

Metodologia para Simulação de Bomba Centrífuga Utilizando Software Open Source

GAGLIARDE, J. H.¹, DOURADO, W. M. C.²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Mestrado do curso de Combustão e Propulsão - PCP.

²Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos, SP, Brasil

jorge.gagliarde@inpe.br

Resumo. *Este trabalho apresenta uma metodologia para simulação de bombas centrífugas utilizando CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional). A geometria foi separada em dois domínios para a geração de malha, a qual foi gerada pela ferramenta cfMesh e acoplada por meio de uma Interface de Malha Arbitrária (AMI). Para simular a operação da bomba, utilizou-se o método de Múltiplos Referenciais (MRF). As equações de conservação foram resolvidas por meio do algoritmo SIMPLE implementado no OpenFOAM e o modelo de turbulência $k-\omega$ SST foi utilizado. Apresentaram-se resultados da geração de malha juntamente com resultados parciais da simulação.*

Palavras-chave: CFD; Bomba centrífuga; OpenFOAM.

1. Introdução

Bombas centrífugas são as turbomáquinas mais utilizadas em toda indústria e um dos principais componentes de um motor foguete a propelente líquido (MFPL). A turbobomba de um MFPL, que geralmente é composta por uma turbina movendo duas bombas centrífugas, tem como objetivo a pressurização dos propelentes para posterior injeção na câmara de combustão [Sutton and Biblarz 2016].

A bomba centrífuga para MFPL consiste de três componentes principais. O impelidor radial rotaciona em alta velocidade de forma a transferir energia cinética para o fluido, o qual é coletado em uma voluta. A voluta tem como função a conversão da energia cinética aplicada pelo impelidor em pressão estática, minimizando as perdas. O terceiro componente é o indutor axial, instalado a montante do impelidor. Sua função é aumentar a pressão estática do fluido antes que entre na região de baixa pressão do impelidor, reduzindo a cavitação. Como consequência, a bomba pode operar a uma rotação mais elevada devido a redução do NPSHr (Net Positive Suction Head Required) [Gülich 2008].

Atualmente, o uso de técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, da sigla em inglês) é essencial para o projeto e otimização de bombas centrífugas e diferentes abordagens são encontradas na literatura, com diferentes modelos de turbulência e esquemas numéricos [Shah et al. 2013]. O alto custo e tempo envolvidos na análise experimental deste componente torna crucial a capacidade de prever seu desempenho antes da produção. Porém, deve-se observar que o CFD é um método auxiliar de projeto e não substitui completamente os resultados



experimentais, os quais podem ser utilizados para validação e correção do modelo computacional.

A rotação da bomba pode ser considerada de diferentes maneiras na simulação computacional. Para componentes individuais analisados sob condições estacionárias, uma abordagem de referencial rotativo único pode ser realizada. Neste caso, utiliza-se uma velocidade relativa na formulação das equações de conservação e a rotação é simulada pela adição dos termos das forças centrífuga e de Coriolis [Jasak and Beaudoin 2011]. Embora útil para uma estimativa do escoamento em um componente e econômica em requisitos computacionais, esta técnica não é capaz de capturar características do escoamento intrínsecas à interação entre os componentes da bomba. Este tipo de abordagem já não consiste no estado da arte [Gülich 2008].

É possível incluir todos os componentes da bomba na simulação por meio da técnica de múltiplos referenciais (MRF, em inglês). Nesta abordagem, o domínio é dividido em múltiplas regiões e as equações de conservação são resolvidas regionalmente. A formulação da equação de conservação de quantidade de movimento pode ser feita a partir da velocidade absoluta ou relativa [Jasak and Beaudoin 2011]. Devido ao seu caráter estacionário, ela não é capaz de capturar fenômenos transientes provenientes da interação rotor-voluta, mas é capaz de fornecer as características gerais do escoamento. Este método pode ser entendido como um "congelamento" da operação da bomba em um instante de tempo, por isso também é conhecido na literatura por *frozen rotor*.

Uma abordagem transiente pode ser realizada por meio de uma malha dinâmica, na qual a malha da região do rotor é rotacionada com relação à voluta. Neste caso, todos os fenômenos resultantes da interação entre os componentes são resolvidos e a convergência é obtida após um certo número de revoluções do rotor. Naturalmente, este tipo de simulação reproduz com muito mais precisão o escoamento fundamentalmente transiente em turbomáquinas, porém o custo computacional deste método ainda é um impedimento do seu uso em diversos casos [Gülich 2008]. A solução estacionária pelo método dos múltiplos referenciais pode ser utilizada como condição inicial para acelerar a convergência da simulação transiente. Comparações entre os dois métodos podem ser encontradas na literatura [Petit et al. 2009, Dick et al. 2001].

Outra complexidade do CFD de turbomáquinas envolve a escolha do modelo de turbulência. Diversos modelos existem na literatura e não existe uma escolha perfeita para qualquer tipo de escoamento [Bradshaw 1996], portanto, erros podem surgir com a seleção de um modelo de turbulência inadequado. Por exemplo, alguns modelos podem não modelar corretamente a turbulência exatamente nas condições de escoamento da bomba centrífuga, como é o caso do $k-\epsilon$ padrão, o qual pode gerar resultados insatisfatórios em escoamentos rotativos, desacelerados e em regiões de grandes gradientes de velocidades [Gülich 2008]. No entanto, a escolha do modelo de turbulência também deve levar em consideração o custo computacional e a convergência.

Este trabalho tem como objetivo o estabelecimento de uma metodologia para CFD de bombas centrífugas, a qual é exemplificada com a geração de malha e simulação inicial de uma bomba de combustível desenvolvida para o conjunto de turbobomba do MFPL L-75, a ser utilizado no programa espacial brasileiro. O estabelecimento desta técnica de CFD proporciona a capacidade de analisar o escoamento na bomba em detalhes para que ajustes possam ser feitos no projeto analítico inicial, bem como métodos de otimização possam ser futuramente aplicados.

2. Metodologia

No presente trabalho, utilizou-se o software OpenFOAM, uma biblioteca Open Source escrita em C++ e baseada no método dos volumes finitos. Para considerar a rotação do impelidor, o mé-



todo de múltiplos referenciais (Multiple Reference Frames, MRF) é utilizado juntamente com o *solver simpleFoam*, baseado no algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Neste método, as equações de Navier-Stokes são resolvidas para o referencial rotativo com dois termos adicionais: a força centrípeta e a força de Coriolis (Eq. 1). Observa-se que o método não é essencialmente estacionário e sua dedução preserva o termo temporal, porém o termo é cancelado no algoritmo SIMPLE e uma solução estacionária é obtida. Na região da voluta, a velocidade angular Ω é nula, portanto estes termos são cancelados da equação (Eq. 2).

$$\frac{\partial(u_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (u_r u_r) + 2\Omega \times u_r + (\Omega \times (\Omega \times r)) = \nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nabla \cdot (\nu \nabla u_r) \quad (1)$$

Na qual ρ é a massa específica do fluido, u_r a velocidade relativa, Ω a velocidade angular, r é o vetor posição, p a pressão e ν a viscosidade.

No referencial não rotativo, a Equação 1 se reduz para:

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = \nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nabla \cdot (\nu \nabla u) \quad (2)$$

$$u_r = u - \Omega \times r \quad (3)$$

O modelo de turbulência selecionado foi o $k-\omega$ SST. Este modelo busca tomar vantagem das forças do modelo $k-\epsilon$ no escoamento distante das paredes, transicionando-o para o modelo $k-\omega$ nas regiões próximas às paredes. Além disso, o modelo utiliza uma relação modificada para a viscosidade turbulenta, melhorando a precisão em regiões de alto gradiente de pressão ao limitar tensões cisalhantes. Atualmente, o modelo já foi calibrado baseando-se em mais de 10 anos de experiência de uso nos meios científico e industrial [Menter et al. 2003].

2.1. Geração de Malha

Para geração da malha computacional utilizou-se a ferramenta cfMesh, uma biblioteca gratuita multi-plataforma para geração automatizada de malhas construída a partir do OpenFOAM, podendo gerar malhas cartesianas, tetraédricas e poliédricas. É capaz de paralelização eficiente e com baixo uso de memória. Na geração de malhas cartesianas, o utilitário cfMesh possui apenas duas configurações obrigatórias, sendo estas: *surfaceFile*, a localização da geometria em formato compatível, e *maxCellSize*, o qual representa o tamanho máximo de cada célula no domínio. As configurações opcionais utilizadas envolvem a adição de camada limite e refinamento em regiões específicas, tanto por *patch* quanto por *feature edges* em formato *vtk*.

De forma a definir as zonas da simulação MRF, duas malhas foram geradas independentemente: uma para o rotor e outra para a voluta. As regiões foram unidas com a ferramenta *mergeMeshes* do OpenFOAM. Ambas as malhas geradas possuem como fronteira uma superfície em comum que será utilizada para o acoplamento. Esta superfície é definida como tipo *AMI* (*Arbitrary Mesh Interface*), um tipo de interpolação conservativa por projeção de Galerkin [Farrell and Maddison 2011], já implementado no OpenFOAM. Neste método, não é necessário que as faces tenham um encaixe perfeito, pois cada face receberá uma contribuição ponderada das faces adjacentes. É recomendado que as interfaces tenham as faces de suas células tão similares quanto possível, de modo que a soma dos pesos para cada uma seja igual a 1. Erros locais de continuidade são introduzidos quando os pesos se distanciam da unidade, no entanto é



possível especificar uma tolerância para os pesos, substituindo a projeção por uma condição de contorno de Dirichlet. Observou-se que a ocorrência de valores entre 0.9 e 1.1 não introduzem erros significativos na conservação de massa, desde que a média dos pesos em toda interface seja muito próxima de 1.

Para definição das superfícies para a projeção, utilizou-se a ferramenta *topoSet* do OpenFOAM, criando-se um conjunto de faces contendo todas as faces correspondentes a cada lado da interface. A criação da zona de células da malha para resolução das equações no referencial rotativo foi feita a partir da ferramenta *setSet*. Alternativamente, seria possível gerar a malha em passo único e definir a região rotativa por meio de uma superfície básica ou arquivo *stl* pela ferramenta *topoSet*, no entanto, a utilização do método AMI proporciona a vantagem de rápida alteração de uma das regiões sem a necessidade de refazer toda a malha. Além disso, a interface é totalmente compatível com simulações transientes de malha rotativa para trabalhos futuros.

2.2. Condições de Contorno

Definiu-se a vazão volumétrica de combustível e gradiente zero de pressão na entrada da bomba. Na saída da voluta, fixou-se a pressão em zero. O valor estipulado para pressão absoluta na saída não é relevante para esta análise, pois há interesse somente na diferença de pressão gerada pela bomba. Por isso, não há sentido físico no valor absoluto da pressão em cada ponto da bomba e valores negativos de pressão são encontrados no domínio. Esta abordagem só é válida porque a bomba está sendo simulada fora do regime de cavitação. A condição de contorno aplicada para velocidade na saída foi a *pressureInletOutletVelocity*, uma condição mista do OpenFOAM que aplica gradiente zero para escoamento para fora da bomba. Para escoamento contrário, aplica-se uma velocidade baseada no fluxo na direção normal ao *patch*. Esta condição de contorno proporciona maior estabilidade da simulação.

Para as paredes na região estacionária, aplicaram-se as condições de contorno de não escorregamento para velocidade. Para a região rotativa, recomenda-se o uso da condição de parede em movimento (*movingWallVelocity*). Em ambas aplicou-se a condição de gradiente zero para a pressão. Para a energia cinética turbulenta, aplicou-se uma intensidade turbulenta de 5% na entrada e uma função de parede para k nativa do OpenFOAM (*kqRWallFunction*).

3. Resultados e Discussão

Os resultados deste trabalho estão divididos em duas seções. Primeiro, apresenta-se a malha inicial obtida utilizando as ferramentas apresentadas anteriormente. Em seguida, resultados parciais da simulação são apresentados e suas possíveis consequências para o projeto da bomba são discutidas. Os resultados da simulação deverão ser utilizados para cálculo do valor de y^+ em cada uma das regiões da bomba, de forma a ajustar a camada limite conforme necessário. Após o ajuste da camada limite, a simulação será repetida para refinamento dos resultados. Os resultados apresentados neste trabalho serão transferidos para a nova malha e utilizados como condição inicial do domínio, proporcionando rápida convergência. Com isso, critérios de convergência mais estritos podem ser aplicados.

3.1. Malha

Por meio do utilitário *cfMesh*, obteve-se a malha apresentada na Figura 1. Devido à instabilidade numérica causada pela recirculação gerada pelo obstáculo da entrada do difusor, uma extensão da geometria foi feita. Melhor estabilidade na convergência foi obtida com esta alteração.



A interface entre as malhas está apresentada na Figura 2 e os pesos médios obtidos para a projeção foram 0.999 para a fonte e 1.001 para o alvo. Este resultado permitiu com que a conservação de massa fosse respeitada com alta precisão na interface.

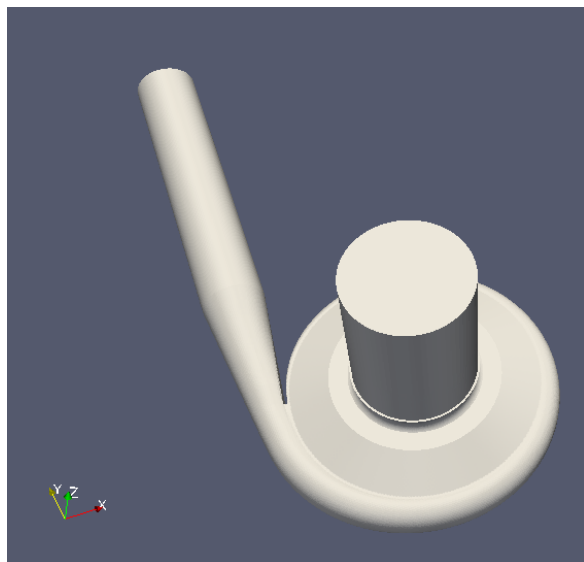


Figura 1. Visão externa do domínio da simulação. A extensão da voluta corresponde a 5 vezes o diâmetro da saída.

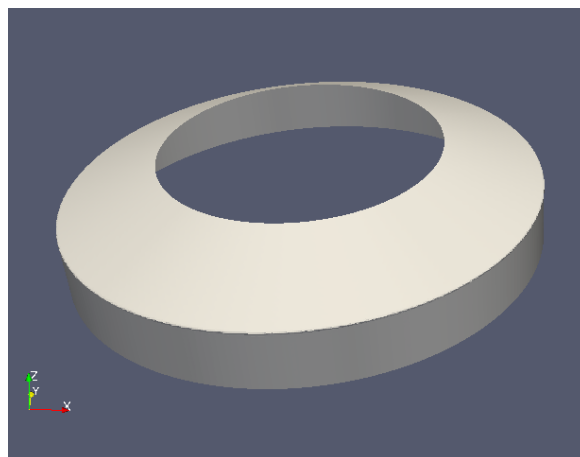


Figura 2. Superfície comum entre as malhas do rotor e da voluta na qual as faces da região AMI são definidas.

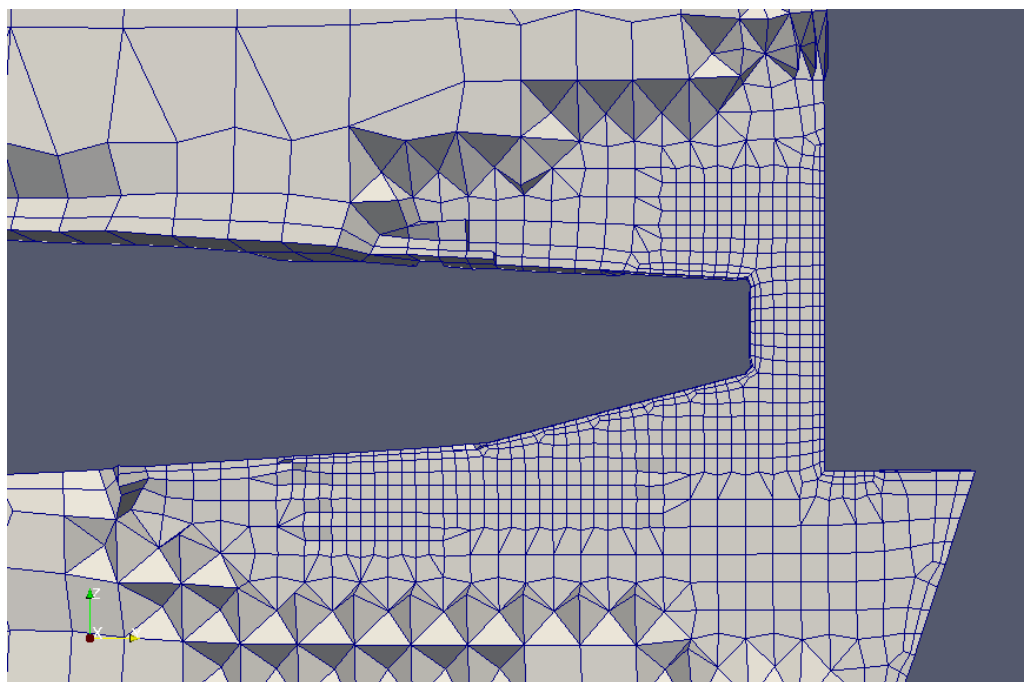


Figura 3. Exemplo de refinamento localizado obtido na geração de malha. Nota-se o aumento gradual da célula para reduzir a rigidez do sistema numérico.

A Figura 3 representa o resultado do refinamento por *feature edges* feito no indutor para resolução de uma passagem estreita próxima à entrada da bomba. Esta abordagem permitiu que regiões detalhadas da geometria pudessem ser representadas minimizando a contagem total de



células do sistema. No geral, a malha não apresentou imperfeições como elementos com alta não-ortogonalidade ou altamente distorcidos e totalizou 5696253 células. Ressalta-se que esta elaboração da malha é uma versão inicial de um processo necessariamente iterativo, devendo passar por alterações na camada limite e posterior estudo de convergência.

3.2. Simulação

Devido aos altos gradientes de pressão e alta velocidade de rotação, a simulação não pode ser inicializada a 100% da operação nominal da bomba. Embora as condições iniciais não devam alterar o resultado de uma simulação estacionária, os grandes gradientes geram instabilidade numérica e a convergência não foi alcançada diretamente. Por isso, iniciou-se a simulação com apenas 1% da rotação. As outras condições são obtidas por meio de relações de similaridade para turbomáquinas. A seguir, apresentam-se os resultados de 50% da operação nominal da bomba, o qual pode ser utilizado para inicialização da simulação com 100% da operação nominal, acelerando a convergência. Por isso, deve-se abordar estes resultados com cautela, já que apresentam apenas uma característica do escoamento e não a solução final para estimativa de eficiência.

A partir da análise preliminar do perfil do escoamento na seção representada na Figura 4, observa-se a presença de forte recirculação no difusor da voluta de acordo com as linhas de corrente. Embora a dimensão exata da recirculação não possa ser inferida por este resultado parcial, a presença deste fenômeno sugere que o projeto do difusor deverá ser revisto, já que esta recirculação representa possível perda de eficiência da bomba. Além disso, os perfis de velocidade nas pás e no indutor (Figura 5) estão coerentes com o previsto para a rotação estipulada, aumentando a confiabilidade na solução parcial.

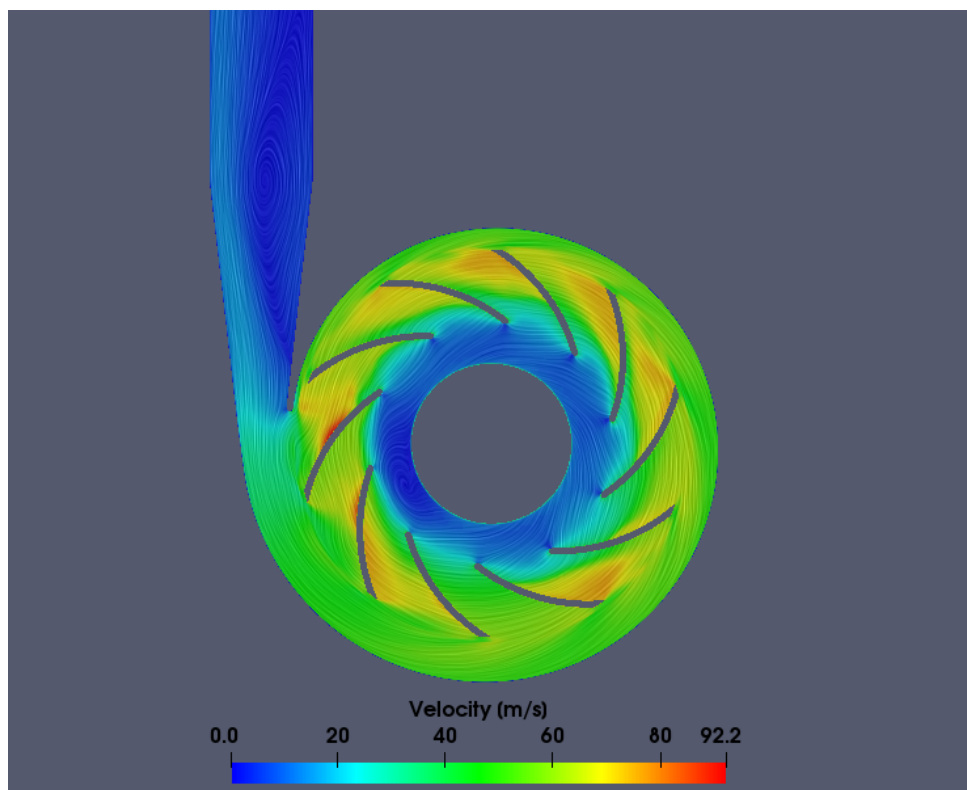


Figura 4. Perfil de velocidade em corte mostrando a região das pás do rotor e saída da voluta. As linhas claras representam linhas de corrente.

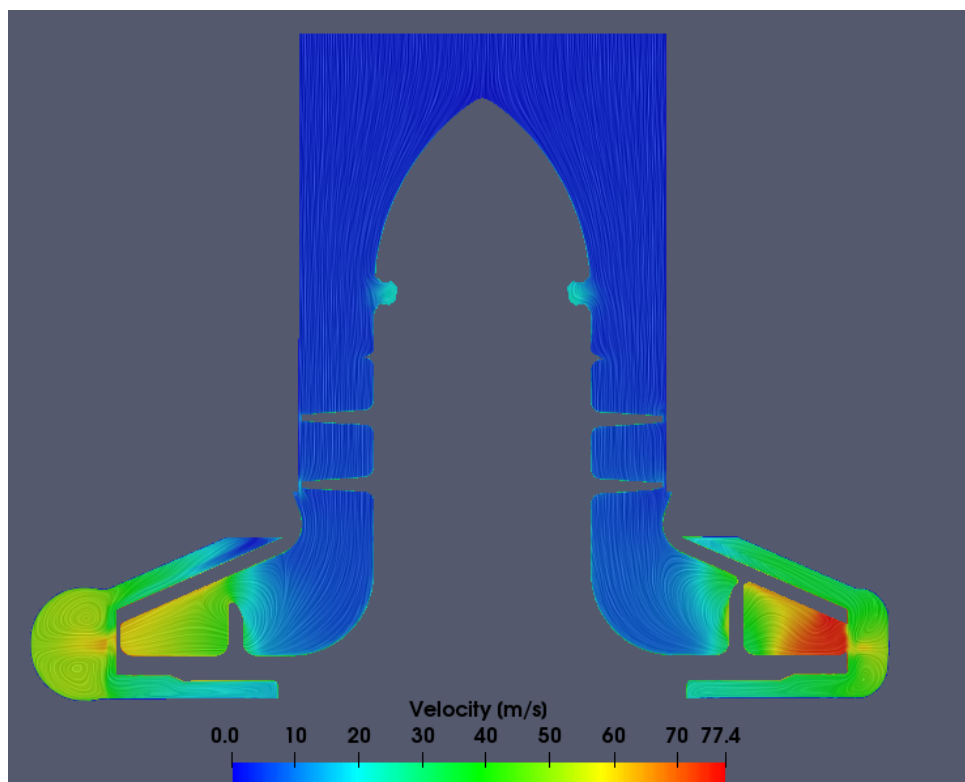
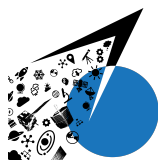


Figura 5. Perfis de velocidade em corte meridional. Observa-se a presença de recirculação na transição do rotor para a voluta.

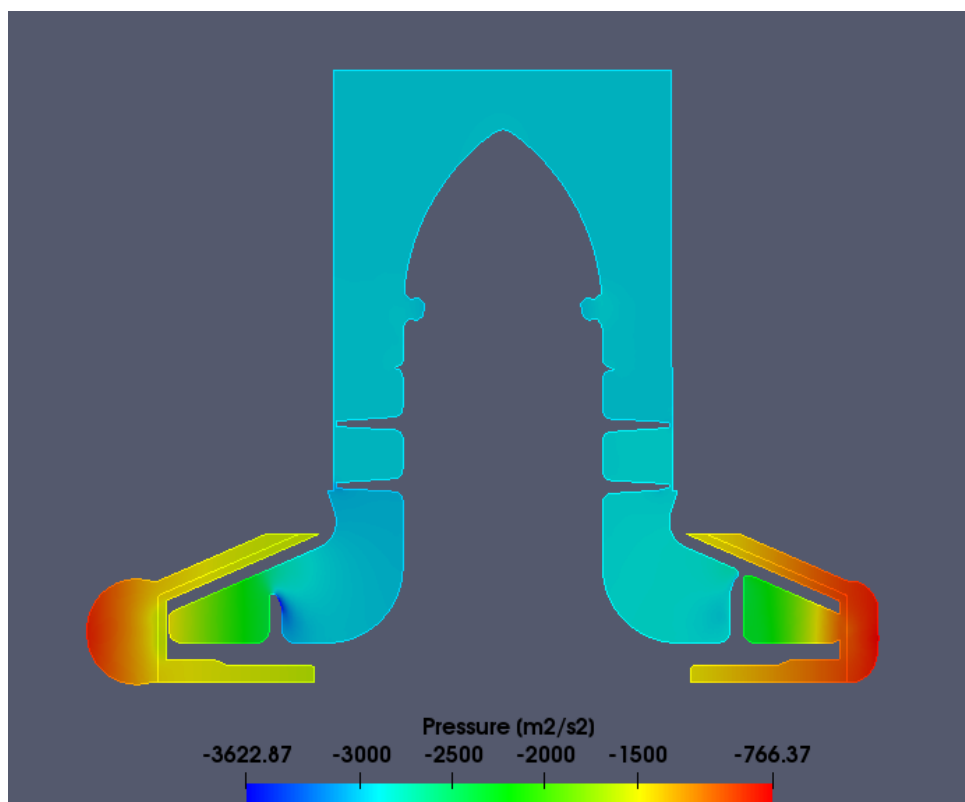


Figura 6. Perfil de pressão dinâmica na bomba. Apenas a diferença de pressão deve ser considerada e valores negativos são provenientes da definição da saída como zero.



A distribuição de pressão na seção meridional é apresentada na Figura 6. Os resultados parciais ainda não podem ser utilizados para aferição do ganho de pressão final da bomba, porém os resultados são condizentes com o perfil esperado. Nota-se o ganho de pressão conforme a energia cinética do rotor é aplicada no fluido e convertida em pressão na voluta. Conforme explicado na Metodologia, a pressão foi definida como zero na saída, portanto valores negativos são esperados no domínio, representando o ganho de pressão da entrada da bomba até a saída.

4. Conclusão

Uma metodologia para simulação de bombas centrífugas foi apresentada. Mostrou-se que é possível gerar uma malha de qualidade e realizar simulações complexas utilizando apenas ferramentas *Open Source*. Foi possível representar regiões complexas da geometria por meio de refinamento local da malha, controlando o número de células e, consequentemente, o custo computacional. A interface de malha arbitrária (AMI) foi usada com sucesso para acoplamento do rotor e da voluta sem divergências significativas na equação de conservação. Os resultados parciais já indicaram possíveis regiões da bomba com perfis de escoamento indesejados, direcionando melhorias futuras no projeto. Os perfis de velocidade, pressão e grandezas do modelo de turbulência serão utilizados como condição inicial para modelos mais precisos em trabalhos futuros.

Agradecimentos: Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro e ao Instituto de Aeronáutica e Espaço pelo fornecimento da geometria da bomba de combustível.

Referências

- Bradshaw, P. (1996). Turbulence modeling with application to turbomachinery. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(6):575–624.
- Dick, E., Vierendeels, J., Serbrugyns, A., and Voorde, J. V. (2001). Performance prediction of centrifugal pumps with cfd-tools. *Task quarterly*, 5:579–594.
- Farrell, P. and Maddison, J. (2011). Conservative interpolation between volume meshes by local galerkin projection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(1-4):89–100.
- Gülich, J. F. (2008). *Centrifugal Pumps*, volume 2. Springer.
- Jasak, H. and Beaudoin, M. (2011). Openfoam turbo tools: From general purpose cfd to turbomachinery simulations. In *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference*, pages 1801–1812. American Society of Mechanical Engineers.
- Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R. (2003). Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Turbulence, heat and mass transfer*, 4(1):625–632.
- Petit, O., Page, M., Beaudoin, M., and Nilsson, H. (2009). The ercoftac centrifugal pump open-foam case-study. In *Proceedings of the 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problem in Hydraulic Machinery and Systems, Brno, Czech Republic*.
- Shah, S., Jain, S., Patel, R., and Lakhera, V. (2013). Cfd for centrifugal pumps: A review of the state-of-the-art. *Procedia Engineering*, 51:715–720.
- Sutton, G. P. and Biblarz, O. (2016). *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons.