

# **SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO ENTRE PÁS DE UMA TURBOMÁQUINA COMO METODOLOGIA DE PROJETO**

FERREIRA, V.C.S., MORSCH, I.B., KESSLER, M. & FAVARETTO, C.F.  
*Laboratório de Turbomáquinas e Medição de Fluxo - DEMEC - UFRGS*  
*Sarmento Leite 425, Porto Alegre, CEP. - E-mail: morsch@vortex.ufrgs.br*  
*Código 274*

## **Abstract**

Many theoretical and experimental approaches have been made in order to achieve a standard and reliable turbomachinery design. The present paper describes an underdevelopment methodology that links an initial design software with commercial computational package (CFD) available. The geometry of a turbomachine is generated by the initial software and, after the visualisation, the data are exported to the CFD which solves the flow field inside the blade-to-blade passage. A simulation with a submergible pump impeller is made and the results in terms of velocity, pressure and streamlines distribution are presented.

## **Palavras Chave**

Turbomáquinas, escoamento, turbulência, simulação numérica, desenvolvimento de projeto.

## **1. INTRODUÇÃO**

Os processos utilizados no projeto de uma máquina de fluxo são normalmente baseados em métodos teórico-experimentais, onde a experiência prévia desempenha um importante papel. A análise dimensional junto com a teoria da similaridade é uma ferramenta ainda muito empregada. Processos de projeto mais sofisticados, que utilizam códigos computacionais específicos, são normalmente empregados apenas por grandes empresas. Estes processos verificam as condições de escoamento no interior da máquina e a interferência fluido-estrutura permitindo otimizar as diferentes geometrias do projeto. No entanto, estas metodologias não estão disponíveis na literatura aberta pois representam um segredo industrial valioso.

O presente trabalho apresenta uma metodologia de projeto em desenvolvimento baseada em dados disponíveis na literatura e na simulação numérica do escoamento empregando códigos computacionais comerciais. Os riscos e inconvenientes de utilizar-se códigos computacionais genéricos, muitas vezes considerados como “pacotes fechados”, não são desconhecidos. Foi no presente caso uma solução de compromisso entre tempo e custo já que o desenvolvimento completo de um código deste tipo é lento, caro e corre os mesmos riscos de validação de um código computacional disponível. Além disso, modernos códigos comerciais são mais interativos e aceitos pela comunidade científica.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia de trabalho proposta está baseada num projeto inicial do rotor empregando-se a Teoria do escoamento Congruente. A partir deste projeto a geometria do rotor é gerada e são feitas simulações numéricas do escoamento no interior do mesmo. Os resultados são analisados e, se necessário, são feitas alterações na geometria inicial para uma nova solução. A figura (1) representa o fluxograma da metodologia empregada.

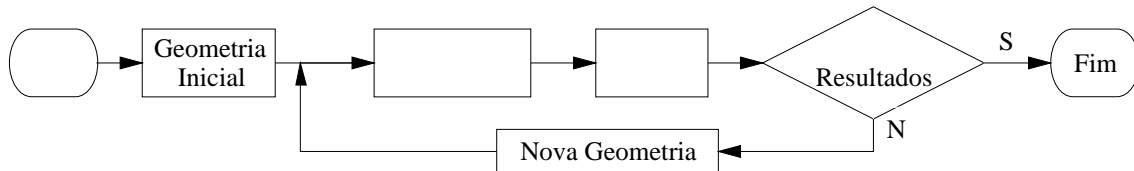


Figura 1 - Metodologia de trabalho.

### 2.1 Projeto Inicial

O projeto inicial utiliza a metodologia apresentada por PFLEIDERER (1979) para a determinação da geometria de uma bomba radial. Um código, em linguagem Fortran, denominado programa inicial foi escrito seguindo esta metodologia. Este programa cria um arquivo de formato “dxf” para visualização da geometria em sistemas CAD (Computer Aided Design) e um arquivo de formato “igs” para comunicar a geometria para os sistemas CAE (Computer Aided Engineering). Além disso, é gerado um arquivo Ascii, de extensão “.log”, que fornece uma seqüência de comandos recomendados para a análise do problema utilizando-se um Código Computacional Comercial de CFD. No caso deste trabalho, optou-se pelo uso do sistema Ansys® versão 5.3 (SWANSON ANALYSIS SYSTEMS, 1992).

O módulo de entrada e saída de resultados deste programa, desenvolvido em Visual Basic for Windows, requer os seguintes dados: rotação, vazão e altura manométrica da bomba. Entretanto, parâmetros e constantes empíricas desenvolvidos ou pesquisados por diferentes autores foram deixados em aberto, ou seja, podem ser alterados. Além disso, podem ser fornecidos dados relacionados com a geração do arquivo “.log”, tais como os dados relacionados com a geração da malha de elementos finitos. Neste caso, deve-se fornecer o número de elementos que vai ser utilizado em cada uma das linhas, conforme tela apresentada na figura (2), que definem a geometria das pás.

O resultado do projeto inicial é a geometria completa do rotor com as coordenadas das pás obtidas para um número de pontos que é especificado pelo usuário.

### 2.2 Simulação do Escoamento

O escoamento na região entre pás de uma turbomáquina é simulado considerando-se o mesmo tridimensional, incompressível, turbulento, adiabático e estacionário. Devido à características próprias do rotor radial em estudo o escoamento foi considerado bidimensional.

O problema é analisado em relação a um sistema de referência que gira com uma rotação constante e igual à rotação do rotor. A equação da conservação da quantidade de momento para este caso é escrita como

$$\rho \frac{D\{V\}}{Dt} + 2\rho\{\omega\} \times \{V\} + \rho\{\omega\} \times \{\omega\} \times \{r\} = \rho\{g\} - \nabla P_{abs} + \mu \nabla^2 \{V\} \quad (1)$$

onde  $\{V\}$  é o vetor velocidade no sistema de coordenadas giratório,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\{r\}$  é o vetor posição no sistema de coordenadas giratório,  $\{g\}$  é o vetor aceleração devido à gravidade e  $P_{abs}$  é a pressão absoluta. O gradiente negativo da pressão absoluta está representado na expressão (2).

$$-\nabla P_{abs} = -\nabla P_{rel} - \rho_0 \{g\} + \rho_0 \{\omega\} \times \{\omega\} \times \{r\} \quad (2)$$

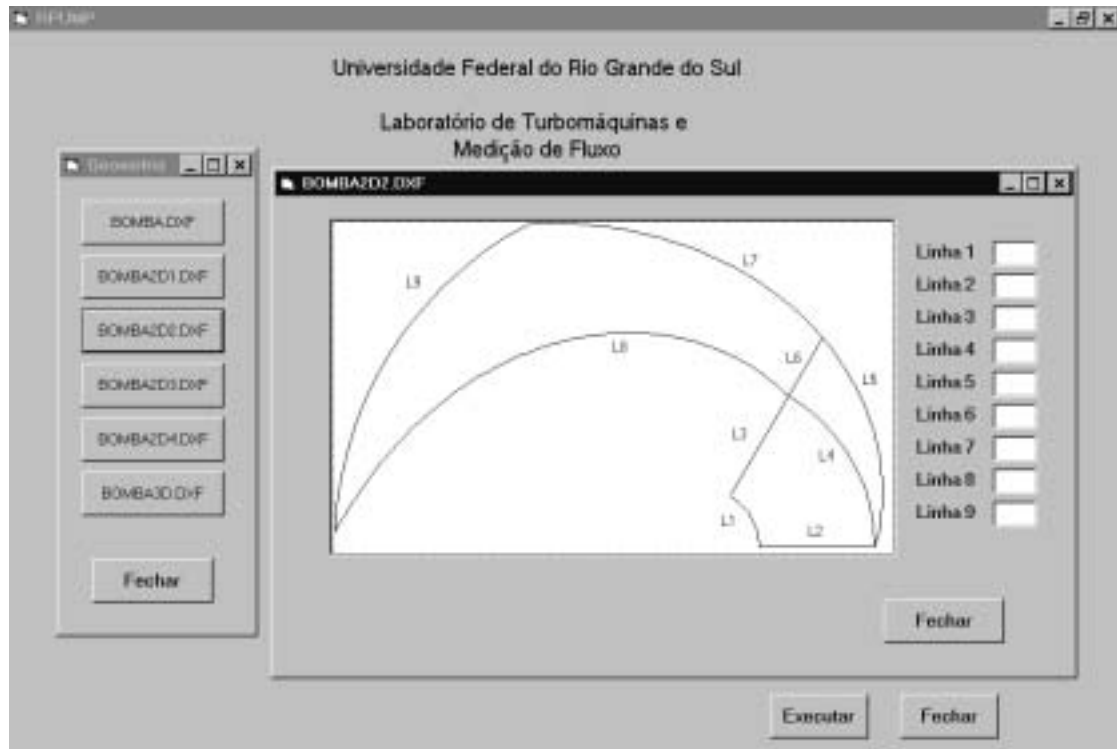


Figura 2 - Entrada de dados para a geração da malha.

Os resultados obtidos em pressão relativa estão referenciados ao sistema de coordenadas global estacionário, ou seja, os termos rotacionais são subtraídos da pressão calculada pelo algoritmo.

O escoamento turbulento médio é simulado considerando-se a viscosidade efetiva como sendo a soma da viscosidade laminar ( $\mu$ ) com a viscosidade turbulenta ( $\mu_t$ ) definida pela expressão (3) para o modelo de turbulência tipo k- $\epsilon$  (LAUNDER & SPALDING, 1974). Nesta expressão k é a energia cinética turbulenta,  $\epsilon$  é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e  $C_\mu$  é uma constante cujo valor padrão é 0,09.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

Os valores de k e  $\epsilon$  na entrada são calculados através das expressões (4) e (5), onde V é o módulo da velocidade na entrada, L é o diâmetro hidráulico, (ININ) e (INSF) são constantes estabelecidas pelo usuário cujo valor padrão é de 0.01.

$$k_{ent} = 3/2[(ININ)V]^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ent} = \frac{C_{\mu}k^{3/2}}{(INSF)L} \quad (5)$$

Como o problema analisado é considerado estacionário não é necessário especificar o número de passos no tempo. Neste caso, o código trabalha com o conceito de iteração global. Durante a iteração global obtém-se soluções aproximadas da equação de conservação da quantidade de movimento e as usa como funções de restrição para resolver a equação da pressão baseada na conservação da massa. Este sistema usa as 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 seqüencial. As equações são acopladas, logo, cada equação é resolvida com valores intermediários dos outros graus de liberdade. O processo de solução de todas as equações e de reatualização das propriedades é chamado de iteração global.

A estratégia de solução estacionária aplicada ao caso de bombas necessita uma melhor aproximação dos valores iniciais das incógnitas sob pena do processo de solução se tornar instável. Este procedimento é feito utilizando-se os resultados de uma análise laminar anterior.

### 3. APLICAÇÃO

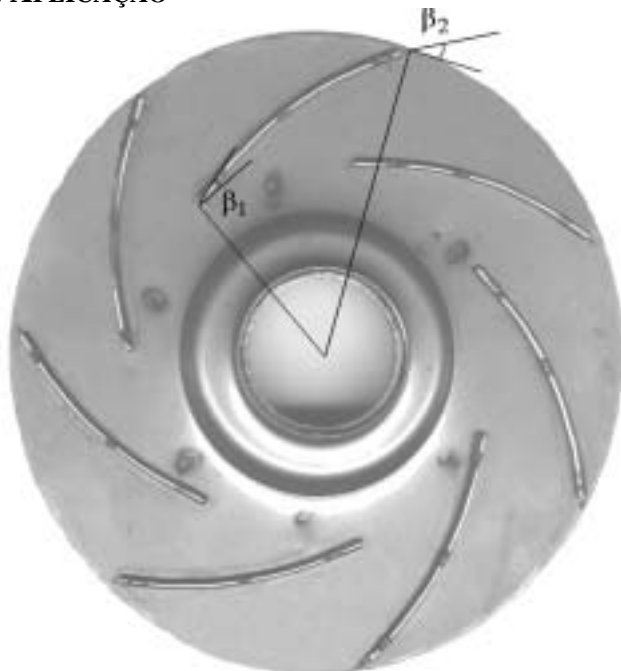


Figura 3 - Esquema do rotor analisado.

Considerou-se uma bomba do tipo radial com as características de operação: rotação de 3400 rpm, vazão de  $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  e altura manométrica 5,7 m de coluna de água. A figura (3) mostra o rotor desta bomba onde  $\beta_1$  é o ângulo de pá na entrada e  $\beta_2$  é o ângulo de pá na saída. O problema é analisado com o modelo bidimensional porque a altura das pás (1,5 mm) é pequena comparada com as outras dimensões do problema.

Como o rotor possui um plano de simetria periódico a cada  $51,42^\circ$  pode-se estudar o escoamento do fluido considerando-se apenas um canal entre pás. No presente trabalho as pás foram consideradas sem espessura e

representadas pelas suas linhas médias. A geometria das pás é aproximada por um polinômio do 2º grau e o prolongamento na saída é feito empregando-se o mesmo polinômio. Já o

prolongamento na entrada é feito de forma que a ligação entre as duas curvas seja feita de forma suave. Este é um procedimento usualmente empregado na simulação de turbomáquinas (DAVIS & DANNENHOFFER, 1994).

As condições de contorno empregadas neste estudo são velocidade prescrita na entrada, condição de parede (velocidade nula nas pás), pressão relativa nula na saída e condição de periodicidade nos prolongamentos das pás. A condição de periodicidade implica que o número de nós entre as duas fronteiras periódicas seja o mesmo e, além disso, a posição destes nós também deve ser periódica. O resultado desta condição de contorno é que os valores para os graus de liberdade correspondentes a dois nós periódicos são iguais. Para se determinar os valores da componente da velocidade na entrada deve-se considerar a componente circunferencial  $V_x$  dada pelo produto da velocidade de rotação pelo raio e a componente radial  $V_y$  é determinada em função do fluxo de volume da secção de entrada. No presente caso,  $V_x = 8 \text{ m/s}$  e  $V_y = 5 \text{ m/s}$ .

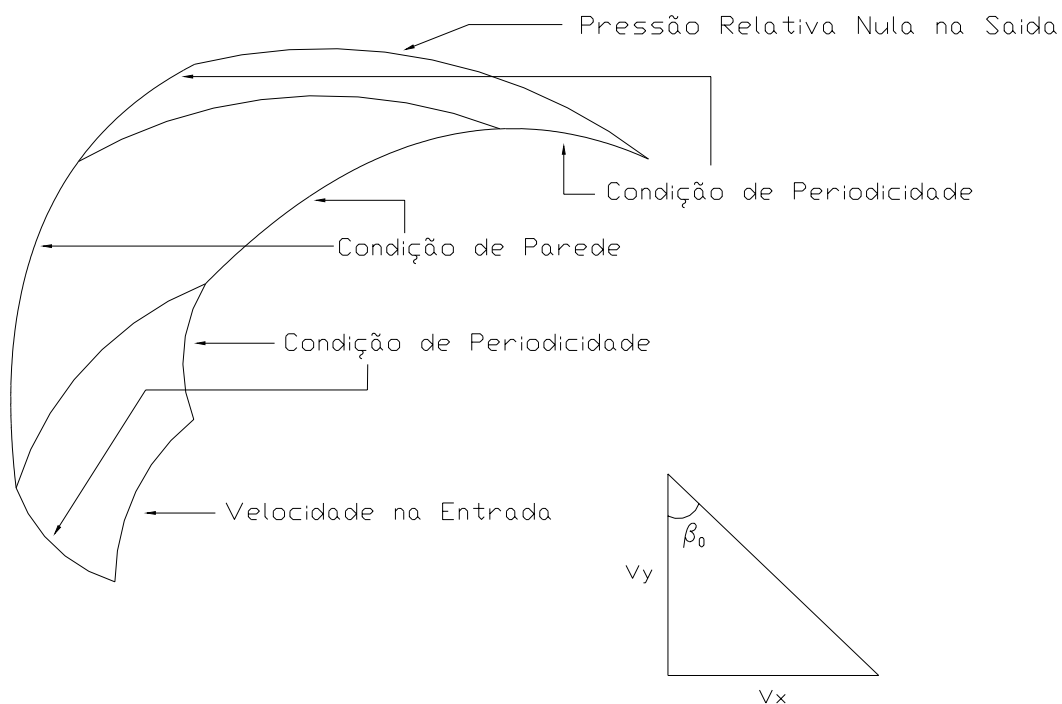


Figura 4 - Condições de contorno empregadas.

Os valores para a energia cinética e taxa de dissipação na fronteira de entrada são os valores padrões do programa. O método de solução utilizado para as variáveis  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $k$  e  $\epsilon$  é o TDMA (Tri-Diagonal Matrix Analysis) com uma iteração para a velocidade e dez iterações para  $k$  e  $\epsilon$ . O TDMA é um caso especial do método iterativo de Gauss-Seidel padrão para solução de um conjunto de equações algébricas. Já para a pressão o método dos gradientes conjugados pré-condicionados com 500 iterações é empregado (SWANSON ANALYSIS SYSTEMS, 1992).

A consideração do problema como estacionário requer que se estabeleça um conjunto de valores iniciais para as incógnitas no interior o mais próximo da realidade, ou seja, não se deve considerar todos os valores iniciais nulos. A estratégia de solução empregada foi considerar o problema inicialmente laminar, com uma viscosidade fictícia, durante um determinado número de iterações globais e, posteriormente, adota-se o problema como turbulento, com a viscosidade real, utilizando os resultados anteriores como condição de

partida. Também foram obtidos bons resultados fazendo-se várias etapas de escoamento turbulento com uma redução gradativa da viscosidade até atingir o valor real.

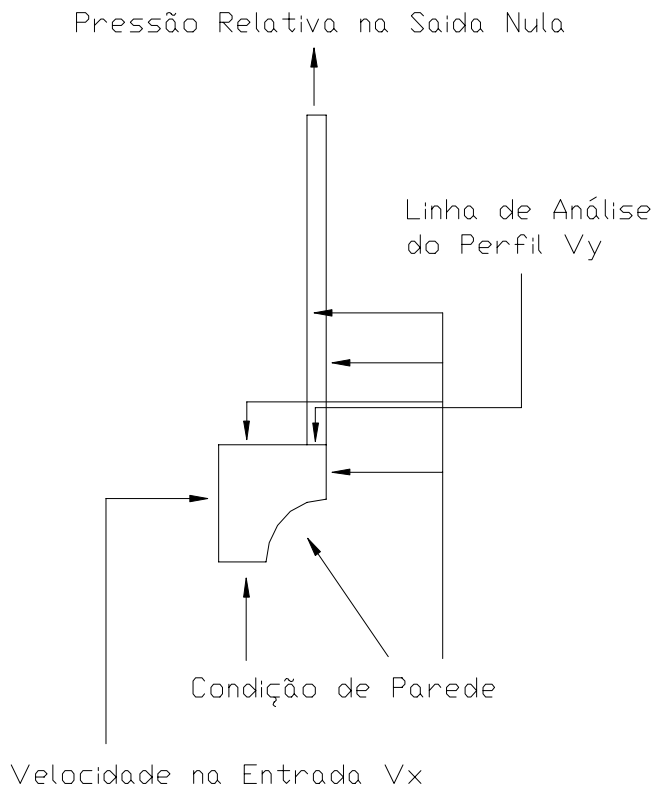


Figura 5 - Condições de contorno do rotor em corte.

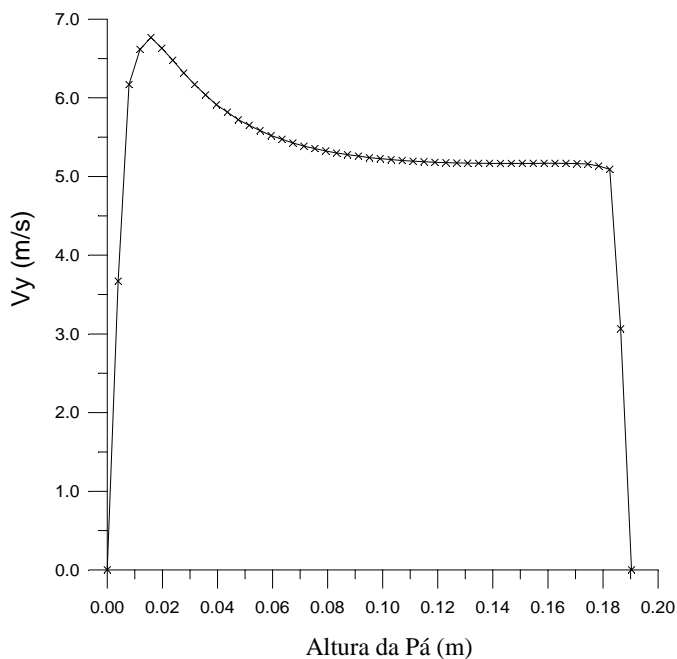


Figura 6 - Linha de análise do perfil Vy.

O valor aproximado para a velocidade  $V_y$ , 5 m/s, é determinado a partir da análise do escoamento num canal obtido através de um corte axial do rotor conforme figura (5). Nesta figura estão apresentadas as condições de contorno utilizadas. A velocidade  $V_x$ , na entrada, é obtida diretamente em função da vazão e da área de sucção valendo 0,94 m/s. Nesta projeção do rotor não é necessário considerar o efeito de rotação do mesmo. Como resultado desta análise se obtém o perfil de velocidades  $V_y$  na entrada das pás conforme figura (6). Observa-se que o ponto de velocidade máxima ocorre próximo à parede numa região de mudança brusca de direção.

O problema foi analisado em 4 etapas com a viscosidade assumindo os valores de 1, 0,1, 0,01 e 0,001  $\text{Ns/m}^2$ . Em cada uma das etapas são realizadas 50 iterações globais. A massa específica da água utilizada é de 998,2  $\text{Kg/m}^3$ .

As figuras (7), (8) e (9) apresentam os resultados obtidos, correspondentes a uma malha com 9376 nós e 9450 elementos, em linhas de corrente, linhas de isopressão e linhas de iso-velocidade respectivamente.

As linhas de corrente resultantes apresentam um comportamento relativamente orientado mostrando uma tendência ao alinhamento com as pás. Vale lembrar que o efeito da espessura das pás não foi ainda considerado.

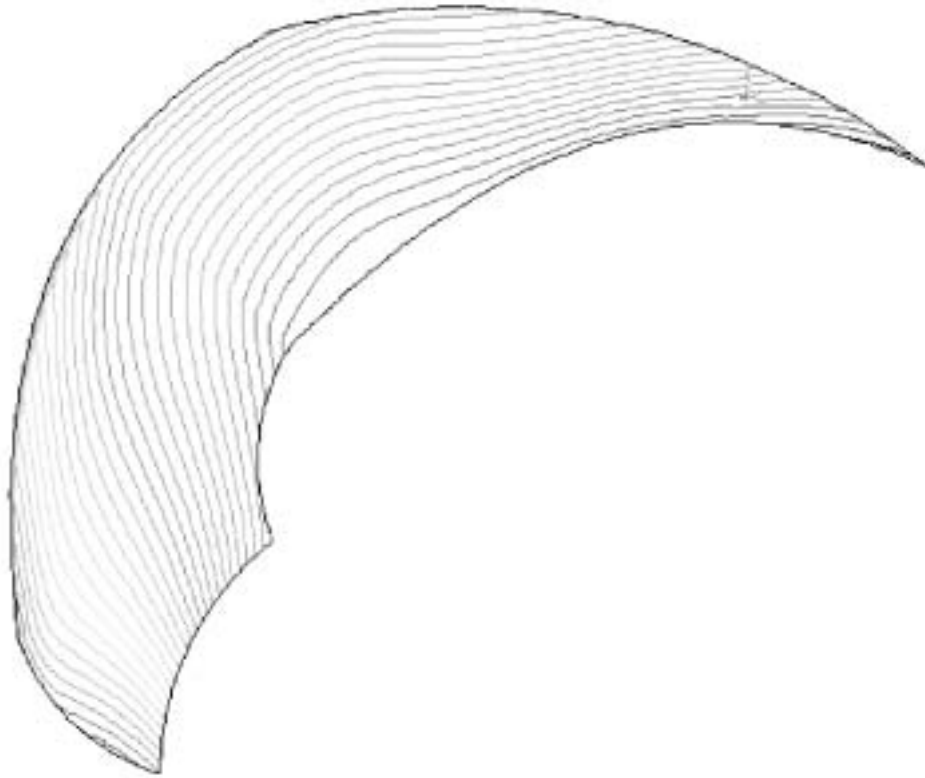


Figura 7 - Linhas de corrente.

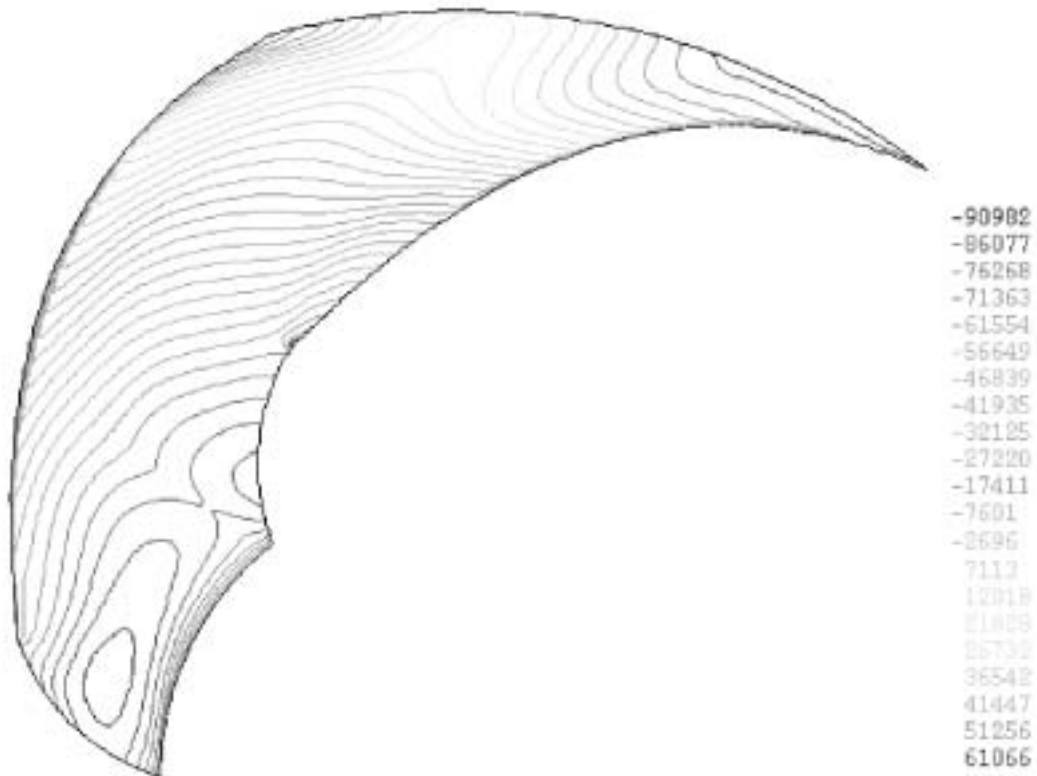


Figura 8 - Linhas de isopressão (N/m<sup>2</sup>).

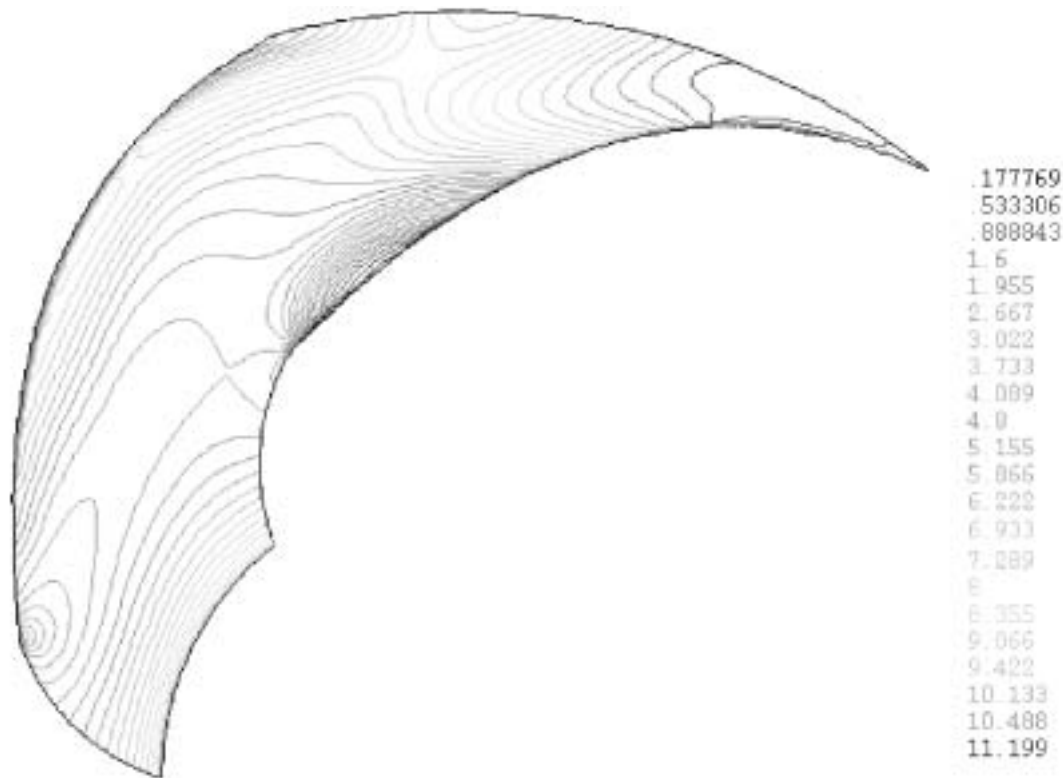


Figura 9 - Linhas de isovelocidade (m/s).

#### 4. CONCLUSÃO

A metodologia apresentada no presente trabalho foi testada num rotor radial de bomba comercial empregada na captação de água em poços artesanais. Embora ainda não validada, os resultados obtidos são muito significativos, já que estes demonstraram um comportamento dentro das previsões obtidas por outras metodologias convencionais.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao Centro Nacional de Supercomputação - UFRGS pelos recursos de hardware e software fornecidos. Ao programa RHAÉ - CNPq pelo suporte financeiro a este trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

DAVIS, R.L. & DANNENHOFFER, J.F. *Adaptive Grid-Embedding Flow Prediction Techniques for Turbomachinery Applications*. von KARMAN Institute for Fluids Dynamics, Numerical Methods for Flow Calculations in Turbomachines, Lecture Series 1994-06, Belgium, 1994.

LAUNDER, B.E. & SPALDING, D.B. *The Numerical Computation of Turbulent Flows*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.

PFLIEDERER, C. & PETERMANN, H. *Máquinas de Fluxo*, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, pp. 453, 1979.

SWANSON ANALYSIS SYSTEMS, *ANSYS User's Manual Revision 5.0*, 1992.