

# ENGENHARIA REVERSA APLICADA NA RECONSTRUÇÃO DE ROTOR DE TURBINA

Reynaldo Turqueti-Filho, Antonio Piratelli-Filho, José Alexander Araújo e Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto. Engenharia Mecânica, 70910-900, Brasília, DF, Brasil, Tel./Fax: (0xx61) 3072314

E-mail: [rturqueti@uol.com.br](mailto:rturqueti@uol.com.br)

[pirateli@unb.br](mailto:pirateli@unb.br)

[alex07@unb.br](mailto:alex07@unb.br)

[brasil@enm.unb.br](mailto:brasil@enm.unb.br)

*Resumo. A maioria das turbinas hidráulicas no Brasil tem operado há mais de 20 anos e algumas unidades não têm uma documentação técnica adequada dos seus projetos mecânicos. Isto pode estar relacionado ao fato que os conhecimentos metodológicos de projeto sofreram modificações significativas ao longo destas décadas e atualmente, os novos recursos empregam processos digitais modernos usando computadores. Uma pesquisa está em andamento na Universidade de Brasília em parceria com a Eletronorte para modernização de turbinas hidráulicas e a aplicação de técnicas de engenharia reversa foi requerida para recuperar algumas das partes dessas turbinas. Este trabalho propõe desenvolver um procedimento para recuperar as dimensões e a geometria de rotores de turbinas aplicando técnicas da engenharia reversa. A metodologia desenvolvida utilizou como modelo um rotor de turbina colocado no Laboratório de Metrologia na Universidade de Brasília. O rotor de turbina foi medido com uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) – modelo braço articulado e os pontos de coordenadas obtidos foram armazenados em um arquivo de dados. Esse arquivo de dados foi então convertido ao formato IGES e transferido para um programa de CAD. O programa de CAD usado foi o SolidWorks e a sequência do procedimento de reconstrução das superfícies e sólidos foi descrita e apresentada.*

*Palavras-chave: Turbina hidráulica, Engenharia reversa, MMC braço articulado.*

## 1. INTRODUÇÃO

Grande parte das turbinas hidráulicas do país está em operação há mais de 20 anos e foram construídas em um estágio de desenvolvimento tecnológico que não agregava os atuais conhecimentos metodológicos de projeto. Em alguns casos a documentação técnica dessas turbinas, principalmente aquela relativa aos desenhos mecânicos é incompleta ou inadequada. Mesmo aquelas turbinas que apresentam uma documentação recuperada com desenhos auxiliados por computador (CAD), não oferecem condições de viabilizar um novo projeto para sua modernização.

Com a disponibilidade das novas técnicas de processamento digital, usadas na recuperação de desenhos mecânicos e das modernas tecnologias de fabricação, torna-se viável um projeto de modernização dessas turbinas hidráulicas com a reconstrução de

algumas de suas partes. Dentre essas partes, a reconstrução do rotor da turbina requer cuidados especiais na recuperação dos desenhos mecânicos, devido a geometria complexa de suas pás.

A engenharia reversa faz parte dessas novas técnicas. Basicamente, uma das etapas da engenharia reversa é a criação de um modelo tridimensional a partir de um objeto já existente. Se o objeto for simples, os instrumentos tradicionais de medição são suficientes para a criação do modelo. Caso contrário, normalmente a digitalização dos pontos de coordenadas (X,Y,Z) ou das curvas que definem a superfície geométrica do modelo é feita utilizando uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) ou seu modelo mais versátil: o braço articulado ou braço para medição de coordenadas (CMA - coordinate measuring arms).

A aplicação do braço articulado tem-se destacado nesta etapa da engenharia reversa, principalmente para a recuperação dos desenhos mecânicos de objetos com geometrias complexas. Nos trabalhos de (Dumoulin et al, 1994 e Robert and Pastorel, 2000) o braço articulado foi utilizado como um dos procedimentos para medir rotores de turbinas. Dumoulin et al (1994) compara o método da digitalização com braço articulado portátil a outros dois métodos para medir a geometria de um rotor de turbina Francis. Um dos métodos utiliza a clássica técnica do gabarito e o outro um LASER Interferométrico 3D. A conclusão do trabalho é que o método da digitalização foi o melhor pela medição direta dos pontos, o mais rápido, com menor custo e menos tempo de processamento de CAD. Robert and Pastorel (2000) comparam o método da digitalização com braço articulado portátil com um método combinando a precisão de um teodolito e um dispositivo de medição a laser. Nas suas conclusões eles afirmam, entre outras coisas, que usar o dispositivo a laser cria alguns problemas como a mobilidade dos instrumentos, a confiabilidade para trabalhar em ambiente industrial, a interferência de vibrações e a quantidade de dados para tratamento, dificultando a identificação de erros.

Os dados obtidos com a digitalização podem ser transferidos a um programa de CAD para a criação de um modelo virtual do objeto. No trabalho de (Thompson et al, 1999), a criação desse modelo é proposta em termos de uma engenharia reversa baseada em propriedades características (features) de fabricação como primitivas geométricas. Os autores dizem que essa abordagem tem duas vantagens sobre as práticas existentes. Uma delas é que os modelos resultantes podem ser importados diretamente para programas de CAD paramétricos, sem perder informações inerentes em uma representação baseada em propriedades características. A outra vantagem é que os modelos produzidos são altamente precisos mesmo quando os dados da digitalização 3D apresentam erros substanciais.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um procedimento, aplicando técnicas de engenharia reversa para recuperar os desenhos mecânicos, ou seja, recuperar a forma e as dimensões de um rotor de turbina. A metodologia desenvolvida utilizou como modelo um rotor de turbina que foi mapeado e medido com o auxílio de uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) modelo Braço Articulado existente no Laboratório de Metrologia da Universidade de Brasília.

Na digitalização com o braço articulado os pontos de coordenadas obtidos foram transformados em curvas e convertidos ao formato IGES (Initial Graphics Exchange Specification) e depois, transferidos ao programa de CAD SolidWorks® para ser criado o modelo sólido virtual do rotor de turbina.

## **2. ARRANJO EXPERIMENTAL**

A figura 1 mostra o esquema do arranjo experimental empregado para realizar as medições do rotor da turbina.

A mesa usada como base de apoio é uma mesa de desempenho medindo 1m de largura por 2m de comprimento. Sua estrutura é de aço fundido e está apoiada sobre uma armação rígida

com sapatas de sustentação reguláveis para ajustes necessários.

O rotor tomado como modelo foi de uma turbina Francis do tipo Caixa Espiral com rotor aberto, 1,6 KW de potência e montada em uma bancada de teste. O diâmetro externo do rotor é de 160mm com um furo de 22mm de diâmetro para fixação no eixo de transmissão. As pás do rotor são em número de sete e estão assentadas em uma superfície côncava.

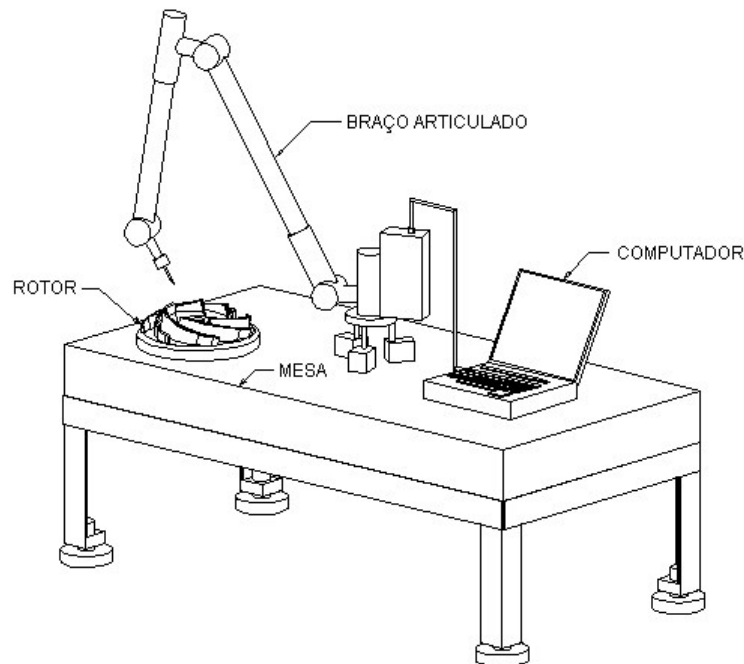


Figura1. Esquema do Arranjo Experimental.

O braço articulado usado foi uma Máquina de Medir por Coordenadas modelo ARM100 fabricado pela ITG ROMER, com 3 probes ou sensores de contato: dois esféricos e um de ponta seca. Esse modelo de braço articulado tem 6 graus de liberdade ou 6 eixos articulados permitindo medir superfícies em um volume esférico com 2500mm de diâmetro e com uma incerteza de medição de 0,07mm.

Cada um dos eixos tem um encoder para transmitir sua posição angular relativa ao controle do braço. Quando o sensor toca um ponto de coordenadas da superfície do rotor, todos os encoders transmitem suas posições relativas ao controle do braço determinando a posição do ponto. Essa posição é transmitida para o computador.

O computador usado foi um notebook pentium 4 com 256Mb e HD 40Gb, tela de 15” Matriz Ativa – CD/RW e Fax Modem 56k – Rede 10/100. Neste computador está instalado o programa G-Pad desenvolvido para trabalhar integrado ao braço articulado na medição e digitalização 3D. Esse programa recebe o sinal enviado pelo controle do braço articulado e o armazena na memória do computador.

### 3. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

O rotor de turbina e o braço articulado foram fixados sobre a mesa de desempenho para evitar movimentos relativos indesejáveis e a ocorrência de erros grosseiros na medição. O rotor foi fixado por meio de grampos de fixação com as lâminas voltadas para cima permitindo melhor acesso do sensor do braço articulado. O braço articulado foi fixado por

meio da sua base magnética com 3 apoios. O sensor utilizado nas medições foi o de ponta seca para evitar desvios devido às características do rotor.

Para simplificar ainda mais o trabalho de medição, a origem do sistema de coordenadas do braço articulado foi transferida para um ponto da linha de centro do rotor. Como a face posterior do rotor está apoiada sobre a superfície da mesa de desempenho, o novo ponto de origem pode coincidir com essa superfície.

Para transferir a origem do sistema de coordenadas, primeiramente, determina-se com o sensor do braço articulado, no mínimo 3 pontos na superfície da mesa de desempenho. Esses pontos são enviados ao programa G-Pad para estabelecer um plano de referência. Em seguida, movimenta-se o sensor do braço para determinar 3 ou mais pontos na circunferência externa do rotor. Com esses pontos no programa G-Pad calcula-se um círculo. Esse círculo deve ser projetado no plano de referência determinado anteriormente para garantir o alinhamento com esse plano. O centro do círculo projetado passa a ser a origem do novo sistema de coordenadas para a medição das superfícies do rotor de turbina.

### 3.1. Medição do Corpo do Rotor

A medição do corpo do rotor foi feita ao longo de uma linha radial, iniciando no diâmetro externo e passando pela superfície de assentamento das pás do rotor. A figura 2 mostra de maneira esquemática o sensor do braço articulado em posição, medindo os pontos de coordenadas para ficarem posicionados radialmente.

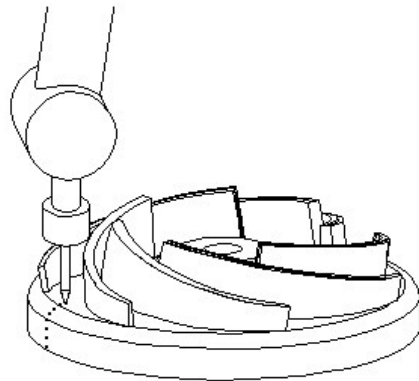


Figura 2. Medição do corpo do rotor.

### 3.2. Medição das Pás do Rotor

A medição das pás do rotor foi feita em apenas uma já que as outras são idênticas. A figura 3 mostra a sua esquerda, o sensor do braço articulado em posição, medindo os pontos de uma das superfícies da pá. À direita, essa figura mostra um corte ilustrativo da pá, onde o sensor do braço articulado está medindo os pontos da superfície oposta. Observa-se pela figura 3 que os pontos medidos nas duas superfícies foram posicionados de modo a formar uma seção da pá.

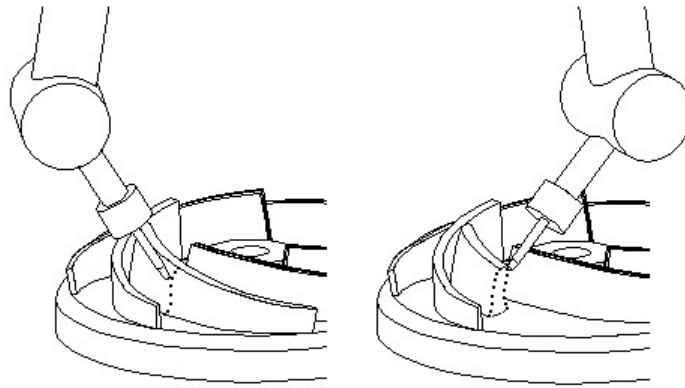


Figura 3. Medição da pá do rotor.

O procedimento descrito foi repetido, enfileirando as seções formadas ao longo das duas superfícies opostas da pá. Toda essa preparação facilita, posteriormente, a criação do modelo virtual do rotor de turbina.

#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

Foram determinados 25 pontos de coordenadas ao longo da linha radial do corpo do rotor. A esses pontos foi ajustada uma curva do tipo Spline com o auxílio do programa G-Pad, como mostra a figura 4 a sua esquerda.

Por outro lado, foram determinadas 32 curvas sobre as duas superfícies da pá, cada uma com aproximadamente 10 pontos de coordenadas. Cada curva, do tipo Spline, foi ajustada aos pontos com o auxílio do programa G-Pad. A figura 4, a sua direita mostra as curvas obtidas e as linhas guias traçadas na parte superior, ligando duas a duas às curvas da mesma superfície.

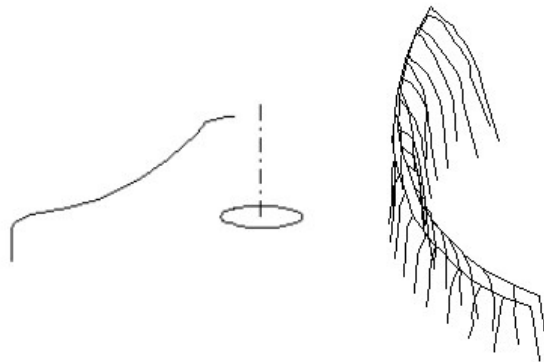


Figura 4. Curvas do rotor e da pá

O número de pontos estabelecidos para cada curva considerou um distanciamento máximo entre eles de 5mm. Ao fazer os ajustes das curvas o programa G-Pad apresentou desvios médios em torno de 0,20mm sendo que o valor da incerteza de medição do braço articulado é de 0,07mm.

As curvas ajustadas pelo programa G-Pad foram gravadas em um arquivo IGES ou arquivo padrão usado como interface na troca de dados entre diferentes sistemas de CAD/CAM.

O tempo requerido na preparação para medir o rotor de turbina ficou em torno de 40 minutos, contando com a transferência da origem do sistema de coordenadas. O tempo para a

digitalização das superfícies do rotor foi relativamente pequeno. Considerando todas as curvas: aproximadamente 10 minutos. Isso forneceu uma média de 32 pontos digitalizados por minuto. Para efeito de comparação, no trabalho desenvolvido por (Dumoulin et al. 1994) também utilizando um braço articulado, foi medida uma turbina Francis de 4,40m de diâmetro em 5 horas, fornecendo uma média de 30 pontos digitalizados por minuto.

O arquivo IGES, com as curvas características do corpo do rotor e da pá, foi transferido para o programa SolidWorks onde foram criados os respectivos sólidos virtuais. Para criar o sólido do corpo do rotor, foi utilizado um perfil fechado formado pela curva da figura 4 e por linhas retas complementares. Esse perfil fechado foi transformado em um sólido de revolução, mostrado na figura 5 onde se destaca, no corte, o perfil de formação.

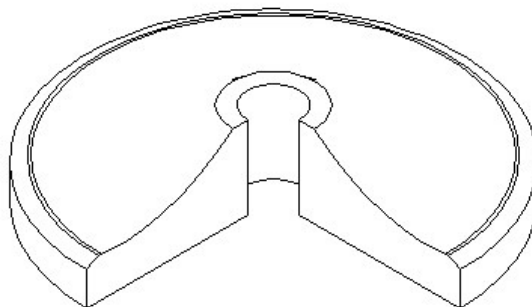


Figura 5. Sólido virtual do rotor

Para criar o sólido virtual da pá, as curvas à direita da figura 4, foram transformadas, primeiro em superfícies e depois, entre cada duas delas foi criado um sólido parcial da pá. A figura 6, na sequência da esquerda para a direita, mostra a formação das duas primeiras superfícies e depois, a criação do primeiro sólido parcial entre elas.

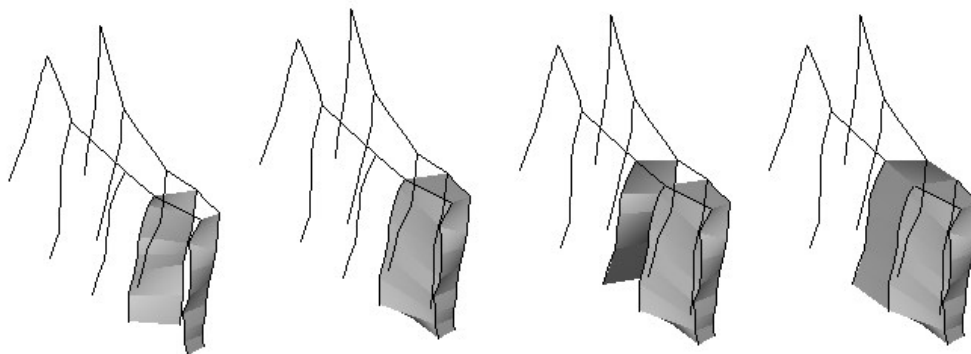


Figura 6. Sequência de criação dos sólidos parciais da pá

Em seguida, a sequência da figura 6 mostra a formação da terceira superfície e após, a criação do segundo sólido parcial entre elas. Esse procedimento foi repetido até a criação de todos os sólidos parciais que formam a pá do rotor.

Finalizando, foi feita uma cópia circular do sólido da pá em torno do eixo do rotor para criar todas as sete pás. O tempo total de processamento em CAD para o rotor da turbina foi de aproximadamente 4 horas.

A figura 7 mostra uma imagem fotorealística do modelo virtual do rotor de turbina já concluído e ao lado uma montagem parcial da turbina com os modelos da caixa espiral e do distribuidor que também foram medidos com o procedimento desenvolvido.

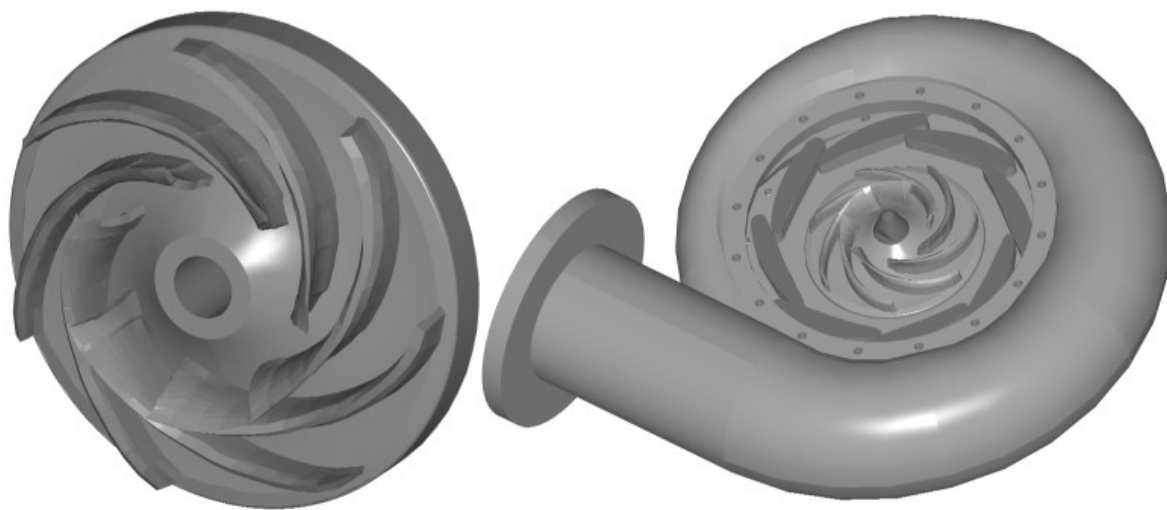


Figura 7. Rotor e montagem parcial da turbina Francis

O programa SolidWorks também permite criar folhas de desenho 2D com vistas ortogonais e auxiliares, cortes e seções do rotor da turbina, fazendo o respectivo dimensionamento de todo o conjunto.

## 5. CONCLUSÕES

Uma revisão bibliográfica mostrou que a utilização de um braço articulado (CMA) para a medição direta dos pontos de coordenadas apresenta vantagens com relação a outros equipamentos, pela sua flexibilidade e rapidez na criação de um modelo tridimensional. Os tempos de preparação e digitalização gastos neste trabalho, foram semelhantes aos obtidos por outros autores.

Todas as curvas ajustadas aos pontos de coordenadas apresentaram desvios médios da ordem de 0,15mm e a incerteza de medição do braço articulado é de 0,07mm.

O procedimento desenvolvido com orientação prévia da distribuição das curvas requer pouco tempo de processamento em CAD para criar o modelo sólido virtual do rotor de turbina hidráulica.

O modelo sólido criado, além de possibilitar a recuperação da forma e das dimensões do rotor de turbina, também é fundamental na utilização de sistemas CAD/CAM e em processos e simulações computacionais para avaliações de falhas de componentes, no comportamento dinâmico do conjunto rotor-gerador e ganho de eficiência hidráulica.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro e técnico da Superintendência de Expansão e Geração da Eletronorte S.A. e o apoio técnico de Tarsis de Oliveira Queiroz, da Universidade de Brasília na digitalização com o braço articulado.

## 7. REFERÊNCIAS

Dumoulin, Ch., Roy, A. J., Ayotte, F., Rodier, S. and Pastorel. H., 1994, "Geometry recovery of a Francis runner prototype at site", 17<sup>th</sup> IAHR Symposium, Beijing, China.

Thompson, W.B., Owen, J. C., James, H., Stark, S. R. and Henderson, T. C., Feb. 1999, "Feature-based reverse engineering of mechanical parts", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 1, 10p.

Robert, M. and Pastorel, H., Aug. 2000, "Geometry Measurement of Hydraulic Turbine Runners", Hydraulic Machinery and Systems 20<sup>th</sup> IAHR Symposium, Charlotte, North Carolina. U.S.A.

## **REVERSE ENGINEERING APPLIED TO TURBINE RUNNER RECONSTRUCTION**

**Abstract.** The majority of hydraulic turbines in Brazil has been operating almost 20 years and for a number of them there is no mechanical drawings available. This may be related to the fact that design methodology had suffered significant modifications along these decades and nowadays resources employ modern digital processing using computers. Research is being carried out at University of Brasilia and Eletronorte to increase the performance potencial of existing power plants by considering reverse engineering techniques. This work proposes the development of procedures to recover the dimensions and geometry of turbine runners applying reversal engineering techniques. The methodology was developed using a turbine runner model placed at Metrology Laboratory, University of Brasilia. The turbine runner was measured using a Coordinate Measuring Machine (CMA) and several surface coordinate data points were determined. The computer data file was then converted to IGES format file and exported to a CAD software. The CAD software used was SolidWorks and the sequence of procedures reconstruction of surfaces and solids was described and presented.

**Keywords.** Hydraulic turbine, reverse engineering, CMM portable arm.