esforço nacional baseado em programas de conservação de energia também se encontra em curso.

Neste meio tempo, as usinas hidrelétricas brasileiras operaram em regime de situação limite. O volume de água dos reservatórios é utilizado em suas últimas reservas, algumas máquinas operam em condição de sobrecarga e períodos de interstício de manutenção preventiva são estendidos ao máximo. São necessárias soluções técnicas criativas no sentido de assegurar a integridade de máquinas e sistemas, retirando o máximo de eficiência energética e financeira do processo de geração. Este estado de crise no setor não durará pouco tempo e a pressão sobre a demanda de geração será mantida durante os próximos anos, embora se possa prever que a situação será um pouco mais branda com a entrada de operação de novas unidades geradoras termelétricas e com a ocorrência de situações climáticas um pouco mais favoráveis. Esforços do planejamento energético nacional devem ser mantidos, visando a instalação das unidades propostas no Programa Avança Brasil e na utilização de soluções alternativas de curto prazo, no sentido de aumentar a eficiência de unidades geradoras já instaladas.

Este projeto de pesquisa, desenvolvido entre os anos de 2002 e 2004, se insere no contexto da busca de soluções alternativas para a geração de energia com base hídrica. O principal eixo de ação concentra-se no desenvolvimento de metodologias avançadas para a repotenciação de unidades geradoras, visando a elaboração de diagnósticos de pontos de funcionamento em sobrecarga e estratégias de modificação ou substituição escalonada de partes de rotores de turbinas e geradores. A modernização (e repotenciação) é uma solução técnica de custo reduzido (comparativamente à construção de uma nova usina), que vem se mostrando viável em muitas situações de operação de turbinas hidráulicas já instaladas no mundo. Entende-se por

modernização, tanto a estratégia de substituição de partes e instrumentação buscando um ganho substancial de eficiência da máquina através da agregação de novas tecnologias, como também a busca da expansão de limites operativos das máquinas hidrogeradoras, sem a troca substancial de partes, visando com isso a obtenção de alguns megawatts adicionais ao sistema energético.

## 2. A MODERNIZAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS EM UM CONTEXTO DE PROJETOS DE P&D

Uma boa parte de turbinas hidráulicas instaladas no país possui tempo de operação que datam de mais de 25 anos. Tais máquinas foram concebidas em um estágio de desenvolvimento tecnológico que não agregava os atuais conhecimentos metodológicos de projetos associados ao aumento de eficiência hidráulica, às técnicas de controle e monitoração da geração e às técnicas avançadas de projeto de partes rotativas. O impacto de metodologias atuais no projeto de máquinas hidráulicas permite a concepção de máquinas de 10-20% mais eficientes que projetos desenvolvidos na década de 60, por exemplo. O potencial hidrelétrico poderia ser incrementado em algumas centenas de megawatts, somente com a modernização de unidades geradoras instaladas no país, proporcionando também uma maior confiabilidade na operação de velhas máquinas com maior eficiência do sistema integrado turbina-gerador. O procedimento atual de modernização de uma máquina hidráulica envolve um conjunto de metodologias avançadas de projeto do conjunto rotor-gerador, baseadas em técnicas de solução computacional dos problemas de mecânica dos fluidos, dinâmica de máquinas rotativas, comportamento mecânico de partes e eletrodinâmica do gerador. Estas metodologias proporcionam avaliações de baixo custo do ganho de eficiência em uma máquina, em face dos investimentos financeiros de troca de partes. O desenvolvimento de uma base tecnológica nacional para a modernização de máquinas hidráulicas é uma ação de P&D viável que se insere dentro do escopo de cooperação de Universidades e Concessionárias de geração de energia elétrica. O domínio de técnicas avançadas de modelagem mecânica e simulação computacional, atualmente disponível em algumas universidades Brasileiras, podem ser agregados ao conhecimento instalado em Empresas Brasileiras, no sentido de proporcionar estudos específicos para a análise prévia de viabilidade

econômica para modernização de máquinas hidráulicas instaladas no país.

Este projeto teve como objetivo geral o desenvolvimento de estudos avançados no sentido de contribuir com conhecimentos nacionais para a modernização do parque de turbinas hidráulicas instalado no país. Mais especificamente, os seguintes aspectos foram abordados:

- Definição de uma Usina Hidroelétrica Piloto (UHE-P) para ser utilizada como Benchmark para as diferentes metodologias desenvolvidas;
- Desenvolvimento de metodologias metrológicas 3D para a reconstrução virtual de máquinas em operação, como subsídio de análise de engenharia reversa;
- Desenvolvimento de Pesquisa avançada na modelagem e simulação de escoamentos turbulentos no interior de turbinas hidráulicas (CFD -*Computational Fluid Dynamics*), visando avaliações de viabilidade de ganho de eficiência hidráulica por meio da modificação de rotores de turbinas e distribuidores;
- Desenvolvimento de Metodologias de avaliação de falhas de componentes de máquinas rotativas devido à fadiga, considerando a modificação de regimes de funcionamento;
- Desenvolvimento de metodologias numéricas para estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas;
- Desenvolvimento de metodologias de monitoração;

As metodologias acima descritas foram integradas e aplicadas fornecendo ferramentas e procedimentos importantes para análise de projetos de modernização por parte do corpo técnico da ELETRONORTE.

## 3. METODOLOGIA ADOTADA E RESULTADOS ALCANÇADOS

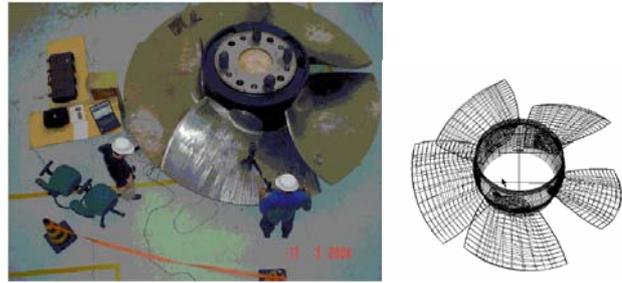
A metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto é descrita abaixo, considerando as diferentes áreas temáticas da pesquisa.

## Usina Hidroelétrica Piloto – UHE-P

A linha mestra para abordagem metodológica consistiu em aplicar os conhecimentos desenvolvidos durante o projeto no processo de modernização da turbina hidráulica da UHE Coaracy Nunes, escolhida em comum acordo com o corpo técnico da ELETRONORTE. Esta UHE foi utilizada como *Benchmark* para as diferentes metodologias desenvolvidas no âmbito do projeto. Simulações computacionais e modelos mecânicos foram testados com base em ensaios preliminares em campo sobre esta máquina piloto.

### Reconstrução Metrológica de Turbinas Hidráulicas

A etapa de reconstrução do desenho mecânico das partes da turbina hidráulica constituiu etapa fundamental para o ensaio virtual da máquina através da simulação computacional. Esta etapa teve início com o processo de digitalização de algumas plantas das turbinas da Usina de Coaracy existentes na ELETRONORTE. O programa *SolidWorks*® foi utilizado para produzir a biblioteca digital contendo as referidas plantas. Entretanto, em grande parte dos casos, desenhos precisos identificando as dimensões e formas do rotor não estavam disponíveis ou não foram encontrados. Nestes casos um trabalho de engenharia reversa utilizando um braço de medição por coordenadas foi necessário[1] (Fig. 1). Para a caixa espiral, o tubo de sucção, os dutos e os distribuidores encontraram-se plantas com as dimensões e formas previstas que possibilitaram o processo de digitalização. Uma metodologia de reconstrução da geometria de rotores em escala reduzida também foi desenvolvida utilizando um sistema de construção de modelos a partir de imagens de profundidade, conjunto de câmaras CCD e emissores de planos Laser. A construção do modelo é feita com transformações de coordenadas de imagens bidimensionais para coordenadas tridimensionais após varredura do objeto-alvo com o plano Laser. O desenvolvimento do sistema de visão metrológica tem aplicação limitada a objetos de pequenas dimensões, o que restringiu a sua aplicação e estudo à ambiente de laboratório.



**Figura 1** - Medição e reconstrução do rotor da máquina 2 da UHE-Coaracy Nunes

### CFD para o projeto de Turbomáquinas

O objetivo desta parte do projeto foi o de desenvolver metodologias de modelagem de escoamentos turbulentos no interior de turbinas hidráulicas assim como validar modelos de turbulência no usados no código CFX-TASCFLOW® (Fig. 2). A ênfase temática da modelagem da turbulência foi baseada em generalizações anisotrópicas do modelo de turbulência à duas equações. Casos de validação para escoamentos na região intrapás, na caixa espiral e no tubo de sucção foram avaliados[2][3][4].

Nesta etapa simulações de diferentes geometrias de turbinas axiais foram estudada, tanto para casos onde resultados experimentais são disponibilizados na literatura, como também para a geometria específica da UHE-Coaracy Nunes. Foram executadas simulações criteriosas com um onze tipos de modelos de turbulência diferentes, envolvendo um exaustivo estudo de malha e de convergência para o uso do código CFX-5. Os resultados obtidos demonstraram como podem ser obtidos resultados realistas para este tipo de simulação, ressaltando que modelos de turbulência mais complexos devem ser utilizados somente em condições onde as condições de contorno para todas as variáveis sejam disponíveis e precisas.

Os resultados com modelos de fechamento em primeira ordem apresentaram uma excelente aderência com os resultados disponibilizados em workshops internacionais, tanto na descrição na complexa topologia do escoamento, como na obtenção de parâmetros médios de coeficiente de pressão e de swirl.

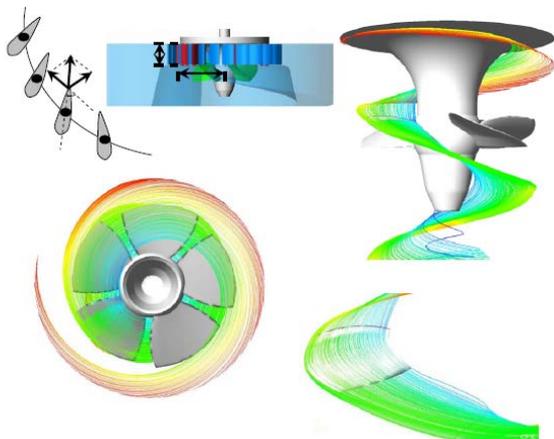


Figura 2 – Simulação numérica do escoamento em rotores axiais

### Análise de Falhas - Fadiga

Os procedimentos de repotenciação das turbinas hidráulicas geram condições mais severas de solicitações mecânicas, não previstas nos projetos originais como, por exemplo, a aplicação de maiores torques sobre a turbina, maiores flutuações das forças de interação entre o fluido e as pás da turbina associadas ao regime turbulento do escoamento, etc. Conseqüentemente, questões de integridade estrutural tais como falha por fadiga crescem em importância, influenciando fortemente nas soluções propostas para a modernização da planta. Neste contexto, foram desenvolvidas metodologias para: (i) a determinação numérica dos esforços atuantes sobre os componentes estruturais da turbina sob as novas condições de operação e (ii) avaliações da integridade estrutural e vida útil de tais componentes [5]-[8]. O método dos elementos finitos foi empregado na análise de tensões e deformações e experimentos com materiais constituintes de componentes de hidrogeradores foram conduzidos, fornecendo subsídios para o emprego de critérios de resistência à fadiga (Fig. 3).

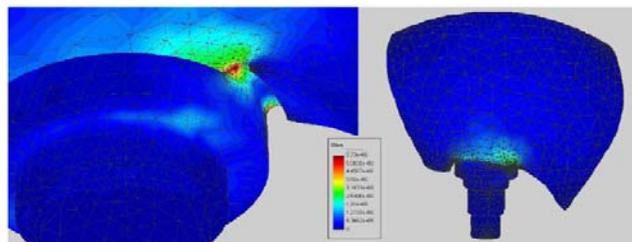


Figura 3 – Concentração de tensões em pás de turbinas Kaplan

### Comportamento Dinâmico de Máquinas Rotativas

A análise modal permite o cálculo das frequências e modos próprios de vibração da estrutura, bem como a análise espectral e a síntese de subestruturas. A aplicação dessas técnicas no estudo dos conjuntos turbina-gerador permite tratar as particularidades dos componentes, bem como as não-linearidades das ligações com reduzidos tempo e esforço de cálculo. As técnicas de análise modal permitem a identificação de parâmetros dissipativos presentes nos componentes e nas ligações entre eles, e a utilização de subestruturas permite a otimização do projeto do conjunto turbina-gerador com reduzido custo computacional. A influência do escoamento sobre a resposta dinâmica da pá também foi avaliada no sentido de quantificar as tensões e deslocamentos sofridos pela pá [9]-[11];

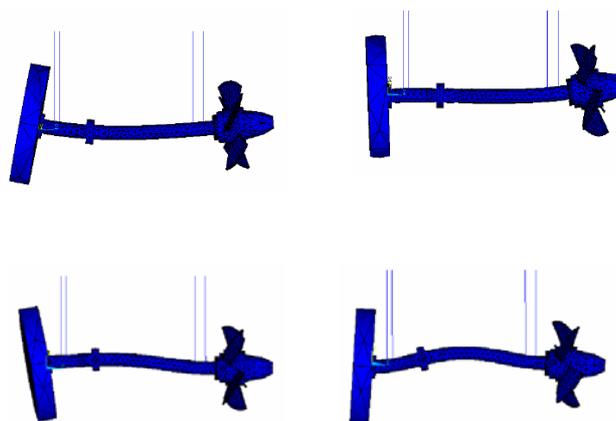


Figura 4 – Modos de vibração do conjunto turbina-gerador UHE Coaracy Nunes

### • Monitoração de Turbinas Hidráulicas

Uma estudo de monitoramento remoto foi proposto de maneira a facilitar o diagnóstico prévio de

funcionamento da máquina original. O monitoramento da unidade hidrogeradora é de fundamental importância para o planejamento da área de manutenção. Com esta informação em mãos pode-se programar a parada das unidades geradoras somente quando for necessário, contribuindo portanto, para aumentar a confiabilidade do sistema e evitar interrupções na geração. Devido à distância até a UHE de Coaracy Nunes e a dificuldade de efetuar-se paradas de máquinas que coincidissem com as necessidades de implementação do projeto, esta metodologia foi desenvolvida em uma máquina disponível na Usina Hidroelétrica do Paranoá.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] PIRATELLI FILHO, A., TURQUETTI, R., ARAUJO, J. A., BRASIL JUNIOR, Antonio C P., **“Measurement of Kaplan Hydraulic Turbine Runners Using Coordinate Measuring”**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, CONEM, 10 a 13 de agosto, 2004, Belém, PA. Anais do III Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - CONEM. , 2004.
- [2] SOUZA, L. C. E. O. and Brasil, A. C. P. J., **“Assessment of Turbulence Modelling for CFD Simulations Into Hydroturbines: Spiral Casings”** p. 1-10, In: 17<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, COBEM 2003, São Paulo: Editora da USP, 2003.
- [3] Pereira, R. M. and Brasil, A. C. P. J., **“One-Equation Turbulence Model Study and Comparison with CBS Method”**, In: Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences –ENCIT 2004.
- [4] Moura, M. D.; Brasil, A. C. P. J. and Souza, L. C. E. **“Assessment of Turbulent Modelling for CFD Simulation In Hydroturbines: Draft Tubes”**. In: 1<sup>st</sup> CFX South American Users Conference October, 20-22, 2003 - Florianópolis - SC – Brazil.
- [5] ARAÚJO, J.A., and MAMIYA, E. N., **“The application of a mesoscopic scale approach in fretting fatigue, J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences”**, Vol. XXV, 2003, pp. 16-20.
- [6] ARAÚJO, J.A., NOWELL, D. and VIVACQUA, R. C., **“The use of multiaxial fatigue models to predict fretting fatigue life of components subjected to different contact stress fields”**, Fatigue Fract Engng Mater Struct 27, 2004 pp. 967-978.
- [7] ARAÚJO, J.A. & NOWELL, D., **“The effect of rapidly varying contact stress fields on fretting fatigue, International Journal of Fatigue”**, 24, 2002, pp. 763-775.
- [8] ARAÚJO, J. A.; MAMIYA, E. N.; CASTRO, R. V., **“On the application of the Dang Van criterion in fretting fatigue. Part I: Assessment of contact size effects”**. In: 17<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, COBEM 2003, São Paulo: Editora da USP, 2003.
- [9] VINAUD, J. F. , Diniz, A. C. G. C., **“Comparação de Métodos para Estudo Dinâmico de Hidrogeradores”**, IV Simpósio Mineiro de Mecânica Computacional - SIMMEC 2004, Itajubá/MG, 2004.
- [10] VINAUD, J. F. , Diniz, A. C. G. C., **“Comparative Study of Component Mode Synthesis Methods Applied to Structure Dynamics”**, Proceeding of the 17<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2003, São Paulo - SP. 2003.
- [11] VINAUD, J. F. , Diniz, A. C. G. C., **“Use of Simplified Models in the Dynamic Study of Hydrogenerators”** (Aceito para Publicação), Proceeding of the XI DINAME, 2005, Ouro Preto - MG.p. 1-10.