

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO ENTRE AS PÁS DE UMA TURBINA DE MEDIÇÃO

Vilson C. S. Ferreira, Carlos F. Favaretto
Grupo de Estudos em Turbomáquinas
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Sarmiento Leite, 425
90050-170 - Porto Alegre, RS, Brazil
cfelipe@galileu.cesup.ufrgs.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise experimental dos perfis de velocidades entre as pás de uma turbina de medição operando em água. As medições foram realizadas na bancada gravimétrica intermitente para líquidos e a técnica empregada para a determinação do campo de velocidades do escoamento foi a Velocimetria Laser Doppler. Uma análise numérica também foi realizada através de um programa de elementos finitos comercial, possibilitando-se assim uma comparação entre resultados teóricos e experimentais.

INTRODUÇÃO

A determinação do campo de velocidades de um escoamento numa turbomáquina é de grande importância para o projetista de uma máquina de fluxo, visto que grande parte dos projetos são baseados em experiência própria ou em dados experimentais que nem sempre são compatíveis com o tipo de projeto. O surgimento de códigos computacionais cada vez mais sofisticados tornou possível ao engenheiro obter resultados para um protótipo de forma rápida e ainda fazer extrapolações para situações fora do ponto de projeto. Não obstante, as técnicas experimentais possibilitam que resultados obtidos através das simulações numéricas sejam validados. Com estas duas ferramentas torna-se possível a otimização da geometria de uma turbomáquina, assim como uma análise de outros projetos já existentes.

A técnica experimental adotada neste trabalho foi a Velocimetria Laser Doppler, sendo sua utilização justificada pelo fato da mesma ser não-intrusiva, importante no caso de turbomáquinas, onde deseja-se a menor interferência possível da instrumentação na investigação dos fenômenos.

Neste trabalho o sistema utilizado para a simulação numérica foi o FLOTRAN, que é um módulo de CFD (Computational Fluid Dynamics) embutido no pacote de elementos finitos ANSYS 5.3™. Uma aplicação prática da utilização deste sistema foi descrita por Ferreira et al., 1997, onde é apresentada a simulação numérica de um rotor radial de uma bomba submersa comercial bem como uma metodologia de projeto de turbomáquinas.

As simulações foram realizadas para três diferentes modelos: um modelo tridimensional e dois modelos bidimensionais. O escoamento foi considerado em regime permanente, turbulento e adiabático. Uma comparação entre os três modelos simulados com os resultados experimentais é apresentada.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As medições de velocidade foram realizadas no Laboratório de Turbomáquinas e Medição de Fluxo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com a utilização de uma bancada de calibração de medidores de fluxo líquido tipo gravimétrica, intermitente, descrita por Ferreira e Venzon (1995). Esta bancada possui um circuito fechado para circulação da água

através de uma bomba centrífuga, possuindo ao longo de sua extensão diversos equipamentos para medição de fluxo, dentre eles a turbina em análise fig. (1). A turbina de medição é do tipo axial de pás retas, possuindo portanto ângulo de pá ($12,5^\circ \pm 1,0^\circ$) constante desde a raiz até o topo.

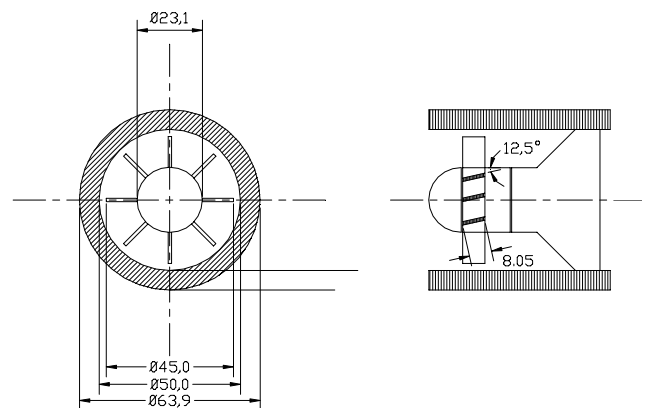
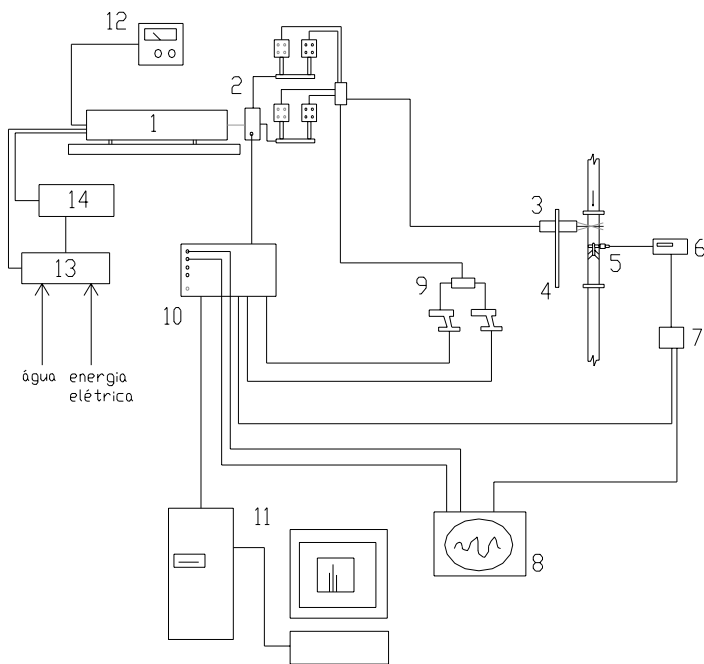


Figura 1 - Vistas frontal e lateral da seção de testes.

O sistema utilizado neste trabalho fig. (2) utiliza uma fonte de laser íon-argônio com 4W de potência. O raio laser é decomposto em dois pares de feixes, um com comprimento de onda 514,5 nm (verde) e outro com comprimento de onda 488 nm (azul). O comprimento focal da lente principal da sonda para a emissão dos quatro feixes é 400 mm. Com este equipamento pode-se, portanto, determinar o campo de velocidades em duas dimensões. No escoamento em análise, a velocidade axial é a que possui maior magnitude; desta forma, utilizou-se os feixes da faixa verde do espectro para medir tal componente, visto que a potência é maior do que para os feixes da faixa azul. A forma de recepção do sinal Doppler resultante da passagem de uma partícula pelo volume de medida é do tipo “para trás” (back scatter). Neste arranjo, a sonda estará emitindo quatro feixes e recebendo quatro feixes de menor intensidade.



Legenda:

- 1-Fonte de Laser
- 2-Célula de Bragg
- 3-Sonda 2D 60x11
- 4-Posicionador da Sonda
- 5-Captador Magnético
- 6-Frequencímetro
- 7-Encoder
- 8-Osciloscópio
- 9-Separador de Cores 55x35
- 10-Processador
- 11-Sistema de aquisição
- 12-Controle da Potência (2670)
- 13-Refrigeração/Energia Elétrica (2550)
- 14-Filtro para circulação de água (2200)

Figura 2 - Sistema de medição utilizado.

As medições foram realizadas na geratriz da seção de testes em três diferentes seções: meia corda a montante, região mediana entre as pás e meia corda a jusante. O posicionamento da sonda é feito através de um posicionador com uma escala de deslocamento na direção axial e na direção longitudinal da seção de testes. A incerteza desta escala é $\pm 0,25\text{mm}$. Devido a efeitos de refração, o deslocamento lido na escala será diferente do deslocamento do volume de medição. Os feixes de laser devem percorrer três meios diferentes, o ar, a parede de acrílico da seção de testes e a água. Aplicando-se correções adequadas conclui-se que a escala de deslocamento percorrerá na direção longitudinal da seção de testes $10,1\text{mm} \pm 0,25\text{mm}$.

No sistema de medição apresentado existe um recurso importante no caso de ocorrerem regiões de recirculação no escoamento. A célula de Bragg produz um aumento de 40 MHz num dos feixes verdes e num dos feixes azuis. Desta maneira, as franjas possuem um movimento e possibilitam o conhecimento do sentido da partícula com relação ao sentido do escoamento principal.

Para uma situação específica onde se deseja medir velocidades no canal entre pás de uma máquina de fluxo se faz necessária a utilização de um dispositivo chamado “encoder”. Este dispositivo possibilita a determinação da coordenada circunferencial das componentes axial e circunferencial de velocidade, desprezando o sinal coletado pelo laser durante a passagem de uma pá e zerando a coordenada angular cada vez que a pá passa pela sonda. A sonda é posicionada a 180° do captador magnético. Cada vez que o captador magnético emite um pulso devido a presença de uma pá o encoder desativa a leitura do laser para aquele instante e informa ao programa de aquisição de dados que aquela é a origem do sistema.

ANÁLISE NUMÉRICA

Uma análise numérica do escoamento no interior das pás da turbina de medição foi realizada com a utilização do programa de elementos finitos comercial mencionando anteriormente. O

modelamento do problema foi feito de três maneiras: um modelo tridimensional e dois modelos bidimensionais.

Modelamento Bidimensional. A geometria foi discretizada em três cortes longitudinais de uma seção angular da turbina (fig.3): corte2 ($r/R_{\text{tubo}}=0,5104$), corte6 ($r/R_{\text{tubo}}=0,07052$) e corte9 ($r/R_{\text{tubo}}=0,0848$), onde r é o raio e R_{tubo} o raio da seção de testes.

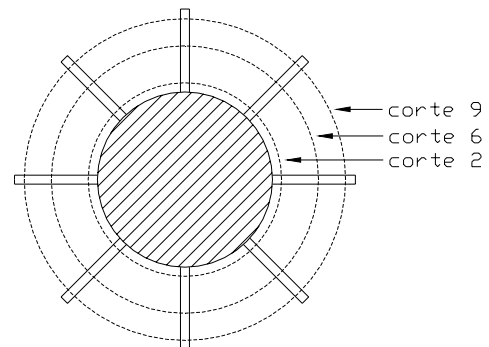


Figura 3 - Cortes Longitudinais da Turbina.

As hipóteses consideradas para o escoamento em análise foram: escoamento simulado bidimensional, incompressível, turbulento, adiabático e estacionário. Para este caso específico de uma máquina de fluxo axial considera-se que o escoamento da corrente livre ao transferir energia às pás da turbina man-tenha como predominante a direção axial, tornando a componente radial pouco significativa.

Como foi mencionado, foram propostos dois modelos bidimensionais: no primeiro modelo (simulação bidimensional 1) utilizou-se uma malha com 750 elementos e 816 nós e no segundo modelo (simulação bidimensional 2) adotou-se uma malha composta por 9.600 elementos e 9.851 nós (fig. 4). O propósito da

simulação dos dois casos foi a necessidade de avaliação da influência da malha no resultado.

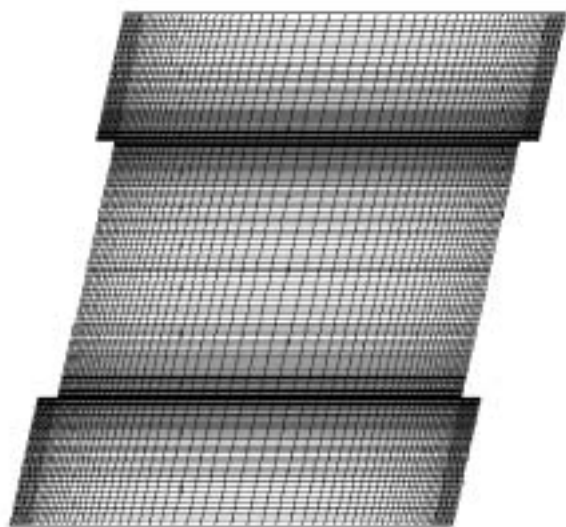


Figura 4 - Malha adotada na simulação bidimensional 2.

Na região a montante da turbina assim como na região a jusante foi feito um prolongamento do domínio. Este artifício é normalmente utilizado para escoamentos do gênero, como foi comentado por Davis e Dannenhoffer (1994).

O tipo de elemento utilizado para a resolução do problema foi o FLUID141, próprio do FLOTRAN. Este elemento bidimensional de quatro nós foi utilizado para a resolução de cinco graus de liberdade: velocidade na direção x (circunferencial), velocidade na direção y (axial), energia cinética turbulenta, taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e pressão.

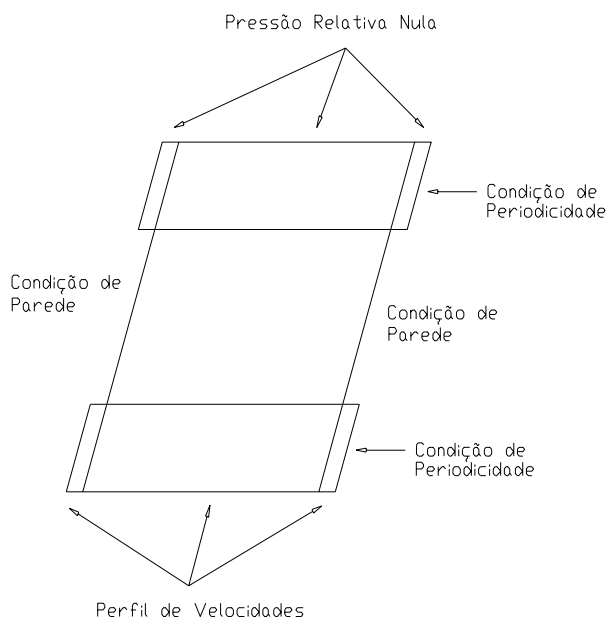


Figura 5 - Condições de contorno aplicadas.

As condições de contorno aplicadas ao problema (fig.5) foram: condição de parede nos limites das pás (velocidade nula

para as duas componentes), condição de periodicidade para os prolongamentos na entrada e saída das pás, pressão relativa nula na saída, velocidade prescrita na entrada das pás. Neste trabalho, as medições foram realizadas com uma vazão de 5l/s podendo-se então determinar os triângulos de velocidades. A velocidade axial média foi calculada foi 3,24m/s e a velocidade circunferencial foi determinada para cada corte conforme os valores lidos de frequência de passagem da pá pelo captador magnético.

Para a simulação em turbomáquinas, o sistema de referência gira com a rotação constante e igual à rotação do rotor. Esta informação é fornecida ao sistema após ser calculada a velocidade angular ω . Para o problema em análise, o sistema CAE resolve a equação da conservação da quantidade de movimento nas dimensões x e y levando em consideração o modelo de turbulência k- ϵ .

Por questões de precisão numérica, o algoritmo resolve a pressão relativa ao invés da pressão absoluta. Uma descrição mais abrangente do funcionamento do código utilizado pode ser encontrada em Ferreira et al. (1997).

O código computacional utilizado trabalha com o conceito de iteração global, que é o nome dado ao processo de solução de todas as equações e de reatualização das propriedades. Durante a iteração global são obtidas soluções aproximadas da equação de conservação da quantidade de movimento que são usadas como funções de restrição para resolver a equação da pressão baseada na conservação da massa. O código usa pressões resultantes para atualizar as velocidades de modo que o campo de velocidades conserve o fluxo de massa. Com o modelo de turbulência ativado, as equações de movimento são resolvidas e o programa usa a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação para calcular a viscosidade efetiva que substitui a viscosidade laminar para modelar o efeito de turbulência no escoamento médio.

O algoritmo de solução empregado é do tipo segregado, ou seja, os elementos das matrizes são formados e resolvidos para cada grau de liberdade separadamente. Cada grau de liberdade é resolvido de modo sequencial. As equações são acopladas, logo, cada equação é resolvida com valores intermediários dos outros graus de liberdade.

O método de solução utilizado para as variáveis V_y , V_x , k e ϵ foi o TDMA (Tridiagonal Matrix Analysis) com uma iteração para a velocidade e dez iterações para k e ϵ . Para a resolução da pressão, foi empregado o Método dos Gradientes Conjugados pré-condicionados com 500 iterações. A estratégia de solução foi resolver o problema turbulento com apenas uma sequência de 100 iterações globais. As propriedades físicas da água foram consideradas a uma temperatura de 20°C, sendo a massa específica $\rho=998,2\text{Kg/m}^3$ e a viscosidade absoluta $\mu=0,00105\text{Ns/m}^2$.

Modelo Tridimensional. A geometria foi modelada na região entre as pás da turbina, da raiz ao topo da pá. Neste modelo também foi feito um prolongamento do domínio de extensão equivalente a meia corda a montante e meia corda a jusante das pás.

A malha de elementos finitos empregada (fig.6) foi composta por 15.600 elementos e 17.856 nós, sendo a disposição dos elementos semelhante a malha bidimensional utilizada no primeiro modelamento.

As condições de contorno adotadas foram bem semelhantes ao caso bidimensional. A terceira componente de velocidade, normal ao eixo de rotação, foi considerada nula na região de entrada assim como nos nós pertencentes a fronteira superior da malha. Os algoritmos de resolução foram exatamente os mesmos da simulação anterior, apenas adotando-se uma estratégia de solução diferente. O problema foi resolvido em quatro etapas: $\mu=1, 0,1, 0,01$ e $0,001\text{Ns/m}^2$, resolvendo 50 passos de iteração para as três primeiras etapas e 200 passos para a última. Uma

subrelaxação foi introduzida em quatro graus de liberdade: velocidade normal ao eixo de rotação, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e pressão.

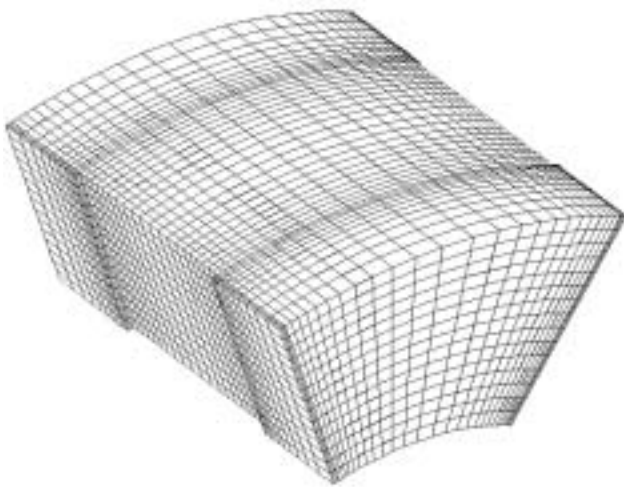


Figura 6 - Malha adotada na simulação tridimensional.

RESULTADOS

Convergência. A convergência dos problemas bidimensionais foi atingida em menos de 15 iterações para todos os cortes. A solução se tornou totalmente estável e a diferença decorrente do balanço de massa ficou em torno de 0,02% para todas as simulações. O critério de convergência adotado foi 10^{-8} . Na fig. 7 observa-se o comportamento da solução ao longo dos primeiros 14 passos de iteração em função da taxa de convergência (eq.1) para o caso da segunda simulação no corte 6, onde “B” é uma variável qualquer para o passo de iteração “i”.

$$\Delta B = \frac{\sum_i |B_i^{New} - B_i^{Old}|}{\sum_i |B_i^{New}|} \quad (1)$$

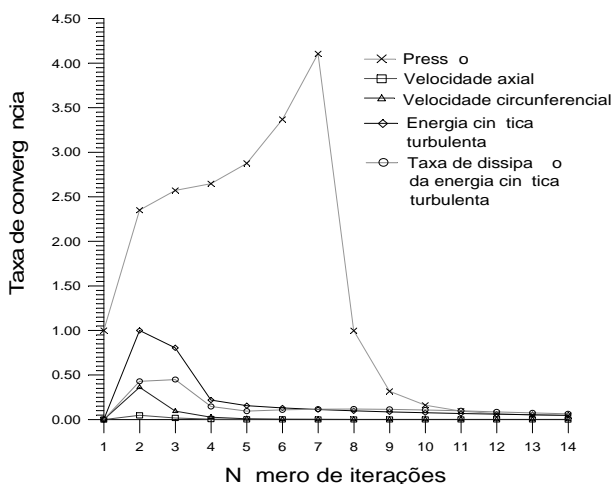


Figura 7 - Comportamento da solução para o caso da segunda simulação do corte 6.

Com relação ao comportamento da solução do modelo tridimensional, pode-se observar na fig.8 o comportamento da pressão, geralmente mais instável que os demais graus de liberdade.

A diferença entre o fluxo total de massa que entra e o fluxo total de massa que sai foi de 0,007%, menor que nas simulações bidimensionais. O tempo de CPU utilizado na simulação tridimensional foi de 38.835s ao passo que na segunda simulação bidimensional este tempo variou entre 1.000s e 1.900s, conforme o corte. A máquina utilizada para a execução do programa foi uma estação de trabalho Silicon Graphics Crimson.

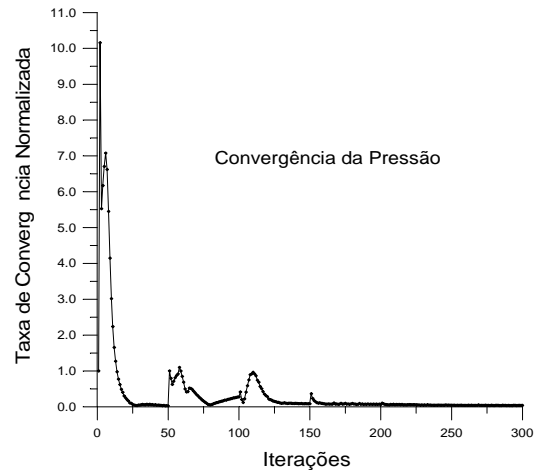


Figura 8 - Taxa de convergência da pressão em função do número de iterações para a simulação tridimensional.

Perfis de Velocidades. O comportamento da componente circunferencial de velocidade para as três simulações realizadas pode ser observado na fig.8. Os pontos apresentados no gráfico foram obtidos a partir de uma média dos perfis de velocidades a meia-corda entre as pás para o correspondente raio. O eixo da abscissa foi adimensionalizado em função do raio da seção de testes.

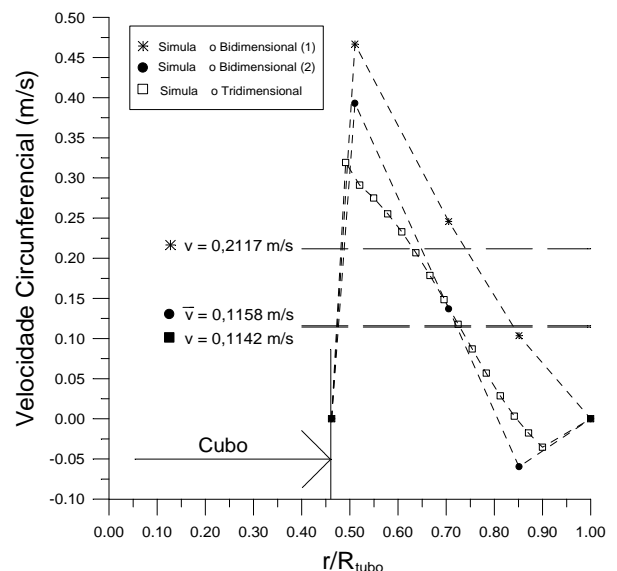


Figura 9 - Perfis da componente circunferencial de velocidade para as simulações realizadas (meia-corda entre as pás).

Nota-se na fig.9 a proximidade entre os valores médios da distribuição de velocidade circunferencial ao longo do raio para a simulação tridimensional e para a segunda simulação bidimensional, respectivamente. O perfil de velocidades da primeira si-

mulação bidimensional apresentou um valor médio muito superior aos demais casos, apresentando um perfil mais retilíneo e não muito característico do escoamento. Entretanto, nos três casos, constatou-se a inversão dos triângulos de velocidades devido ao não-torcimento das pás.

Algumas medições experimentais com o LDV comprovaram a pequena magnitude da velocidade circunferencial assim como a inversão do sentido da mesma na posição aproximadamente a $0,7 r/R_{tubo}$. Devido a este motivo, uma incerteza considerável em termos percentuais foi constatada, não sendo, portanto, apresentados resultados experimentais para esta componente de velocidade no presente artigo.

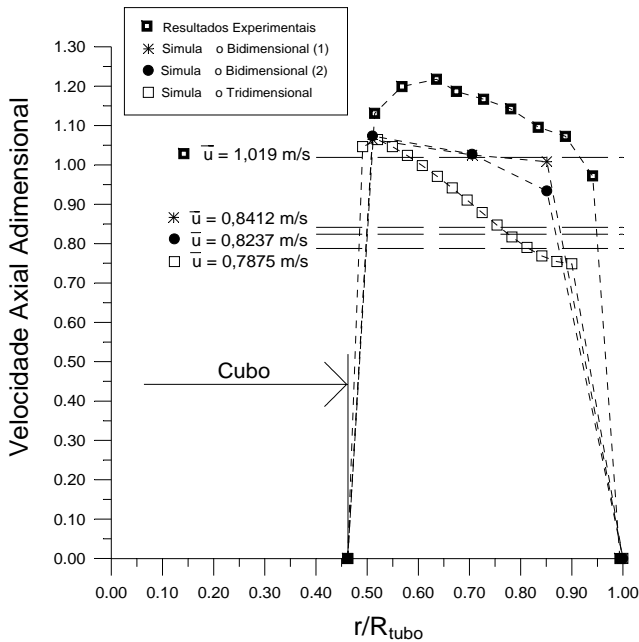


Figura 10 - Perfis da componente axial de velocidade para as simulações realizadas e para a medição experimental (meia-corda entre as pás).

Os perfis de velocidades adimensionalizados em função da velocidade axial média para as três simulações e para a medição experimental podem ser observados na fig.10. A média do perfil de velocidades adimensionalizado medido experimentalmente foi a mais alta comparada com a média dos resultados numéricos. O formato do perfil, apresentando ponto de máximo mais próximo da superfície do cubo, é semelhante ao esperado, fato evidente se considerarmos que a área de passagem aumenta com o aumento do raio. Esta constatação também é observada para as simulações, indicando que o código é sensível às características do escoamento. As simulações bidimensionais mantiveram seus valores muito próximos, ao passo que a simulação tridimensional apresentou valores pontuais baixos. Entretanto, a declividade do perfil ao longo de r/R_{tubo} medido experimentalmente foi muito próxima da obtida pela simulação tridimensional.

Pressão. Na fig.11 observa-se resultados médios de pressão estática nos três cortes longitudinais da segunda simulação bidimensional para três diferentes seções do domínio: meia-corda a montante, meia-corda entre as pás e meia-corda a jusante. Observa-se que a pressão estática é na verdade uma pressão estática relativa, visto que foi introduzido como condição de contorno $P_{relativa}$ na saída nula. O eixo das abscissas, por questões de conveniência, foi adimensionalizado em função do raio da turbina na ponta da pá (R_{topo}).

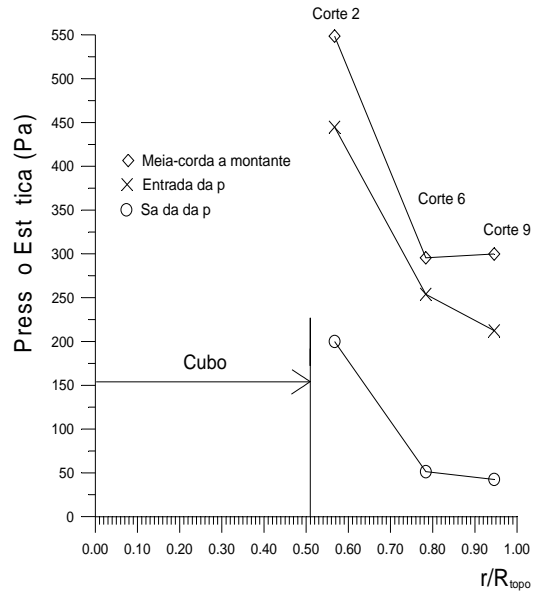
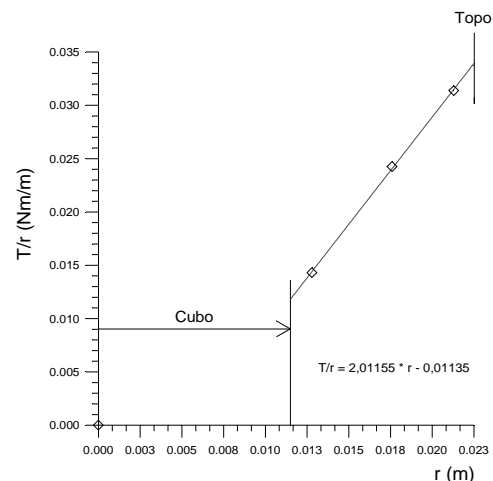


Figura 11 - Variação da pressão estática ao longo da seção de testes (segunda simulação bidimensional).

Dados experimentais da variação de pressão estática na seção de testes utilizada foram obtidos por Favaretto, 1996. Para uma vazão de $3,271/s$, a variação encontrada foi $300Pa$, ao passo que no caso da segunda simulação bidimensional, para uma vazão de $5l/s$, encontrou-se um valor médio de $363,24 Pa$.

Um medidor turbinado, quando gira em rotação constante, está em equilíbrio dinâmico, ou seja, o somatório dos torques resistivos se iguala ao torque motor. Os torques resistivos são devido ao arrasto fluidodinâmico nas superfícies das pás (T_s) e no cubo do rotor (T_b), devido ao atrito de escorregamento entre o cubo do rotor e a face fixa do suporte (T_f), ao atrito devido ao escoamento nas pontas das pás (T_{bp}), devido ao atrito mecânico de rolamento do rotor (T_{brl}) e à força resistiva produzida pelo sensor (T_p) quando este for magnético.

Figura 12 - Valores de T/r em função do raio obtidos através da



segunda simulação bidimensional.

No presente trabalho foi feita uma análise da diferença de pressão entre as faces de pressão e sucção obtida através da segunda simulação bidimensional. Integrando os valores nodais de pressão para cada corte e multiplicando pelo respectivo raio obtém-se o gráfico da fig. 12.

Integrando a função da fig.12 obteve-se um valor de torque médio correspondente a 0,002Nm. Este valor seria o próprio torque motor, entretanto, no modelo simulado, apenas o torque resistivo na superfície das pás (T_s) estaria sendo considerado. Os demais torques resistivos determinados por Ferreira e Favaretto, 1996 foram adicionados de modo a tornar possível uma comparação com o torque motor (fig. 13).

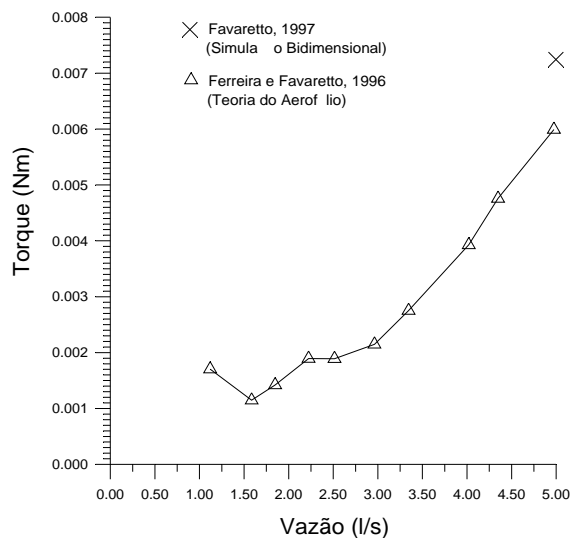


Figura 13 - Comparação com os resultados de Ferreira e Favaretto, 1996.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram satisfatórios, visto a aproximação entre valores experimentais e teóricos. A simulação numérica para os três diferentes modelos se mostrou necessária, devido a diferenças entre os resultados.

O modelo tridimensional se mostrou adequado para a análise da componente circunferencial de velocidade. Para esta situação, ficou evidenciado que o fato da malha tridimensional ser mais grosseira não surtiu grandes diferenças nos resultados. No caso da velocidade axial, entretanto, os valores obtidos na modelagem tridimensional ficaram um pouco abaixo do esperado.

A malha bidimensional mais refinada produziu resultados melhores que as demais. Este fato foi comprovado não apenas pela análise dos perfis de velocidades mas também pela avaliação do diferencial de pressão e dos torques resistivos. Dados experimentais provaram tal fato.

O procedimento experimental demonstrou a necessidade de um conhecimento prévio do comportamento do escoamento no fenômeno a ser investigado. Inúmeras medições devem ser realizadas de modo a tornar possível uma comprovação física. A técnica do LDV mostrou ser uma ferramenta importante para determinação experimental do campo de velocidades, especialmente no problema investigado.

A simulação numérica devidamente validada através de medições experimentais com Laser Doppler pode ser um importante recurso para projeto de turbomáquinas, tornando-o mais rápido e confiável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Nacional de Supercomputação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CESUP-RS) pelo suporte técnico de aplicativos e equipamentos, aos

engenheiros Michael Morgenroth, Júlio Cesar Cominges e Lucas Gutkoski pelas valiosas contribuições ao presente trabalho.

ABSTRACT

The present paper presents an experimental analysis of the velocity profiles inside the blade passage of a turbine flow meter running in water. Measurements were performed in the intermittent gravimetric rig for liquids at the Turbomachinery Laboratory and the technique employed for flow field determination was Laser Doppler Velocimetry. A simulation inside the blade passage was also performed with a CFD commercial software, allowing a comparison between theoretical and experimental results.

REFERÊNCIAS

Davis, R.L., Dannenhoffer, J.F., Adaptive Grid-Embedding Flow Prediction Techniques for Turbomachinery Applications, Lecture Series 1994-06, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode Saint-Genève, Belgium, 1994.

Favaretto, C.F., Estudo dos Torques Resistivos em Turbinas de Medição, Relatório Interno CNPq, LTMF/UFRGS, Porto Alegre/RS, 1996.

Ferreira, V.C.S., Favaretto, C.F., Theoretical and Experimental Analysis for the Retarding Torques of a Turbine Flowmeter, Anais do ENCIT 96, Florianópolis/SC, 1996.

Ferreira, V.C.S., Morsch, I.B., Kessler, M.P., Favaretto, C.F., Uma Metodologia para Projeto de Turbomáquinas Assistido por Computador, Anais do CILAMCE 97, Brasília/DF, 1997.

Ferreira, V.C.S., Venzon, M.C.P., "Orifice Plate Behavior in Two Phase Flow (Air-Water)", Anais do COBEM-CIDIM/95, Belo Horizonte/MG, 1995.