



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/24
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**A EXPERIÊNCIA DE ITAIPU NO LEVANTAMENTO DA GEOMETRIA E ANÁLISE FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL DE SUAS TURBINAS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICA DE ESCANEAMENTO A
LASER ROTATIVO**

João Marra(*)
ITAIPU

Liliana Gramani
UFPR

Yuri Sefrin
CEASB

Eloy Kaviski
UFPR

RESUMO

As rodas de turbinas Francis apresentam em geral excelente estabilidade dimensional, contudo o processo de fabricação e manutenção pode provocar desvios dimensionais em relação ao seu projeto. Erosão anormal na borda de saída das pás de uma das turbinas da Usina de ITAIPU motivou um levantamento completo da geometria desta roda pela técnica de escaneamento a laser rotativo. O presente trabalho mostra as dificuldades encontradas e a superação destas na geração do sólido 3D da roda para confrontação com o projeto e para avaliação, por meio da técnica de Computação Fluidodinâmica, da influência da variação da geometria real no desempenho da turbina.

PALAVRAS-CHAVE

Turbina, escaneamento, modelagem, simulação, CFD

1.0 - INTRODUÇÃO

As rodas de turbinas Francis apresentam em geral uma excelente estabilidade dimensional em sua vida operativa. No entanto, desvios na geometria inerentes ao processo de fabricação e por ações da manutenção podem provocar desvios dimensionais nas seções do canal, no ângulo e no perfil das pás que excedem as variações dimensionais recomendáveis e que podem até afetar o desempenho da turbina quanto à cavitação, eficiência e comportamento fluidodinâmico.

Como tentativa de preservação de *know-how*, normalmente os fabricantes de turbinas não disponibilizam ao cliente informações completas do perfil hidráulico da roda da turbina que possibilitem a geração de um desenho tridimensional compatível com aplicativos para simulação fluidodinâmica computacional do escoamento na turbina.

No entanto, a atual disponibilidade de instrumentação a laser rotativo permite realizar o levantamento completo da geometria de uma turbina existente, possibilitando ao cliente o uso desta informação para viabilizar a simulação numérica do escoamento na turbina real utilizando a técnica de fluidodinâmica computacional - CFD.

A obtenção do sólido 3D da roda da turbina configura-se como engenharia reversa e permite ao proprietário da turbina dispor de informação completa da geometria da roda incluindo aquelas normalmente não disponibilizadas pelos fabricantes, como o perfil hidráulico completo das pás e seus ângulos de entrada e saída. O conhecimento da geometria real de um protótipo permite explorar as vantagens provenientes das tecnologias CAD/CAM, como simulação fluidodinâmica e estrutural para predição de comportamentos, diagnósticos de anormalidades e estudos de avaliação do potencial de melhorias no equipamento.

Para usufruir dos benefícios do processo de engenharia reversa os diversos passos típicos devem ser executados criteriosamente, desde os preparativos para o escaneamento, aquisição dos dados, pré-processamento da nuvem de pontos, segmentação e ajuste de superfície e geração do modelo CAD.

Na Usina de ITAIPU, a constatação de erosões anormais na borda de saída das pás de uma de suas turbinas ilustradas na Figura 1, motivou um levantamento da geometria desta roda por técnicas convencionais e pela técnica de escaneamento a laser rotativo em toda a superfície hidraulicamente ativa da roda, para confrontação com a geometria prevista pelo projeto. O escaneamento foi realizado como trabalho piloto utilizando um escâner rotativo de 50000 leituras/segundo para geração das nuvens de pontos brutas necessárias.



Figura 2 – Erosões anormais na borda de saída das pás

Com base no sólido 3D da roda escaneada foi possível realizar avaliação dos desvios na geometria comparativamente ao projeto e às tolerâncias de fabricação, obtendo-se um mapeamento completo das divergências encontradas na geometria. Como a ITAIPU não dispõe do desenho completo do perfil hidráulico de projeto da roda, a comparação da geometria do rotor real escaneado com a de projeto foi realizada pelo fabricante da turbina. Contudo, não foi possível imputar diretamente às divergências encontradas como causa das erosões observadas. Para melhor avaliação, o fabricante indicou a utilização de simulação numérica do escoamento por CFD para verificação da influência dos desvios na geometria real no comportamento observado da turbina.

Para tanto, aproveitando a disponibilidade no PTI/CEASB de aplicativo de computação fluidodinâmica encontra-se em fase de realização dois trabalhos acadêmicos, tese de doutoramento e trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia, envolvendo a geração do sólido 3D da roda da turbina a partir da nuvem de pontos escaneada e respectiva simulação numérica do escoamento da turbina real.

O presente trabalho busca mostrar as dificuldades encontradas e sua superação em cada uma das etapas do processo, do escaneamento e geração do sólido 3D até as simulações CFD. Embora não se disponha do rotor 3D de projeto, os resultados encontrados com a roda real escaneada confirmam o potencial da associação das tecnologias CAD/CAM no diagnóstico e ajuda na avaliação e solução de anormalidades ou de avaliação prévia de modificações na geometria da turbina.

2.0 - MODELAGEM GEOMÉTRICA

Os componentes básicos de uma turbina Francis são: caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, roda e tubo de sucção. A modelagem tridimensional de todos os componentes, exceto a roda, foi executada em aplicativo CAD 3D a partir dos desenhos técnicos bidimensionais do acervo de Itaipu, sendo o tubo de sucção modelado por [1] e o conjunto caixa espiral, pré-distribuidor e distribuidor por [2]. Os modelos 3D indicados na Figura 3 são referentes ao domínio fluido destes componentes, visando a posterior utilização na ferramenta de simulação fluidodinâmica.

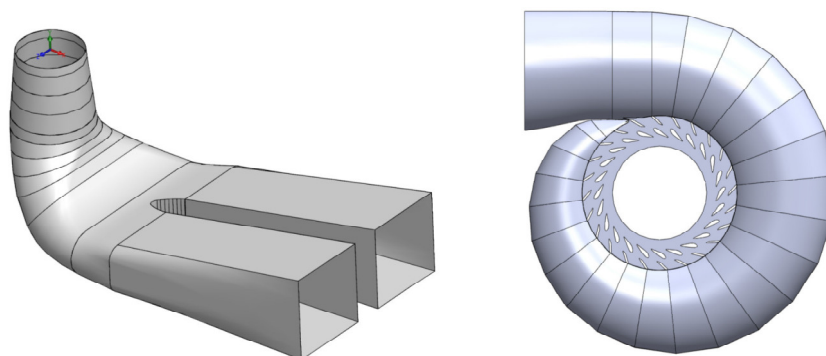


Figura 4 - Modelo Tubo de Sucção e Caixa Espiral

Buscando uma maneira de representar mais fielmente as dimensões da roda em operação, foi utilizado o processo de engenharia reversa para o desenvolvimento do modelo.

O processo de Engenharia Reversa pode ser dividido em duas etapas: a digitalização do produto e a criação do modelo CAD a partir dos dados digitalizados. Porém, segundo [3], estudos mais atuais consideram que a Engenharia Reversa consiste em quatro fases:

- Digitalização dos dados.
- Pré-processamento.
- Segmentação e ajuste de superfície.
- Reconstrução tridimensional em CAD.

O conceito de aquisição de dados geométricos ou digitalização abrange principalmente o aspecto de capturar informações com base em pontos em um espaço tridimensional. O espaço onde o modelo físico encontra-se é referenciado a um sistema de coordenadas cartesianas [4].

2.1 Aquisição dos dados

De acordo com [4], a aquisição de dados é o primeiro passo do processo e é nessa fase que se obtém um conjunto de pontos, mais conhecido no processo de engenharia reversa como nuvem de pontos.

Segundo [5], cada método de digitalização de dados utiliza-se de algum mecanismo ou fenômeno para interagir com o volume ou a superfície do objeto de interesse. Existem os métodos sem contato, os quais por meio de som, luz ou campo magnético são capazes de determinar a posição dos pontos da face do objeto, conforme ilustrado na Figura 5. Já os métodos de digitalização com contato as informações sobre a geometria da peça são obtidas apalpando a superfície.

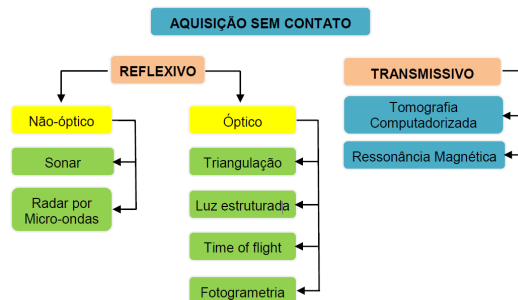


Figura 6 - Métodos de aquisição sem contato

Cada um dos métodos tem pontos fracos e fortes o que requer que o sistema de aquisição de dados seja selecionado cuidadosamente. Baseado na velocidade e qualidade que se deseja capturar o método mais adequado é o óptico, pois ele é capaz de capturar milhares de pontos em um segundo com alta precisão, a qual está diretamente ligada ao equipamento utilizado.

Dentre os métodos ópticos, o mais adequado para o escaneamento da turbina de Itaipu que possui diâmetro de 8,1m é o *time of flight*, pois um equipamento que utiliza esta técnica consegue efetuar medições com boa acurácia em até 300 metros de raio.

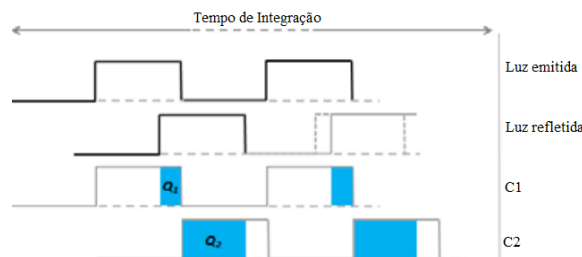


Figura 7 - Janela de amostragem para a aquisição das cargas elétricas

Conforme afirma [6], o princípio *time-of-flight* funciona através da emissão de feixes de luz modulados no objeto desejado, sendo possível captar a distância do objeto utilizando a diferença de fase do laser emitido com o refletido. Para detectar as fases entre iluminação e reflexão a fonte de luz é pulsada ou modulada por uma onda contínua, tipicamente senoidal ou quadrada. Sendo a quadrada a mais comum, pois pode facilmente ser reconhecida por circuitos digitais.

A luz é emitida do laser por um curto período de tempo (Δt) e a energia refletida é amostrada pelo sensor em cada pixel, usando duas janelas do sinal C_1 e C_2 com o mesmo Δt , representadas na Figura 8.

As cargas elétricas Q_1 e Q_2 acumuladas durante esta amostragem são medidas e usadas para computar a distância através da Equação 1:

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t \left(\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \right) \quad (1)$$

2.2 Dificuldades na aquisição de dados

A qualidade do processo de engenharia reversa está ligada diretamente com a digitalização. De acordo com [5], durante a aquisição de dados podem existir vários problemas, que afetam diretamente a qualidade da aquisição. Segundo afirma [3], os mais usuais são: calibração, precisão, acessibilidade, oclusão, fixação, vistas múltiplas, ruídos ou dados incorretos, distribuição estatística do modelo e superfície de acabamento. Na Figura 9 estão representados alguns destes.

No ambiente industrial normalmente existem vibrações que podem interferir na aquisição de dados. Para superar este problema o escâner foi posicionado sobre a roda e junto à cinta, com isso foi eliminada a vibração relativa entre o sensor e a roda que impedia a medição, como representado na Figura 10.

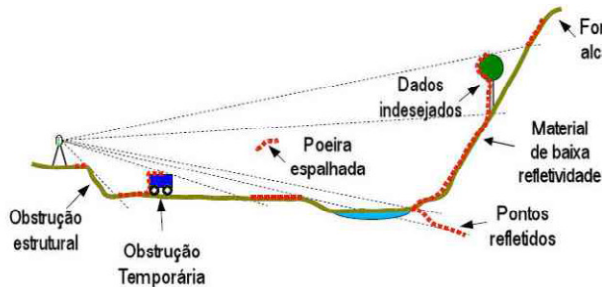


Figura 11 - Problemas comuns na aquisição de dados



Figura 12 - Posicionamento do escâner sobre a roda

Para adquirir os pontos da superfície hidráulica ativa da roda foram necessários 14 escaneamentos, sendo um em cada um dos 13 canais da roda e mais um escaneamento da parte inferior da roda. Devido ao posicionamento do escâner na própria roda, para evitar o problema da vibração relativa, houve oclusão da borda de entrada da pá, junto a cinta, região localizada abaixo do sensor do escâner. Para complementar os dados da região ocluída foi necessário mais um escaneamento, com o escâner posicionado na parte inferior da pá no lado de pressão, objetivando a aquisição dos pontos faltantes. O escaneamento complementar foi realizado um ano após os escaneamentos iniciais, devido ao insucesso das tentativas de reparo das oclusões via software.

2.3 Tratamento dos dados

Na fase do pré-processamento é onde se juntam os perfis de mais de um escaneamento, para obter a nuvem completa em um único arquivo. Softwares comerciais normalmente relacionam os pontos provenientes de cada aquisição através de marcadores posicionados no objeto, identificando-os como pontos coincidentes. Com isso foi possível a junção dos 14 escaneamentos realizados na roda. Os marcadores (alvos) posicionados na roda estão ilustrados na Figura 13.

Usualmente em aquisição de dados através de escaneamento a laser rotativo são adquiridos pontos que não são de interesse, como por exemplo: andaimes, peças adjacentes e operadores do sistema. É nessa fase em que através de um aplicativo de engenharia de sistemas 3D foi possível retirar os pontos que não fazem parte do objeto a ser modelado.

Nesta etapa os pontos passam por uma redução de ruído, o qual aumenta a qualidade da superfície e diminui drasticamente o número de polígonos necessários para o modelo 3D. De acordo com [7], os tipos mais usuais de redução de ruído são:

- *Filter Redundancy*: reduz uniformemente o número de pontos da malha que estão muito próximos ou muito distantes um dos outros, segundo afirmação de [8].
- *Point Sampling*: minimiza o número de pontos e estrutura os dados de maneiras mais fáceis para lidar. Existem três métodos dentro deste tipo de redução:
 - *Curvature*: remove mais pontos nas regiões de baixa curvatura do que nas de alta, mantendo a precisão das curvas;
 - *Random point sample*: remove pontos aleatoriamente de acordo com a porcentagem especificada.
 - *Uniforme sampling*: subdivide o modelo em cubos igualmente espaçados e mantém apenas um ponto para representar cada célula.

A redução de ruído utilizada na nuvem da roda foi a *uniforme sampling*, resultando em sete diferentes nuvens, cada uma com uma resolução. A mais densa é a de 2mm contendo cerca de 34 milhões de pontos e a menos densa com resolução 8mm com aproximadamente 2 milhões pontos. Devido a capacidade computacional atual foi utilizada a nuvem menos densa para a modelagem da roda. A nuvem obtida e limpa pode ser vista na Figura 14.



Figura 15 - Marcadores posicionados sobre a roda

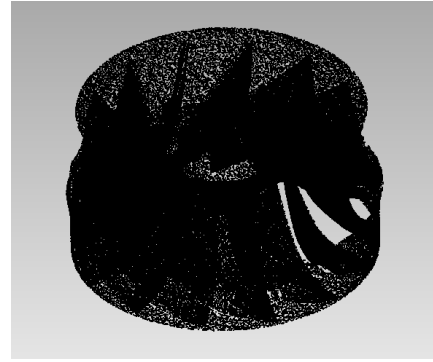


Figura 16 - Nuvem de ponto

Devido à necessidade do escaneamento complementar da região ocluída, o posicionamento dos marcadores originais foi perdido e por isso estes pontos não foram inseridos automaticamente na nuvem, mas foi possível contornar este problema através da utilização de um algoritmo chamado *Iterative Closest Point (ICP)*. De acordo com [9], dados dois conjuntos de pontos P e Q este algoritmo procura a translação (T) e a rotação (R) que minimiza a soma do erro ao quadrado dentre os conjuntos.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = [t_x \ t_y \ t_z]^T \quad (3)$$

Onde α , β , e γ expressam a rotação angular ao longo dos eixos x, y, z e t_x , t_y e t_z são relativos ao deslocamento.

Para o bom funcionamento desse algoritmo é necessário que ambas as nuvens já estejam limpas e, para rápida convergência, recomenda-se boas condições iniciais. Para tanto, deve-se posicioná-las de maneira próxima ao adequado, antes do programa fazer o ajuste fino. Procedendo desta forma, obteve-se a nuvem final da Figura 17.

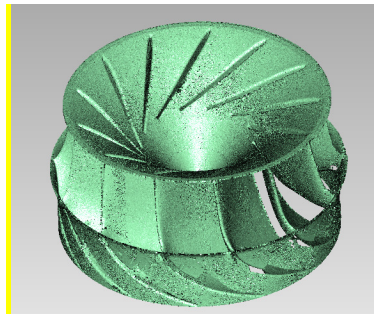


Figura 18 - Nuvem de pontos final

2.3 Ajuste de superfície

Com a nuvem de pontos limpa e tratada é feita a primeira aproximação da superfície através do agrupamento dos pontos de três em três, formando triângulos, resultando na malha apresentada na Figura 19, a qual ainda apresenta as oclusões referentes ao posicionamento do escâner, que podem ser visualizadas também na Figura 20. Através de interpolações que mantêm a curvatura da superfície, foi possível aproximar um perfil aceitável para o preenchimento da superfície nas regiões ocluídas no escaneamento. Para o preenchimento destas oclusões recomenda-se iniciar o preenchimento pelo perfil da pá, em seguida a cinta e pôr fim a intersecção destes.

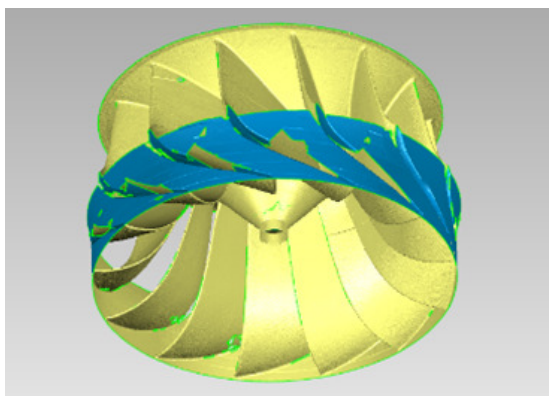


Figura 21 - Malha poligonal com oclusões

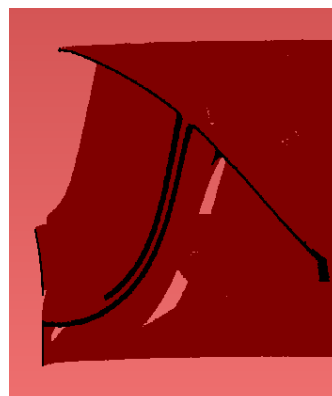


Figura 22 - Corte transversal da Roda

Após a correção das oclusões e geração da malha, esta deve ser reparada através de comandos do software que localizam pequenos orifícios e os preenchem automaticamente. Com isso é possível fazer a primeira aproximação através de uma superfície NURBS. Sendo possível enviá-la para um software CAD para uma análise de montagem ou diretamente a um programa *Computer Aided Manufacturing* (CAM).

Como foi escaneada apenas a superfície hidráulicamente ativa da roda, foi necessário através de software de modelagem CAD 3D, modelar a parte externa da roda da turbina. A partir dos desenhos técnicos e a utilização do recurso de superfície do software foi possível representar adequadamente a roda, conforme Figura 23.

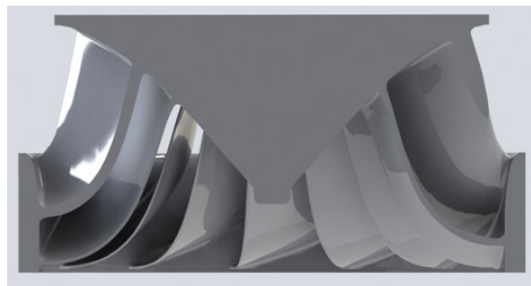


Figura 24 – Modelagem 3D obtida do rotor escaneado – Vista e corte

3.0 - MAPEAMENTO DOS DESVIOS

Para o mapeamento dos desvios dos perfis hidráulicos, os pontos escaneados foram plotados sobre a superfície do perfil hidráulico de projeto. Nas figuras abaixo as regiões com cores magenta e branco representam respectivamente desvios superiores a 7,5mm e inferiores a -7,5mm. O desvio das outras regiões varia de acordo com a escala de cores. Valores negativos indicam excesso de material. Valores positivos indicam falta de material. Como pode-se visualizar na Figura 25 e Figura 26. [10]

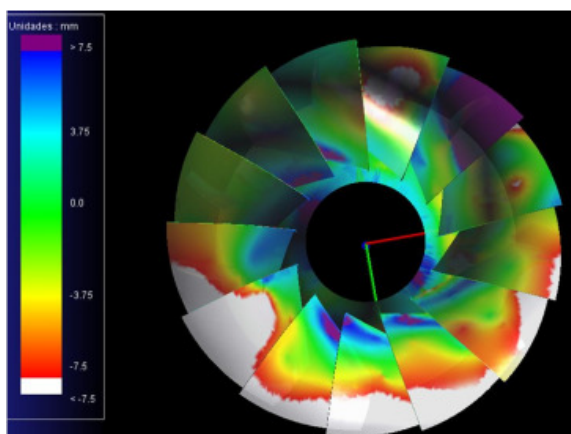


Figura 27 - Desvios no perfil hidráulico-Vista Inferior

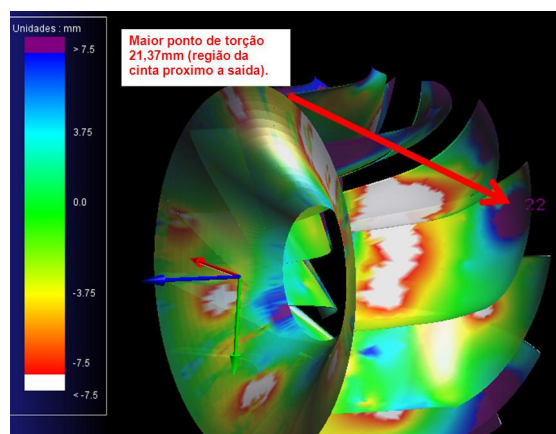


Figura 28 - Desvios no perfil hidráulico-Vista lateral

Para o mapeamento dos ângulos de saída (α) foi utilizado um gabarito virtual, ajustando sua posição de modo a equilibrar a distribuição de folga entre o gabarito e pá no lado de pressão e sucção. O ângulo foi medido nos pontos, CF1, CF2 e CF3 e o cálculo da variação do ângulo foi obtido conforme exemplo indicado na Figura 29.

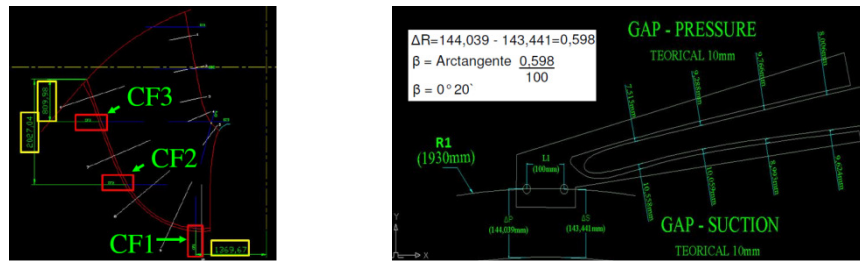


Figura 30 - Posições e procedimento de medição do ângulo de saída das pás

Foi também feito o mapeamento da espessura (e) das pás e da abertura (A) entre pás na entrada e na saída das mesmas. Os desvios encontrados no ângulo (minuto), espessura (mm) e abertura entre pás (mm) na saída das pás estão indicados na Tabela 1, bem como suas respectivas tolerâncias de fabricação. Constata-se que todas as sete pás com desvio no ângulo de saída acima de 30 min apresentaram grau de severidade 2 a 3 da erosão na borda de saída.

Tabela 1 – Desvios dimensionais na saída das pás

Pá	Tol.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta\alpha$ [min]	60	34	51	25	32	26	41	17	55	16	45	31	14	16
Δe [mm]	3,5	4,6	3,8	3,8	5,6	6,6	4,2	2,7	5,2	2,6	3,6	3,8	4,1	3,4
ΔA [mm]	+19/-6,0	9	9,5	3	0	5,2	0	4,1	-2	1,1	13	-0,7	4	3,2
Severidade	-	3	3	1	3	1	2	3	2	3	2	2	1	1

4.0 - SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS

A fluidodinâmica computacional consiste em uma ferramenta para resolver problemas de escoamento de fluido numericamente. De acordo com [11], o CFD é a arte de substituir integrais e derivadas parciais nas equações de Navier-Stokes através da discretização, podendo assim resolver cada elemento e assim obter valores discretos no tempo e/ou espaço. Esta ferramenta é amplamente utilizada, pois possibilita entender e interpretar problemas de fluxo, sem a necessidade da construção de modelos reduzidos ou protótipos.

Através dessa ferramenta foram realizadas três simulações que representam as condições operativas de carga parcial, máximo rendimento e sobrecarga. Usualmente uma análise de CFD consiste em três etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

4.1 Geração de malha

A malha computacional foi gerada individualmente para a roda, tubo de sucção e o conjunto da caixa espiral, sendo que para cada condição operativa, o distribuidor tem sua abertura específica, portanto têm-se três modelos geométricos diferentes da caixa espiral. Optou-se por elementos tetraédricos, pois se encaixam em formas complexas com mais facilidade do que os hexaédricos e estes apresentam-se em maior densidade em curvas, zonas de interesse e pequenos gaps. Ainda neste passo, simplifica-se o modelo geométrico e o insere no domínio computacional. A tarefa mais importante do pré-processamento é a geração de malha do fluido, pois normalmente é a parte que demanda mais tempo do operador. Os domínios fluidos discretizados podem ser vistos na Figura 31.

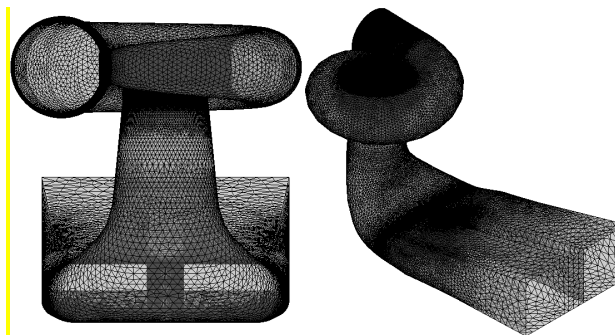


Figura 32 - Malha

4.2 Parâmetros de controle

¹ O grau de severidade das erosões foi um critério próprio baseado na área, extensão e profundidade destas por exemplo modelos de turbulência). Para a simulação da turbina de Itaipu, optou-se pelo método RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) como o próprio nome retrata, resolve as equações médias de Navies-Stokes, o que significa que apenas o fluxo é resolvido, e toda a turbulência é modelada. Tal procedimento é menos preciso, porém é o mais aplicado na indústria pois tem baixo custo computacional e resultados satisfatórios em geral.

O modelo de turbulência utilizado para representar as mudanças caóticas de propriedades do escoamento foi o SST (*Shear Stress Transport*), pois modela a turbulência perto das paredes utilizando-se do modelo $k-\omega$, que é ótimo para baixos números de Reynolds, e para regiões de fluxo livre usa a formulação do $k-\epsilon$, representando de maneira adequada a turbulência e sendo de fácil convergência.

Buscando a maneira mais robusta possível de representar as condições de contorno, como condição de entrada foi utilizada a vazão mássica específica para cada condição operativa e como condição de saída a pressão estática. As vazões foram determinadas através da documentação dos ensaios realizados no modelo reduzido. Para que o valor da velocidade nas superfícies imóveis do domínio seja igual a zero foi estabelecida a condição de não escorregamento nas paredes. Outro parâmetro importante para a boa representação física e convergência da simulação é o passo de tempo, para este problema foi utilizado o conceito de falso transiente. Dessa maneira os passos de tempo começam bem pequenos 0,01s, logo depois são ampliados para 0,1s e por fim voltam a serem pequenos para refinar o resultado e a convergência. É importante lembrar que para simulações de turbomáquinas o passo de tempo não pode ser maior que o inverso da rotação da máquina. Depois dos parâmetros definidos, parte-se para a solução da simulação. De acordo com [2], o tempo da simulação depende do número de elementos que constituem a malha, dos parâmetros de controle, das condições de contorno e do critério de convergência utilizado. Utilizando um computador com 16 núcleos/3,2GHz e 16 Gb/RAM cada simulação durou mais de 16 horas, até que os resíduos fossem suficientemente baixos (menores que 5×10^{-4}) e as condições físicas se estabilizassem.

4.3 Resultados

Atendidos os critérios de convergência, pode-se inferir que as simulações representaram o escoamento de maneira adequada. Na Figura 33 pode-se visualizar o campo de pressão sobre a roda para as três condições simuladas. Para todas as condições fica evidente como os campos de pressões para cada pá diferem entre si, devido as variações locais dimensionais da roda real que não apresenta homogeneidade dimensional como a roda ideal de projeto.

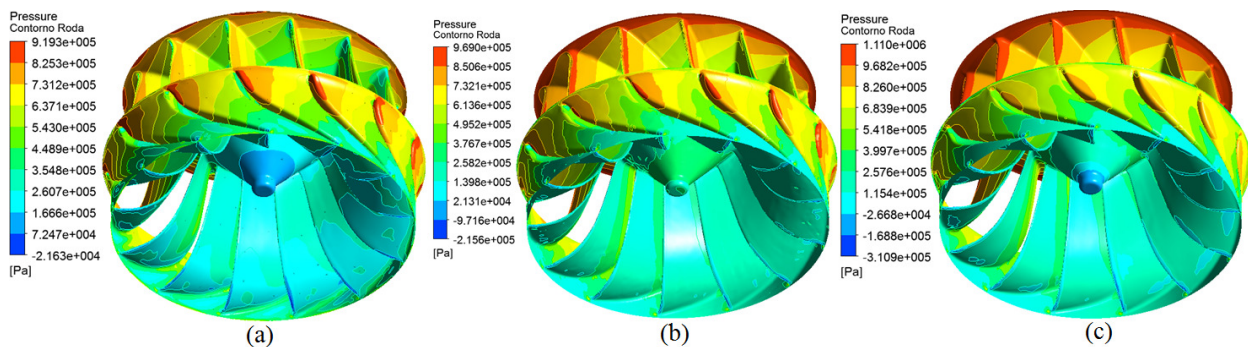


Figura 34 - Distribuição de pressão na Roda: (a) Carga Parcial, (b) Máximo Rendimento e (c) Sobrecarga



Figura 35 - Foto da borda de saída



Figura 36 - Distribuição de pressão na borda de saída

A Figura 37 mostra uma vista do revestimento em aço inoxidável na borda de saída das pás, porém acima da região de ocorrência das erosões anormais que motivaram o levantamento 3D através do escaneamento a laser. Na Figura 38 é possível perceber que a simulação computacional conseguiu captar as zonas onde as erosões anormais na borda de saída foram detectadas, bem como evidencia a não ocorrência de cavitação na região superior da faixa com revestimento inoxidável, como se observa nos levantamentos periódicos das erosões realizados por ITAIPU.

5.0 - CONCLUSÃO

O uso da técnica de escaneamento a laser rotativo associado às ferramentas de CAD/CAM permitiram a realização satisfatória da engenharia reversa na obtenção do modelo geométrico 3D da roda de uma turbina Francis em seu próprio local de instalação.

A utilização da tecnologia de CFD possibilitou a simulação com resultados satisfatórios do escoamento da turbina Francis estudada e com previsão satisfatória das regiões de ocorrência de cavitação, conforme observações de campo realizadas por ITAIPU.





A confrontação dos resultados da simulação CFD com os levantamentos dos desvios dimensionais permitem associar as erosões anormais com as divergências dimensionais encontradas, principalmente quanto ao ângulo de saída das pás, mesmo que esteja dentro de sua tolerância de fabricação.

O presente trabalho somente foi possível com o apoio do PTI/CEASB ao qual agradecemos especialmente a disponibilização dos equipamentos e aplicativos computacionais necessários.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BORGES, F. D. M. **Modelagem e Simulação Numérica do Escoamento Turbulento em Tubos de Sucção de Turbinas Francis: uma Aplicação às Turbinas da Usina Hidrelétricas de Itaipu.** UNIOESTE, Foz do Iguaçu – PR, 2007.
- (2) VIVARELLI, R. **Modelagem E Simulação Numérica Do Escoamento Completo De Uma Turbina Francis.** UNIOESTE, Foz do Iguaçu – PR, 2008.
- (3) LIMA, CRISTIANE BRASIL. **Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida Estudos de Caso.** UNICAMP, CAMPINAS – SP, 2003.
- (4) AVIZ, DANIEL. **Estudo da Técnica de Engenharia Reversa para Construção de Geometrias Complexas Focando Erros de Forma e Métodos de Digitalização Geométrica.** Instituto Sup Tupy, JOINVILLE – SC, 2010.
- (5) VÁRADY, TAMÁS. **Reverse Engineering of Geometric Models – An Introduction.** Computer and Automation Research Institute, 1996.
- (6) LI, LARRY. **Time-of-Flight Camera – An Introduction.** Texas Instruments, 2014.
- (7) ZAINUDDIN, KHAIRULAZHAR. **From Laser Point Cloud to Surface: Data Reduction Procedure Test.** Universidade Tecnológica da Malasia, 2009.
- (8) PHAM, D. T. e HIEU, L. C. **Reverse Engineering-Hardware and Software. Reverse Engineering: An Industrial Perspective** (pp. 33-70): Springer-Verlag London Limited, 2008.
- (9) RAJENDRA, Y. D. **Evaluation Of Partially Overlapping 3D Point Cloud's Registrariion by Using ICP Variant and Cloudcompare.** 2014.
- (10) ANDERSON, JOHN. **Computational Fluid Dynamics,** 1995.
- (11) ITAIPU BINACIONAL. **Análise dos perfis hidráulicos das pás do roda da U07-5215-67-19505.** 2013

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	João Maria Marra – natural de Presidente Olegário – MG, doutorando em Métodos Numéricos em Engenharia pela UFPR, Mestre em Engenharia de Produção pela UFSC, Especialista em Vibrações e Ruídos pela UFSC. Eng. Mecânico pela UFMG em 1982. Atuou como professor contratado na UNIOESTE de 1999 a 2010. Possui 31 anos de experiência profissional em Eng. de Manutenção de equip. eletromecânicos de UHE. Eng. Senior da Itaipu Binacional desde 1996.
	Liliana Madalena Gramani , natural de São Paulo - SP. Graduação em Física e Eng. Civil pela UFPR, mestrado em Física pela USP, doutorado em Física-Matemática pela UFPR e pós-doutorado em Politécnico de Torino - Italia (2008) em Modelagem Matemática e Computação Científica. Atualmente é professora associado III da UFPR e vice-coordenadora do PPGMNE.
	Yuri Fernando Tiecher Seffrin – natural de Cascavel – PR, graduando de Engenharia Mecânica na UNIOESTE. Desde 2012 atua como bolsista de iniciação científica no PTI/CEASB na área de Simulação Numérica Computacional. Estagiou na Itaipu Binacional e no estaleiro da VARD/Noruega, na área de gestão de projetos.
	Eloy Kaviski – natural de Curitiba – PR. graduação em Engenharia Civil pela UFPR em 1975, mestrado em Eng. de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR em 1992 e doutorado em Métodos Numéricos em Eng. pela UFPR em 2006. Atualmente é professor adjunto da UFPR ligado ao Departamento de Hidráulica e Saneamento – DHS.