



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH - 23
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**RECONSTRUÇÃO VIRTUAL DE ROTORES DE TURBINAS HIDRÁULICAS USANDO MÁQUINA DE MEDIR
POR COORDENADAS**

Antonio Piratelli Filho *
Universidade de Brasília

José Alexander Araújo
Universidade de Brasília

Antonio C.P. Brasil Júnior
Universidade de Brasília

Carmo Gonçalves
Eletronorte

Cid Antunes Horta
Eletronorte

RESUMO

A repotenciação de turbinas hidráulicas é uma questão que tem sido abordada recentemente devido à eminente saturação do potencial hidroelétrico no país. A técnica empregada para efetuar a repotenciação inicia com análise dos protocolos operacionais e de manutenção da unidade, inspeção no campo, realização de testes na unidade e determinação ou recuperação do projeto original das turbinas hidráulicas em operação. Esta última etapa pode envolver medições de campo para obter a geometria e dimensões dos elementos construtivos das máquinas em operação, como os rotores das turbinas. Neste trabalho, foi empregada uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) para efetuar a reconstrução virtual do rotor de uma turbina hidráulica Kaplan, pertencente à Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, AP, da Eletronorte. Um rotor Kaplan de 4300 mm de diâmetro foi medido com uma MMC, determinando coordenadas de pontos das superfícies das pás, do cubo e da ogiva. A reconstrução do modelo de projeto auxiliado por computador (CAD) do rotor foi feita usando o programa Rhinoceros. A metodologia adotada permitiu a construção de modelos CAD adequados para a realização das etapas de simulação computacional.

PALAVRAS-CHAVE

Repotenciação, Engenharia Reversa, Medição de turbinas hidráulicas.

1.0 - INTRODUÇÃO

A repotenciação de turbinas hidráulicas é uma questão que tem sido abordada recentemente devido à eminente saturação do potencial hidroelétrico no país. A técnica empregada para efetuar a repotenciação inicia com análise dos protocolos operacionais e de manutenção da unidade, inspeção no campo, realização de testes na unidade e determinação ou recuperação do projeto original das turbinas hidráulicas em operação. Esta última etapa pode envolver medições de campo para obter a geometria e dimensões dos elementos construtivos das máquinas em operação, como os rotores das turbinas. Isto implica na medição das características geométricas dos rotores das turbinas e construção de um modelo de projeto auxiliado por computador (CAD).

A medição de rotores de turbinas visa determinar a geometria e dimensões das pás, da ogiva e do cubo, para posteriormente efetuar simulações computacionais e introduzir modificações que resultem em ganho de potência da turbina. A pá do rotor da turbina é um exemplo de peça de grande porte cujas superfícies apresentam forma livre, projetada para proporcionar o máximo rendimento (rotação) durante a passagem de um fluxo de água pela turbina. Esta classe de superfícies apresenta um papel importante atualmente em aplicações onde aspectos funcionais e estéticos são requeridos. Isto se deve, em grande parte, aos avanços das técnicas de fabricação e da

precisão com que peças complexas podem ser fabricadas. O aperfeiçoamento dos processos passou a requisitar equipamentos mais precisos para a inspeção de superfícies complexas com forma livre.

Dentre os métodos para avaliar a qualidade de peças como as pás de rotores de turbinas, pode ser mencionado o uso de gabaritos (*templates*), de rastreador laser (*laser tracker*) e de Máquinas de Medir por Coordenadas modelo braço articulado (MMC) (1). O emprego de uma MMC é apontado como o método mais adequado, na medida em que proporcionam menor tempo de inspeção e menor custo (1). O emprego de sensores para a medição sem contato usando uma MMC pode ser feito, porém para medição nas instalações das usinas hidroelétricas esta técnica pode ser dificultada devido às condições ambientais como umidade e temperatura muito elevadas.

Um artigo publicado por Dumoulin et alii (1) relata uma metodologia para a recuperação de turbinas hidráulicas modelo Francis. Os autores executaram uma comparação dos métodos de medição desta turbina aplicados nas instalações de uma usina hidrelétrica e concluíram que o emprego de uma Máquina de Medir por Coordenadas modelo braço articulado (MMC) é vantajoso em relação ao emprego de um rastreador laser (*laser tracker*) e de gabaritos de medição (*templates*). Entretanto, apontaram dificuldades quando da medição com MMC relacionadas com a especificação de uma estratégia de medição e com a definição do tamanho amostral, ou seja, o caminho percorrido pelo apalpador da MMC e o número de pontos necessários para determinar na superfície das pás do rotor. Os efeitos destes itens devem ser sentidos na etapa de tratamento dos dados do arquivo com os pontos da superfície da pá do rotor.

A medição de pás das turbinas usando uma MMC é realizada de acordo com as seguintes etapas: posicionamento da máquina de medir, determinação de uma posição de referência na superfície da pá, determinação das coordenadas de pontos da superfície, armazenamento das coordenadas em arquivo de computador, conversão deste arquivo para outro em formato CAD, reconstrução do perfil da pá e do rotor no computador e comparação com as tolerâncias originais de projeto. Este procedimento de engenharia reversa pode ser usado para melhorar o projeto da pá da turbina, aplicando técnicas de simulação computacional no modelo CAD gerado, para analisar o efeito da forma da superfície no fluxo de água que passa pela turbina (1).

As principais fontes de erros podem ser destacadas: estratégia de amostragem e compensação do raio da ponta do apalpador. Uma técnica de compensação do raio da ponta do apalpador foi proposta por Ip e Loftus (2) para medir superfícies de forma livre com MMCs. Uma estratégia de medição destas superfícies foi proposta por Cho e Kim (3), baseada na análise da curvatura das superfícies de forma livre, e um critério para otimizar a distribuição e seqüência de pontos foi sugerido.

Outro problema relacionado à medição por coordenadas, empregando MMCs, é a rastreabilidade dos resultados das medições. Para que qualquer medição possa ser relacionada ao metro padrão, é necessário que a máquina de medição seja calibrada. Porém, as MMCs apresentam a particularidade de determinar coordenadas de pontos na superfície das peças e o volume de operação apresenta um número infinito de pontos. O método de calibração deveria possibilitar a verificação de todos os pontos no volume de trabalho e a respectiva incerteza de medição. Porém, parte dos métodos existentes visa apenas testar o desempenho de MMCs, verificando os erros de um número limitado de pontos do volume de trabalho da máquina através do emprego de aparelhos de precisão e de artefatos calibrados (4). Uma abordagem que tem sido cada vez mais aceita é a da MMC virtual, a qual possibilita a determinação da incerteza de medição para qualquer medida feita com a MMC (5). Através desta metodologia, a contribuição de todas as fontes de erro deve ser modelada matematicamente, usando as recomendações do Guia para Expressão da Incerteza de Medição - ISO GUM (6). Estes aspectos particulares da medição por coordenadas deverão ser investigados na seqüência deste projeto.

2.0 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E MEDIÇÃO DO ROTOR KAPLAN

Embora a metodologia desenvolvida possa ser aplicada a qualquer tipo de turbina, os resultados aqui apresentados foram obtidos para uma turbina Kaplan da usina hidrelétrica Coaracy Nunes, localizada no município de Ferreira Nunes no estado do Amapá, pertencente a Eletronorte. A dificuldade inicial no processo de reconstrução dos rotores reside na reconstrução do perfil da pá da turbina para armazenamento em arquivos de computador. O método escolhido para a medição deve permitir o transporte para executar as medições de campo, nas instalações da usina hidrelétrica, exigindo rapidez para adequação a um curto período de tempo, de forma que as condições adversas de temperatura e umidade não afetem o instrumento ou a qualidade das medições. Este método deve possibilitar o armazenamento do resultado em arquivos de computador, para posterior processamento, requerendo um equipamento de medição com software compatível com programas de projeto auxiliado por computador (CAD).

Considerações sobre o projeto dos rotores da turbina Kaplan são fundamentais para a escolha do método de medição. As tolerâncias de fabricação das pás destes rotores são estabelecidas de acordo com a norma IEC 60193 (7). Características construtivas do perfil da pá são controladas por tolerâncias, como o nariz do rotor, espessura máxima do rotor, espessura do rotor próximo à face de saída e ângulo máximo da lâmina. As tolerâncias da forma das superfícies das pás da turbina Kaplan são determinadas em função do diâmetro (D) do rotor da turbina, sendo que esta norma especifica uma tolerância de $\pm 0,1 \% D$. Na usina hidrelétrica piloto estabelecida para o desenvolvimento deste projeto, este diâmetro é de 4300 mm, o que resulta numa tolerância de 4,3 mm para o perfil da pá. O instrumento para verificar esta geometria deve apresentar uma incerteza de medição pelo menos 10 vezes menor, ou seja, incerteza menor do que 0,43 mm.

O método escolhido foi o de medição por coordenadas. Assim, baseado nas considerações de projeto mencionadas, uma Máquina de Medir por Coordenadas modelo braço articulado (MMC), modelo Arm 100, fabricada pela Romer foi especificada. Este equipamento, de origem francesa, apresenta uma estrutura em forma de braço articulado, com seis graus de liberdade e alcance esférico de 2,5 m, apresentando incerteza de medição de 0,07 mm. Um computador portátil (*Notebook*) é conectado a esta MMC para aquisição dos dados de medição e para o controle do processo de medição.

A extremidade do braço de medição apresenta um apalpador do tipo rígido, que serve para localizar os pontos na superfície da peça. Este apalpador pode ser uma esfera de aço ou rubi ou ainda possuir uma forma de agulha (ponta seca). Cada junta articulada apresenta um *encoder* para medição de ângulos, os quais são convertidos em coordenadas cartesianas pelo programa computacional G-Pad da máquina de medição. Com peso de 12 kg, incluindo o computador (*Notebook*), este equipamento pode ser transportado com facilidade para a realização das medidas no campo. Características dimensionais de outros componentes da turbina Kaplan, além das pás, podem ser medidas com este instrumento, como por exemplo, a ogiva do rotor.

3.0 - METODOLOGIA E RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE CAMPO

As medições de campo foram realizadas na Usina Hidroelétrica de Coaracy Nunes, da Eletronorte, localizada no estado do Amapá, Brasil. Dois rotores de turbina foram medidos, ambos do modelo Kaplan, chamados de rotor substituído (rotor que esteve em operação por 29 anos e que foi retirado de operação) e rotor novo (rotor em preparação para substituir o anterior). Para isto, a MMC foi deslocada para a localidade da Usina e montados sobre as superfícies das pás para executar a medição, conforme mostrado na Figura 1 para o rotor novo. Os dois rotores medidos estavam localizados fora do local de operação, um no setor de montagem da Usina aguardando a sua colocação para iniciar a operação (rotor novo) e o outro na área externa, retirado de operação (substituído).



FIGURA 1 – Rotor Kaplan novo durante de medição

Do rotor Kaplan substituído, foram medidas a ogiva e duas pás. A medição da ogiva foi feita tomando coordenadas de pontos do seu perfil, mais um círculo superior para fazer a reconstrução CAD. Foram medidos 24 pontos do perfil (opção conjunto de pontos no software G-Pad), mais 9 pontos do círculo (opção medir círculo no software G-Pad). A Figura 2 apresenta estes elementos geométricos, sendo que uma curva *polilíne* foi ajustada ao perfil da ogiva. A construção do modelo CAD da ogiva foi feita no software Rhinoceros, sendo que a curva *polilíne* foi utilizada sem nenhuma transformação ou tratamento. Assim, usando o comando SURFACE/SWEEP 1 RAIL, a *polilíne* do perfil foi rotacionada em relação ao círculo e a superfície externa da ogiva (modelo CAD) ficou como mostrado na Figura 3.

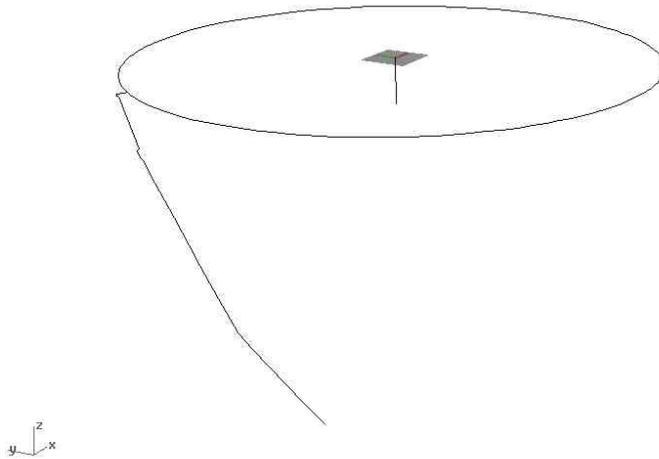


FIGURA 2 – Curvas resultantes da medição da ogiva do rotor Kaplan substituído

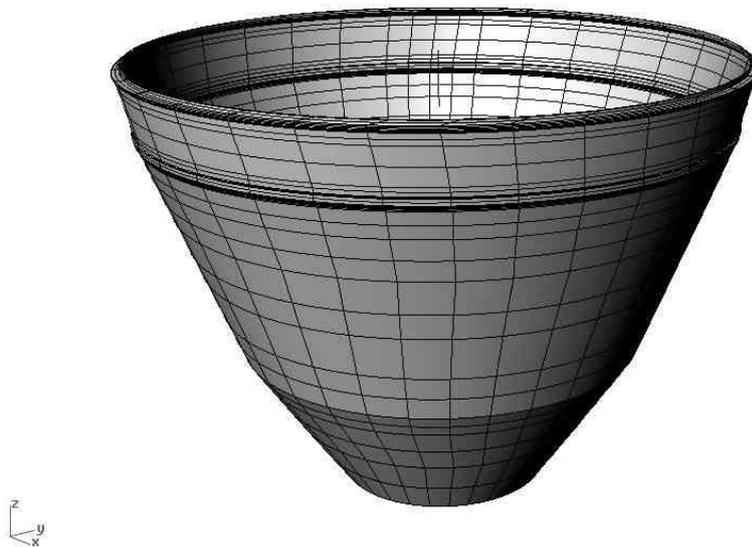


FIGURA 3 – Modelo CAD da ogiva

O modelo CAD do rotor substituído foi obtido medindo duas pás do rotor. Em cada pá, foram traçadas malhas (*grid*) de pontos nas duas superfícies de cada pá. A medição foi feita com 13 linhas por superfície da pá, determinando 9 a 10 pontos em cada linha, tomadas no sentido radial (26 linhas em cada pá). Cada conjunto de pontos obtido ao longo destas linhas foi ajustado por uma *spline*. O contorno de cada pá foi medido tomando 39 pontos na pá 1 e 38 pontos na pá 2, ajustando uma curva *poliline* para cada conjunto de pontos. O total de pontos medidos nas duas pás foi de 498 (243 pontos na pá 1 e 255 pontos na pá 2).

Além disto, foram medidos os círculos base de cada pá, determinando 9 pontos em cada um, o círculo superior com 9 pontos e o perfil do corpo do rotor, com 22 pontos. O tempo de medição foi de 40 minutos, equivalente ao tempo gasto na preparação para a medição. O tempo de processamento CAD foi de 40 minutos. A Figura 4 apresenta os dados obtidos após a medição com a MMC. A obtenção do modelo envolveu a editoração de cada linha spline no software CAD, ajustando uma curva NURBS com o comando EDIT/REBUILD. Com as curvas NURBS, as superfícies de cada face foram construídas usando o comando SURFACE/LOFT, ajustando uma superfície NURBS às curvas. A junção das duas faces foi realizada através da criação de superfícies em cada aresta e vértice pelo comando SURFACE/BLEND SURFACE e pela junção de todas as superfícies usando o comando EDIT/JOIN. As superfícies ajustadas correspondem a polinômios de baixo grau, conhecidas como superfícies NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline). Com o comando TRANSFORM/ARRAY/ALONG CURVE, foram geradas as outras três pás do rotor. O modelo CAD do rotor Kaplan substituído está mostrado na Figura 5.

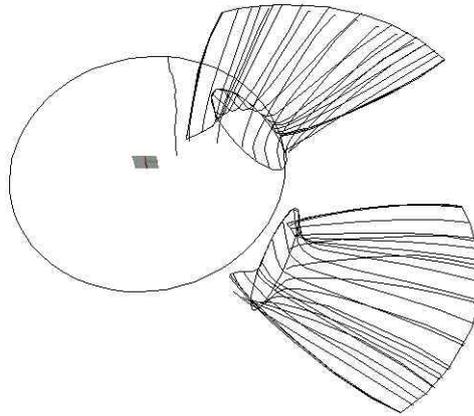


FIGURA 4 – Curvas resultantes da medição do rotor Kaplan substituído

Perspective

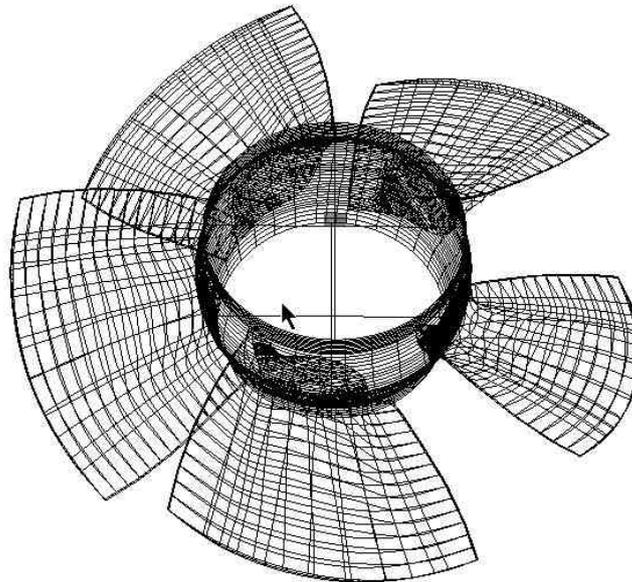


FIGURA 5 – Modelo CAD do rotor Kaplan substituído

A análise dos erros deste modelo foi feita verificando a distância entre os pontos medidos e a superfície CAD gerada e está apresentada na Figura 6. Nesta figura, pode ser observado que a grande maioria dos pontos (>90%) se encontra dentro de uma faixa de tolerância de 4 mm para o perfil da pá, sendo que as regiões que apresentaram desvios entre os pontos medidos e o modelo CAD entre 4 e 5 mm correspondem às arestas das superfícies das pás e à região próxima da base de fixação (cubo do rotor). As curvaturas destas localizações foram ajustadas pelo software CAD empregado, a partir das superfícies construídas das pás e do cubo do rotor. O ajuste destas superfícies de união pode ser refeito para minimizar estes erros, editando as superfícies NURBS que foram geradas com os dados da medição.

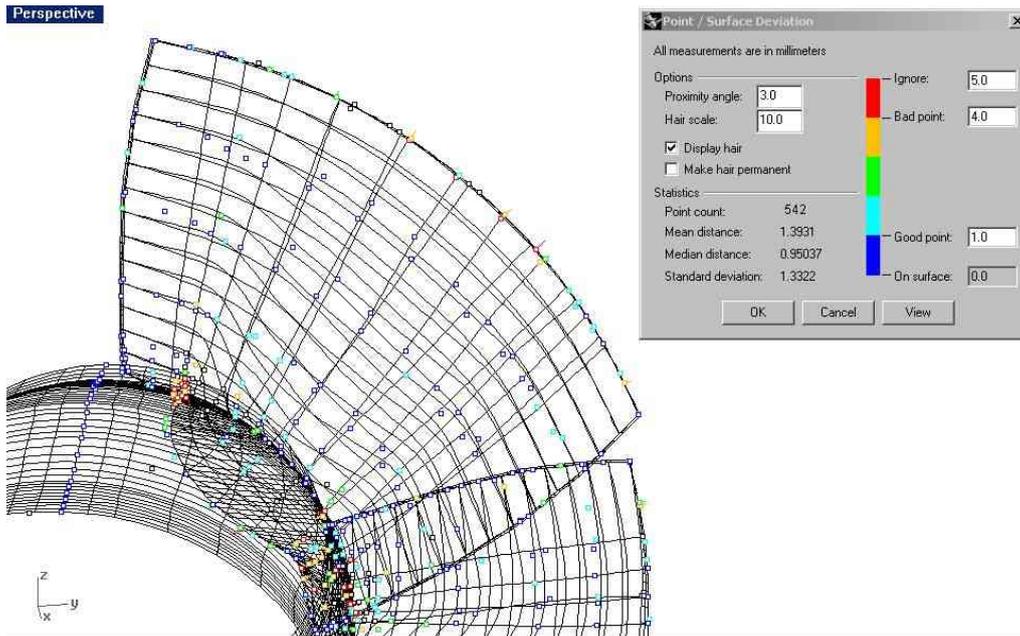


FIGURA 6 – Análise dos erros do modelo CAD do rotor Kaplan substituído

Para o rotor da turbina Kaplan nova, apenas uma pá foi medida com a MMC, pelo mesmo procedimento já descrito para a turbina Kaplan substituída. Assim, foram traçadas 16 linhas radiais na face superior e 17 linhas radiais na face inferior da pá, medindo 10 pontos em cada linha. Desta forma, foram obtidos 330 pontos da pá. O contorno da pá foi medido tomando 41 pontos a ajustando uma spline ao conjunto de pontos. Foi ainda determinado o círculo base da pá, com 9 pontos, e o contorno do perfil da base do rotor, com 12 pontos (ajuste polilínea). A Figura 7 mostra os resultados obtidos. O processamento CAD foi feito com o software Rhinoceros, usando a mesma seqüência de etapas da pá Kaplan substituída. Adicionalmente, foi gerado o corpo do rotor usando o comando SURFACE/SWEEP 1 RAIL, e o comando TRANSFORM/ARRAY/ALONG CURVE para gerar outras 4 pás idênticas à pá medida. A Figura 8 mostra o modelo CAD do rotor da turbina Kaplan “nova”. O tempo de medição foi de 40 minutos por lado, somado ao tempo de preparação para medição de 1 hora por lado, totaliza 3 horas e 20 minutos.

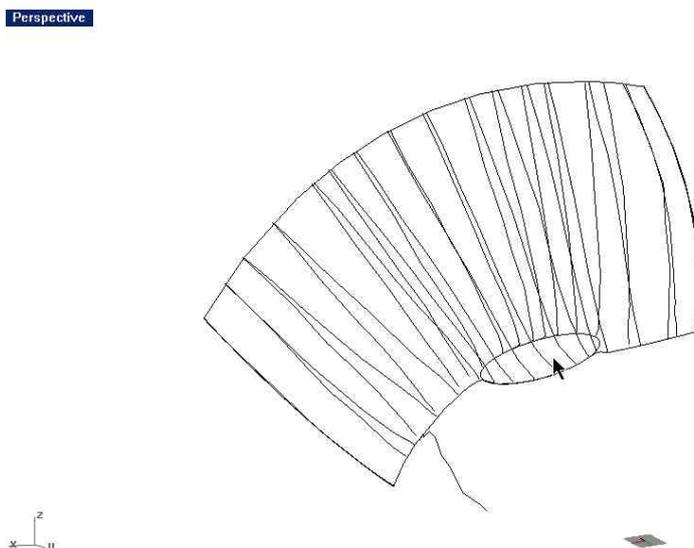


FIGURA 7 – Curvas resultantes da medição da turbina Kaplan nova

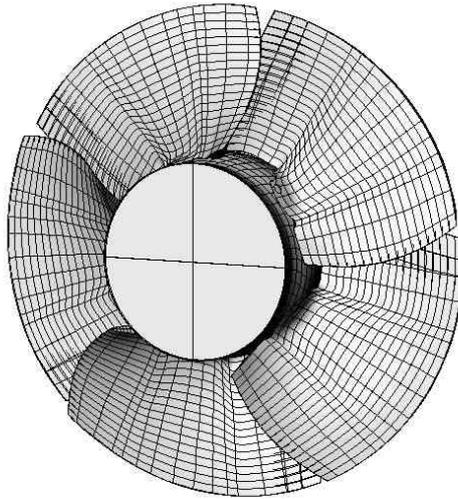


FIGURA 8 – Modelo CAD gerado para a turbina Kaplan nova

A análise dos erros do modelo CAD foi feita determinando as distâncias entre os pontos medidos e as superfícies NURBS geradas. A Figura 9 mostra estes resultados. Pode-se observar a grande incidência de pontos com distância menor que 1 mm (azul), com poucos pontos nas outras faixas (1 a 2 mm, 2 a 3 mm, 3 a 4 mm e 4 a 5 mm). Observa-se que alguns pontos apresentaram desvios maiores que 5 mm (vermelho), localizados em regiões da pá como contorno da superfície e curvatura próxima à base da pá (8 de 330 pontos). Como na superfície do rotor Kaplan substituído, as superfícies de união ou secundárias podem ser editadas, caso necessário, para reduzir o erro de ajuste.

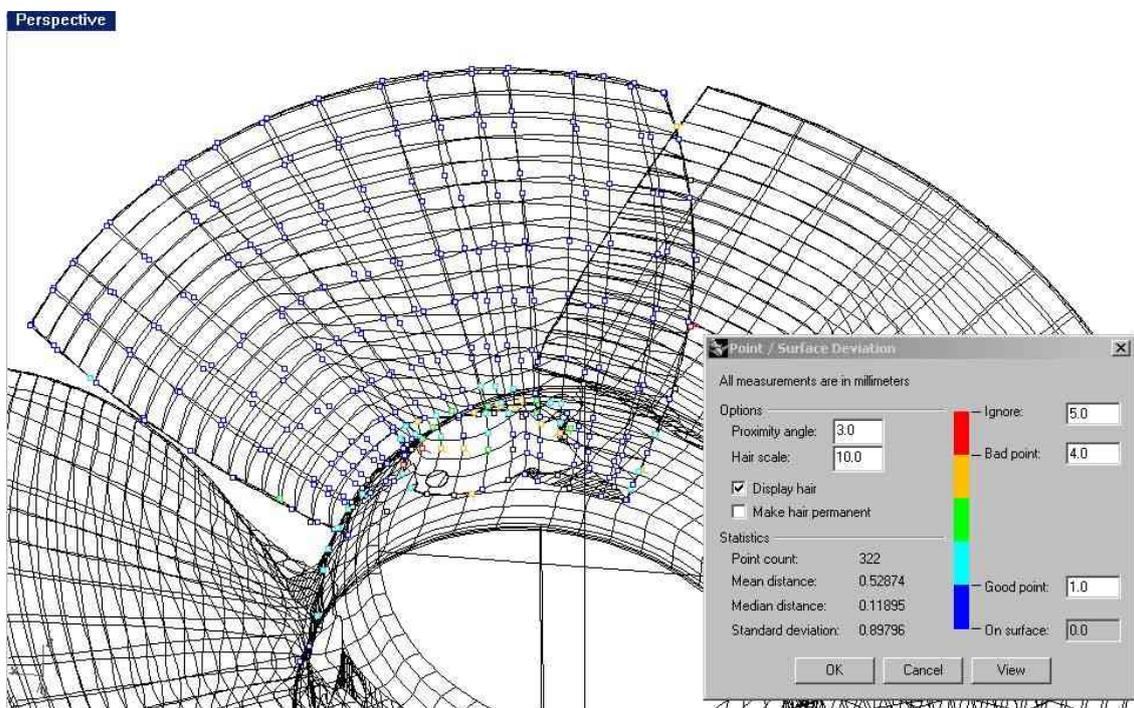


FIGURA 9 – Análise dos erros do modelo CAD da turbina Kaplan nova

4.0 - CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida para medição de rotores de turbinas hidráulicas Kaplan foi implementada e permitiu a criação de modelos CAD. A estratégia de medição desenvolvida envolveu a fixação da Máquina de Medir por

Coordenadas, a riscagem de uma malha de pontos nas superfícies das pás para a definição do número de pontos a medir e a seqüência e direção de aquisição dos pontos. O ajuste das curvas e das superfícies foi feito para ajustar polinômios de baixo grau, com pesos associados aos pontos de controle de cada curva (*Non-uniform rational B-Splines* ou NURBS).

A aplicação da metodologia às turbinas Kaplan nova e substituída da Usina Coaracy Nunes, da Eletronorte, permitiu fazer uma comparação das formas e dimensões de cada uma e analisar os erros das pás dos rotores em relação aos modelos CAD gerados. Os erros de ajuste dos pontos medidos em relação aos modelos CAD foram menores que 5 mm para o perfil das pás das turbinas nova e velha. Estes valores são reduzidos se comparados às dimensões do rotor Kaplan originais, de 4300 mm de diâmetro. Os tempos gastos na medição foram proporcionais ou inferiores aos tempos de preparação para medição, onde devem ser feitos o posicionamento da máquina de medir e a marcação das malhas de pontos nas superfícies das pás.

Futuros trabalhos podem direcionar para a aplicação desta metodologia em outros modelos de turbinas hidráulicas, como turbinas Francis. Além disto, uma avaliação mais rigorosa das fontes de erros pode contribuir para melhorar o ajuste do modelo CAD.

O levantamento dos perfis de rotores de turbinas, utilizando esta metodologia pode ser utilizado para realizar avaliações hidrodinâmicas de rotores de turbinas, tais como verificar distribuição da pressão e da velocidade e a avaliação de perdas de carga, permitindo executar uma otimização destes perfis numericamente. Os perfis levantados podem também ser utilizados para análise estrutural dos rotores e em projetos de turbinas homocinéticas.

5.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos Engenheiros e Técnicos da Eletronorte que atuam na Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, AP, bem como o apoio do técnico Tarsis de Oliveira Queiroz, da Universidade de Brasília, que contribuíram de forma decisiva para a realização da parte experimental deste trabalho.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dumoulin, Ch. et al. Geometry recovery of a Francis runner prototype at site. 17th IAHR Symposium, Beijing, China, 1994.
- (2) Ip, W.L.R. and Loftus, M. Adaptive and compensation methods in free-form surface assessment. *Proc. Instn. Mech. Engrs., part B: Journal of Engineering Manufacturing*, 210: 135-45, 1996.
- (3) Cho, M.W. and Kim, K. New inspection planning strategy for sculptured surfaces using coordinate measuring machine. *International Journal for Production Research*, 33 (2): 427-444, 1995.
- (4) Piratelli-Filho, A. and Giacomo, B.D. CMM uncertainty analysis with factorial design. *Precision Engineering*, , 27: 283-288, 2003.
- (5) Trapet, E. et alii, Traceability of coordinate measurements according to the method of virtual measuring machine, PTB F-35, Braunschweig, Alemanha, 1999.
- (6) ISO - Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 1995.
- (7) IEC 60193 Standard, Hydraulic Turbines, Storage pumps and Pump-Turbines – Model Acceptance Tests. International Electrotechnical Commission, Geneve, nov. 1999.