

I-289 - ESTUDO DO REGIME DE OPERAÇÃO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZADA PARA BOMBEAMENTO HIDRÁULICO ATRAVÉS DO USO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Afrânio Lucas Rodrigues⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade de Caxias do Sul (UCS). Mestrando na Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Leonardo Machado da Rosa^{*(1)}

Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Mestre e Doutor em Fluidodinâmica Computacional pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Professor adjunto na Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Lademir Luiz Beal⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Mestre e Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor adjunto na Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Sérgio Kucera⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor assistente na Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Endereço⁽¹⁾: Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 - Petrópolis - Caxias do Sul - RS - CEP 95070-560 – Brasil
- Tel: (54) 3218-2100 – e-mail: lmrosa1@ucs.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a operação de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD). Para tanto, primeiramente foi elaborado o desenho tridimensional da bomba, que então foi utilizado para a obtenção de uma malha numérica adequada. De posse da mesma, foram avaliados os campos de velocidade e pressão no equipamento em regime de operação. Bombas desse tipo são equipamentos que permitem o transporte de fluídos com grande eficiência energética. Seu uso é indicado quando se deseja grandes alturas manométricas com uma média vazão. Bombas centrífugas são as mais empregadas no mundo, sendo imprescindíveis para o transporte de fluídos tanto domésticos quanto industriais, entre eles a água. No caso do estudo de bombas centrífugas, o uso de técnicas numéricas torna-se interessante, pois pode prever com precisão o seu escoamento complexo (Shah et al., 2013).

PALAVRAS-CHAVE: Bombas centrífugas, Malhas, Simulação Computacional.

INTRODUÇÃO

Bombas hidráulicas são equipamentos utilizados para aumentar a energia do fluído de modo a permitir seu transporte e/ou elevação. A forma de aumento da energia é feita pela transformação de energia mecânica em energia potencial. Dentre as bombas hidráulicas, tem-se como destaque as bombas do tipo centrífugas.

Bombas centrífugas possuem uma grande importância em processos industriais de diversas áreas, sendo um dos tipos de bomba mais utilizados em plantas industriais. Por isso há o interesse de um melhoramento contínuo de seu rendimento, a fim de se possibilitar uma redução de custos com os sistemas de bombeamento. No entanto, a complexidade do escoamento no seu interior origina uma grande dificuldade e um alto custo para o estudo do seu comportamento em diferentes condições de operação. Neste sentido o uso de técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics) apresenta vantagens sobre ensaios experimentais, pois pode-se analisar campos de velocidade e pressão, por exemplo, mesmo em geometrias complexas. A sua utilização vem reduzindo cada vez mais os custos de estudos de bombas.

Nos últimos anos a CFD ganhou uma grande importância no projeto de bombas hidráulicas por permitir um estudo detalhado do comportamento da bomba em operação antes da produção de um protótipo, reduzindo

significativamente o custo e o tempo de projeto, além de permitir o estudo de variáveis que não seriam possíveis com testes físicos. Contudo os ensaios experimentais ainda são necessários para a validação dos resultados das simulações numéricas. Os métodos empregados por programas CFD são baseadas na solução numérica das equações de Navier-Stokes, para obtenção dos resultados na geometria estudada. No Método dos Volumes Finitos, esta geometria deve ser dividida em diversos pequenos volumes de controle, que formam a malha de cálculos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A bomba estudada neste trabalho é a Meganorm 32-160, do fabricante KSB. É indicada para bombeamento de fluidos limpos e turvos em abastecimento de água, drenagem, irrigação, indústria de açúcar e álcool, ar condicionado, instalações prediais e combate a incêndios. Nesta faixa de aplicação pode operar com vazões de até 40 m³/h com uma rotação máxima de 3500 RPM. Ela possui quatro partes relevantes a este estudo: o corpo, em formato espiral fundido em uma só peça e apoiada em pés próprios, com sucção horizontal e recalque vertical e com eixo na horizontal; o rotor, do tipo radial, fechado e de sucção simples, com seis pás; a tampa de pressão, no formato cilíndrico, fundido em uma só peça; e o eixo, provido de luva protetora na região de vedação, dada por gaxeta ou selo mecânico.

Para o desenho do modelo geométrico, foi utilizado o programa SolidWorks, da empresa Dassault Systemes. O código OpenFOAM foi utilizado para a geração e avaliação da malha numérica, bem como para as simulações do escoamento. Este é um código de CFD aberto da OpenFOAM Foundation que utiliza um sistema de bibliotecas escritas em C++, incluindo modelos para determinar o comportamento de domínios rotativos (Petit et al., 2009). Por fim, o programa ParaView foi utilizado no pós-processamento dos resultados. Também é um programa de código aberto, da empresa Kitware Inc., voltado para visualizações de geometrias CAD e de resultados de simulações.

Para a condução das simulações, foi considerada uma abordagem monofásica, estacionária e turbulenta. Para tanto, foi utilizado o programa *simpleFoam*. Este utiliza o método de volumes finitos para resolução de problemas que envolvam escoamentos turbulentos monofásicos, em regime estacionário. Devido ao escoamento ser turbulento tornou-se necessário escolher um modelo de turbulência afim de se modelar os efeitos da turbulência sobre o escoamento.

No escoamento estudado, devido a este ser incompressível e isotérmico, ele possui duas equações governantes, sendo elas a equação da conservação de massa e a de quantidade de movimento, mostradas na sequência.

A conservação de massa do escoamento estudado é dada pela Equação 1, que é derivada da equação de conservação de massa de fluidos Newtonianos. Na condição mostrada é aplicada apenas a escoamentos de fluidos incompressíveis e isotérmicos.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

onde \mathbf{u} é a velocidade absoluta do fluido. Já a equação de quantidade de movimento é dada pela Equação 2, que é derivada das equações de Navier-Stokes. Na forma apresentada só pode ser empregada em escoamentos de fluidos incompressíveis e isotérmicos.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\mu \nabla \mathbf{u} + (\mu_t \nabla \mathbf{u})^T \right) \quad (2)$$

onde P é a pressão do fluido, e $\mu + \mu_t$ é a soma da viscosidade dinâmica e da viscosidade turbulenta. Para determinar as características turbulentas do escoamento no interior da bomba, foi utilizado o modelo k-epsilon (Derakhshan e Nourbakhsh, 2008). O domínio de cálculo escolhido foi todo o interior da bomba, incluindo a voluta e o rotor. Essa abordagem traz a necessidade da divisão da malha de cálculos em dois domínios e o emprego de um método para a simulação do movimento do rotor em relação a voluta, neste trabalho o método escolhido foi o *Multiple Rotating Frames* (MRF), o qual considera a força de Coriolis agindo sobre o escoamento somente no domínio rotativo, que está sujeito ao movimento do rotor (Jafarzadeh et al., 2011). Neste domínio, regem as seguintes expressões:

$$(\nabla \cdot \vec{u}_r) = 0 \quad (3)$$

$$\vec{u}_r(\nabla \cdot \vec{u}) - \Omega \times \vec{u} = -\nabla P + \nabla \cdot (\nu_{eff}(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)) \quad (4)$$

onde \vec{u}_r é a velocidade relativa do fluido, e $\Omega \times \vec{u}$ é o termo que representa a força de Coriolis.

Foi considerado o escoamento de água no interior da bomba. Assim, as condições utilizadas nas simulações são dadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas e condições de contorno utilizadas.

Massa específica	1000 kg/m ³
Viscosidade	1 cP
Vazão	20 m ³ /s
Rotação	3500 RPM

RESULTADOS

Primeiramente foi necessário elaborar um modelo geométrico da bomba, idêntico ao modelo real. Foram utilizados uma máquina tridimensional e um paquímetro digital para obter as medidas necessárias para a modelagem geométrica de todos componentes que compõe a bomba. Para a aquisição das dimensões do rotor, este teve que ser usinado, o que possibilitou a medição completa de uma de suas pás. Esta operação pode ser vista na Figura 1. Para efeito de simplificação do modelo geométrico todas as seis pás que compõe o rotor foram consideradas simétricas.

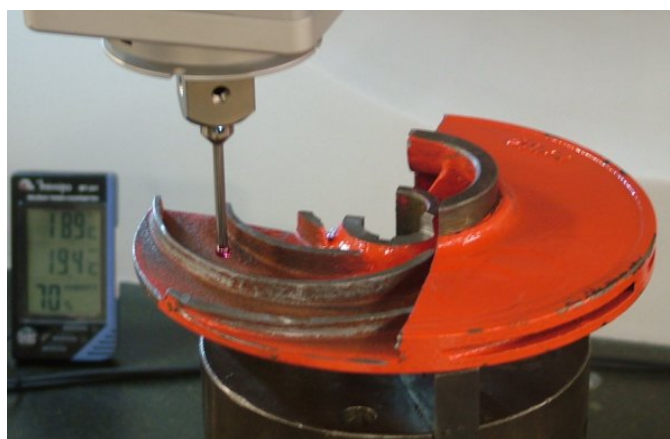


Figura 1. Medição da curvatura de uma pá do rotor.

De posse destas dimensões, foi utilizado um programa CAD para a criação do modelo tridimensional em escala real. Este modelo geométrico representa as regiões nas quais há o escoamento de fluido, as quais foram divididas em diversos volumes de controle utilizando-se programas disponíveis no software OpenFOAM. O conjunto destes volumes de controle compõe a malha numérica, que é apresentada na Figura 2. O código OpenFOAM conta com um gerador de malhas integrado e automático denominado *snappyHexMesh*, com o qual foi possível a criação de malhas de cálculo não-estruturadas com refinamentos diferentes. Para tanto, são determinados parâmetros como refino maior em regiões específicas e tamanho inicial dos volumes de controle.

O refinamento de malha necessário foi avaliado, e para tal foram criadas três malhas com 842 mil, 3,4 milhões e 7,7 milhões de volume de controle. Em todas há uma predominância de elementos hexaédricos e um refino maior na zona das pás do rotor, devido a sua geometria complexa e também pela grande importância dessa

região no desempenho da bomba. Ainda, a verificação de parâmetros de qualidade destas malhas, tais como ortogonalidade e simetria, além de uma análise visual, mostraram-se satisfatórios.

Para determinação da malha ótima para ser usada na simulação, foi escolhido o método GCI, conforme proposto por Roache (2008). Esse método consiste na comparação dos resultados obtidos com as malhas com diferentes refinamentos. Através do cálculo do valor do GCI, foi definido que a malha ótima é a de 3,4 milhões de volume de controle, que apresentou um erro médio na casa dos 9 % e um tempo de simulação de 38 horas para 10 mil interações, enquanto que a malha contendo 7,7 milhões precisou de um tempo de 80 horas para atingir esse número de iterações, e um erro próximo. Com um tempo menor de simulação e um erro médio aceitável, a malha de 3,4 milhões se mostrou a opção com o melhor custo benefício e ainda foi a malha que apresentou o resultado mais próximo ao do fabricante. Nesta malha, a maioria dos volumes gerados encontra-se na região junto ao rotor, pois esta é uma área na qual existem detalhes que requerem volumes muito pequenos, de grande importância na determinação do comportamento da bomba.

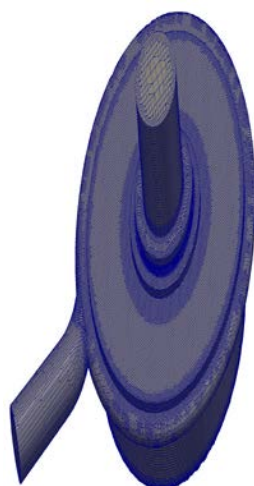


Figura 2. malha numérica.

Para a utilização da abordagem MRF foi necessário separar os volumes de controle em dois domínios, um estático e outro rotativo, próximos a carcaça e ao rotor, respectivamente. Na Figura 3, é apresentado um corte da malha, mostrando o domínio estático (em azul) e o rotativo (em vermelho). Uma vez que os critérios de qualidade de malha e definição dos domínios foram atendidos, o próximo passo foi a utilização da malha para a predição do comportamento turbulento do fluido escoando no interior da bomba, em diferentes condições de operação.

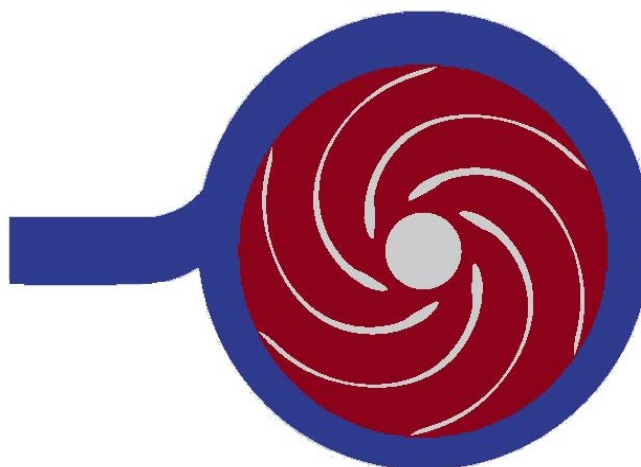


Figura 3. domínios estático, em azul, e rotativo em vermelho.

As Figuras 4 e 5 apresentam o comportamento do fluido no interior da bomba, resultante da simulação, após mais de 10.000 interações, em um plano paralelo ao rotor. Os vetores, apresentados na Figura 4 indicam o movimento do fluido, sob a influência do giro do rotor. Nota-se que os valores mais elevados da velocidade (cerca de 36 m/s) encontram-se junto às extremidades das pás do rotor, conforme esperado, bem como no início da voluta (Asuaje, 2005).

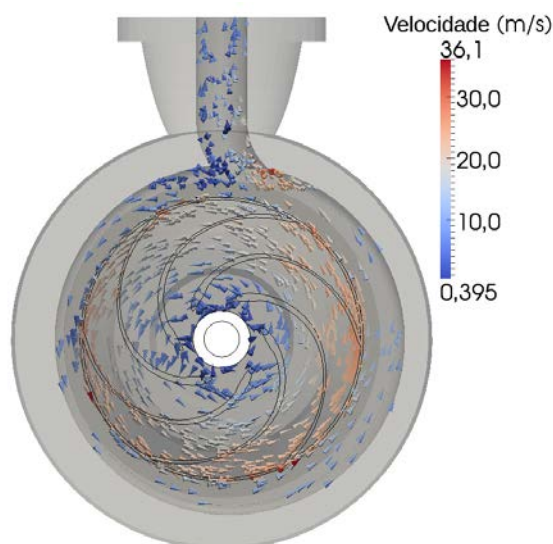


Figura 4. Campo de velocidade no interior da bomba.

Como pode-se perceber pela Figura 4, há um aumento de velocidade do fluido ao longo da direção radial do rotor, onde o fluido entra com uma velocidade baixa, e é acelerado pelo movimento do rotor. Analisando-se a Figura 4, também pode-se perceber que o fluido perde velocidade nas regiões em contato com a carcaça da bomba. Isto é ocasionado por refluxos, atrito e choques do fluido com a parede.

Na Figura 5, observa-se a distribuição da pressão manométrica ao longo do rotor, que diminui com o aumento de velocidade do fluido ao longo das pás, gerando uma diferença de pressão entre o recalque e a sucção da bomba. Para comparação com valores fornecidos com o fabricante, foi necessário avaliar essa diferença de pressão predita pela simulação.

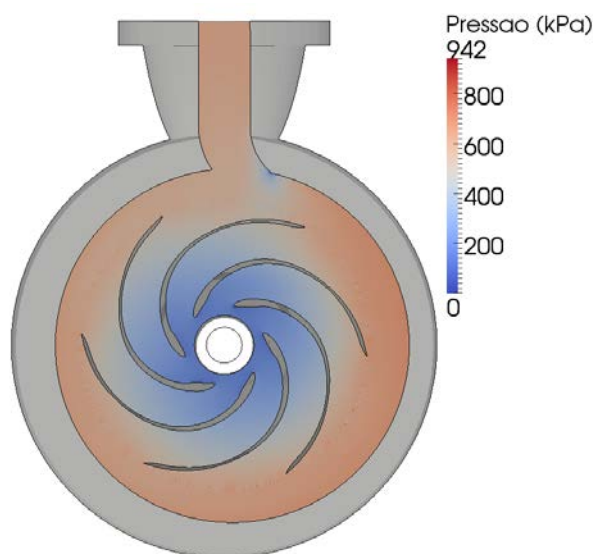


Figura 5. Campo de pressão no interior da bomba.

Na análise do campo de pressão, pode-se identificar um aumento de pressão ao longo da direção radial do rotor até a sua saída. Após a saída do rotor, espera-se que a pressão permaneça praticamente constante até a saída da bomba. Porém, na Figura 5 pode ser observada uma região de menor pressão na voluta, próximo a saída. Essa redução de pressão pode ter sido ocasionada pelo aumento de velocidade, como mostrado na Figura 4, e esse comportamento pode ocasionar uma redução no rendimento da bomba centrífuga. No entanto, comparando-se a diferença de pressão resultante da simulação com o fornecido pelo fabricante, observou-se uma diferença pequena. No resultado numérico, obteve-se que a bomba impõe um pressão de 434,38 kPa, enquanto o valor fornecido pelo fabricante é de 516,99 kPa. Diferenças podem ser devido a imprecisões nos modelos adotados e principalmente devido a modelagem geométrica, embora uma diferença de 16% seja considerada tolerável conforme a literatura consultada.

CONCLUSÕES

Através deste estudo, foi possível obter uma malha numérica adequada para uma bomba centrífuga, seja em termos dos critérios de qualidade disponíveis, bem como aplicando-a em simulações da bomba em condições de operação. A modelagem adotada também mostrou-se apropriada para os fenômenos presentes, uma vez que foram encontradas diferenças da ordem de apenas 16% na comparação dos valores preditos com aqueles fornecidos pelo fabricante. Esse erro se dá basicamente devido a imprecisão do modelo geométrico, sendo facilmente reduzido através de um modelo geométrico de maior precisão, como o modelo CAD utilizado na fase de projeto pelo fabricante. Desta forma, é possível concluir que o código OpenFOAM é capaz de fornecer resultados precisos para bombas centrífugas e esses resultados são dependentes do modelo geométrico o que torna essa etapa fundamental na precisão dos resultados numéricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERGS pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASUAJE, M.; BAKIR, F.; KOUIDRI, S.; KENYERY, F.; REY, R. Numerical modelization of the flow in centriugal pump: volute influence in velocity and pressure fields. *International Jounal of Rotating Machinery*, 3 (2005) 244-255.
2. DERAKHSHAN, S.; NOURBAKHS, A. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008) 1620-1627.
3. JAFARDAZE, B.; HAJARI, A.; ALISHAHI, M. M.; AKBARI, M. H. The flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump. *Applied Mathematical Modelling* 35 (2011) 241-249.
4. PETIT, O.; PAGE, M.; BEAUDOIN, M.; NILSSON, H. The ERCOFTAC centrifugal pump OpenFOAM case-study. In: 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems (2009).
5. SHAH, S. R.; JAIN, S. V.; PATEL, R. N.; LAKHERA, V. J. CFD for centrifugal pumps: a review of the state-of-the-art. *Procedia Engineering* 51 (2013) 715-720.