

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO EM UM ROTOR DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA

Ítalo Sabino Bezerra, italosb94@hotmail.com¹
Luís Morão Cabral Ferro, lferro@ufersa.edu.br¹

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido- UFRSA, Av. Francisco Mota, 572 - Bairro Costa e Silva, Mossoró RN, CEP: 59.625-900

Resumo: As bombas são equipamentos que transformam a energia mecânica proveniente da rotação de um rotor em energia cinética e de pressão e são utilizadas para o deslocamento dos fluidos. O desempenho da bomba é representado por curvas obtidas de forma experimental ou numericamente, designadas por curvas características de funcionamento, que representam a variação de algumas grandezas características da bomba como potência motriz, altura de elevação e eficiência em função da vazão. São em geral obtidas, para uma velocidade de rotação constante e para um determinado fluido, em geral água, para uma temperatura especificada. As curvas experimentais podem ser obtidas recorrendo a uma instalação laboratorial, mas requerem a manufatura de um modelo da bomba e a utilização de equipamento de medida. O procedimento referido é dispendioso e moroso. A Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD) pode assim ser utilizada como ferramenta para análise e cálculo do escoamento viscoso numa bomba permitindo de um modo fácil e rápido determinar a influência de um grande número de parâmetros nas condições de operação de uma bomba, bem como determinar as curvas características da bomba em função da vazão. Na extração e distribuição do petróleo são também utilizadas bombas pelo que o CFD pode ser utilizado para determinar as condições com diferentes tipos de petróleo. O objetivo deste artigo é calcular, recorrendo ao CFD, o escoamento numa bomba radial, para diferentes tipos de petróleo com o objetivo de calcular a influência do número de Reynolds no desempenho da bomba e determinar curvas de correlação para a eficiência e para o coeficiente de altura. Será ainda analisado o comportamento das linhas de corrente do escoamento no interior do rotor da bomba para diferentes tipos de petróleo. O escoamento será calculado recorrendo ao código ANSYS CFX. Nas simulações do escoamento o regime será considerado permanente e a pressão de referência é de uma atmosfera. As superfícies sólidas são consideradas lisas e o modelo de turbulência é o modelo k-ε padrão. Na seção de entrada a pressão total imposta é igual a uma atmosfera e na seção de saída é especificada a vazão mássica. Nas paredes sólidas é imposta a condição de não escorregamento com velocidade igual à velocidade da parede. São apresentadas e comparadas as curvas características de desempenho da bomba, curvas de correlação do coeficiente de altura e de rendimento em função do número de Reynolds, as linhas de corrente e as distribuições de velocidade no domínio e as distribuições de pressão sobre a superfície da pá para os diferentes fluidos analisados.

Palavras-chave: bomba centrífuga, CFD, curva característica, número de Reynolds.

1. INTRODUÇÃO

Na fase de seleção e dimensionamento de uma bomba são necessários métodos e procedimentos que proporcionem a determinação dos parâmetros inerentes ao estudo de seu comportamento e desempenho. As propriedades dos fluidos influenciam diretamente no comportamento das bombas. Alguns parâmetros de funcionamento tais como, a potência motriz P , a altura útil de elevação H e a eficiência η podem ser influenciados pela viscosidade do fluido bombeado (Li, 1999; Segala, 2010). Para fluidos com viscosidade elevada, para rotores de pequena dimensão ou para velocidades de rotação baixas, os efeitos do número de Reynolds, $Re = ND^2/\nu$, onde N é a velocidade de rotação em rad/s, D o diâmetro do rotor e ν a viscosidade cinemática podem ser importantes e influenciar no desempenho de uma bomba centrífuga. Softwares de Mecânica dos Fluidos Computacional podem facilitar a determinação das características inerentes ao comportamento da bomba em função da viscosidade do fluido bombeado, uma vez que a principal vantagem de utiliza-los é capacidade de mensurar os parâmetros e características detalhadas do escoamento em sua totalidade, sem que haja a necessidade que um modelo seja manufaturado efetivamente, tornando possível obter as

curvas características de desempenho da bomba e os parâmetros necessários ao projeto de bombas, para uma determinada aplicação. A utilização do *CFD* permite uma análise rápida do escoamento permitindo, uma melhoria da geometria da bomba e consequentemente da sua eficiência bem como uma determinação do campo de pressões e redução da cavitação (Anagnostopoulos, 2009).

No presente artigo se analisa, usando o software ANSYS CFX e seus módulos, o comportamento de uma bomba centrífuga para água e dois petróleos, um leve e outro pesado, com o objetivo de verificar a influência da viscosidade no desempenho da bomba. São determinadas as curvas características de uma bomba para os fluidos referidos e comparados os resultados obtidos para a altura de elevação, rendimento e potência motriz.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Segundo Macyntire (1997) *o projeto de uma bomba centrífuga possui uma parte que é própria a esse tipo de máquina e outra comum a vários tipos*. O procedimento de projeto consiste basicamente na determinação de uma série de parâmetros: a escolha do tipo de rotor, o número de estágios, a correção de vazão, o rendimento hidráulico, a energia teórica cedida pelo rotor ao fluido, a potência motriz, as grandezas que caracterizam o aspecto construtivo do rotor, o número de pás, o traçado das pás, entre outros.

O funcionamento de uma bomba é caracterizado por um conjunto de variáveis fundamentais. Podemos classificá-las principalmente em três grupos distintos de variáveis (Falcão, 2004), tais como, as variáveis de controle, as propriedades do fluido e as variáveis geométricas. No primeiro grupo figuram as variáveis das quais se possui controle prévio do operador, ou seja, tais variáveis são independentes da variação das demais, como por exemplo, a velocidade de rotação N que dependerá exclusivamente da corrente utilizada no motor, que por sua vez é um parâmetro externo que pode ser alterado com facilidade. As propriedades físicas dos fluidos terão também forte influência no funcionamento do sistema, dentre elas figuram principalmente duas, a massa específica ρ e a viscosidade dinâmica μ . Por último, temos as variáveis geométricas que influenciam significativamente no funcionamento da máquina como, por exemplo, os ângulos de curvatura das pás do rotor ou o diâmetro D do rotor, a largura da roda b . As curvas características de funcionamento da bomba são diagramas que relacionam grandezas que caracterizam seu funcionamento. Tais curvas podem ser obtidas por métodos experimentais, analíticos ou numéricos, variando independentemente as grandezas de controle escolhidas previamente, daí é possível obter todas as condições de funcionamento da bomba. São comumente tomadas em análises de bombas e turbomáquina em geral a velocidade de rotação N e a vazão volumétrica Q como variáveis de controle e grandezas como altura útil de elevação H_u , potência P_m e rendimento η , como parâmetros de estudo. Considerando um escoamento em regime estacionário, incompressível e adiabático, a altura útil de elevação H pode ser calculada pela equação de energia entre as seções de entrada e saída da bomba, Eq. (1), onde, ρ é a massa específica, g a constante de gravidade, p_1 e p_2 são pressões absolutas, V_1 e V_2 velocidades, e z_1 e z_2 alturas estáticas, referentes às seções de entrada (índice 1) e saída (índice 2) de líquido da bomba, respectivamente. A potência motriz P relaciona-se com o rendimento total η pela Eq. (2)

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (z_2 - z_1). \quad (1)$$

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta}. \quad (2)$$

A teoria unidimensional de escoamento em turbomáquinas permite estabelecer uma relação entre o rendimento e a altura útil de elevação. A equação de Euler, Eq. (3), relaciona os triângulos de velocidade entre as seções de entrada e saída, onde H_e é altura total de elevação, U_2 e U_1 são as velocidades de transporte, e V_{2t} e V_{1t} as componentes tangenciais da velocidade absoluta nas seções à saída e à entrada do rotor, respectivamente.

$$H_e = \frac{H}{\eta} = \frac{U_2 V_{2t} - U_1 V_{1t}}{g} \quad (3)$$

Aplicando os conhecimentos advindos da análise dimensional, é possível obter uma equação geral que rege o funcionamento de uma família de turbomáquinas geometricamente semelhantes, e daí, determinar grupos de coeficientes adimensionais importantes ao estudo das mesmas, que por sua vez podem ser associados em curvas representativas (Fox, 2012). As principais variáveis adimensionais são os coeficientes de potência χ , de altura de elevação ψ , e vazão ϕ , o rendimento η , o número de Reynolds e a velocidade específica N_s .

$$\chi = \frac{P}{\rho N^3 D^5}, \psi = \frac{gH}{N^2 D^2}, \phi = \frac{Q}{ND^3}, \eta = \frac{\phi\psi}{\chi}, \text{Re} = \frac{\rho ND^2}{\mu} \text{ e } N_s = \frac{NQ^{1/2}}{(gH)^{3/4}} \quad (4)$$

A influência do número de Reynolds é caracterizada através dos coeficientes f_H e f_η para a altura de elevação e rendimento, respectivamente, correlacionados no gráfico apresentado em Falcão (2004) conforme a Fig. 3 e podem ser calculados de acordo com a Eq. (5), onde $F(N_s)$ e $f(N_s)$ são funções da velocidade específica. Esses coeficientes permitem correlacionar e estimar valores de altura de elevação e rendimento em função da variação do número de Reynolds.

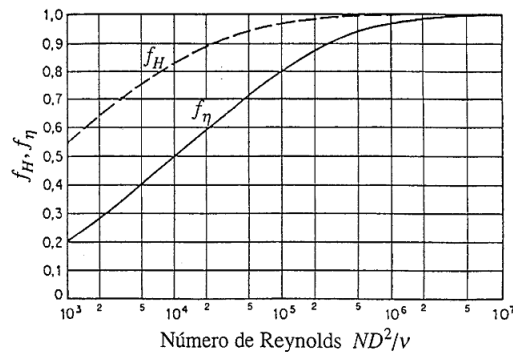


Figura 1. Fatores representativos da influencia do número de Reynolds para a altura de elevação e rendimento

$$\frac{gH}{N^2 D^2} = f_H F(N_s); \eta = f_\eta f(N_s) \quad (5)$$

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em abordar os aspectos teóricos inerentes ao cálculo numérico das curvas características de funcionamento de uma bomba radial ou centrífuga. O objetivo é calcular o escoamento e analisar o desempenho de uma bomba radial em função da variação das características viscosas do fluido de trabalho utilizado para uma mesma velocidade de rotação do rotor. A geometria e a malha referente ao domínio fluido foram construídas a partir de módulos específicos para turbomáquinas associado ao pacote ANSYS tomando como base o projeto anteriormente descrito. Utilizando o recurso ANSYS BladeGen (ANSYS, 2013), é possível construir um modelo geométrico para a região fluida com as mesmas características descritas em projeto para as devidas simulações propostas. Este recurso tem a capacidade de gerar a geometria para vários tipos de turbomáquinas, incluindo as bombas radiais. Uma vez tal etapa concluída, o mesmo será importado ao ANSYS TurboGrid (ANSYS, 2013), que é responsável pela etapa de geração da malha espacial específicas para esse tipo de simulação. A vantagem de utilizar esse método está relacionada à forma como a malha é criada cujo modelo de topologia é o mais apropriado para a análise de turbomáquinas. Em seguida, o mesmo será importado ao ANSYS CFX, software responsável pela simulação do modelo. Nele será possível realizar a etapa de definição dos parâmetros necessários à análise numérica, tais como, as condições de contorno, definição de fluido utilizado, critérios de convergência e expressões matemáticas, bem como uma plataforma de apresentação e análises de resultados obtidos.

O objetivo das simulações a serem realizadas é obter as curvas características de desempenho da bomba, que relacionam a potência consumida, a altura de elevação e a eficiência do sistema em função da vazão para ambos os fluidos em análise. Isto foi feito fixando a velocidade de rotação e variando a vazão em pontos estratégicos do escoamento de forma que sejam obtidas tais curvas. Nessa vertente serão analisados basicamente três fluidos um deles será a água uma vez que já é utilizada nos testes de funcionamento de bombas e outros serão petróleos de características viscosas diferentes. As curvas obtidas para os fluidos serão analisadas e comparadas a fim de se obter as características de desempenho da bomba em função da mudança do fluido em bombeamento bem como a distribuição do campo de velocidades.

3.1. Modelo Geométrico

A bomba analisada foi projetada por Souza (2014) conforme a Tab. 1 que descreve suas principais dimensões.

Tabela 1. Grandezas e dimensões para a geometria do rotor

Grandeza	Valor
Diâmetro de entrada do rotor d_1	165 mm
Diâmetro de saída do rotor d_2	345 m
Diâmetro do eixo d_n	54 mm
Ângulo de entrada das pás β'_1	18,63°

Ângulo de saída das pás β'_2	30,0°
Número de pás	10
Espessura da pá	4 mm
Largura da pá à entrada b_1	49 mm
Largura da pá à saída b_2	22 mm

De acordo com os dados anteriores foi possível construir o modelo geométrico. A Fig. 4 mostra modelo tridimensional para o rotor da bomba projetada.

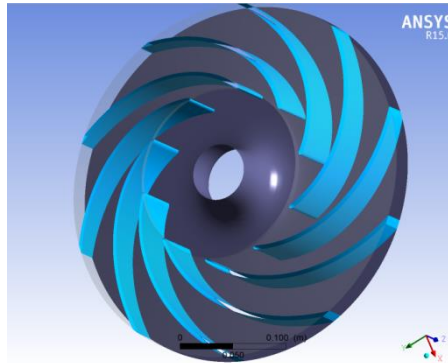


Figura 2. Modelo tridimensional do rotor da bomba

3.2. Geração de Malha

Em paralelo à construção do modelo geométrico a região fluida é discretizada de acordo com o que se deseja obter de resultado da simulação. O ANSYS Turbogrid é um módulo específico para esse tipo de discretização gerando um modelo de topografia com refinamentos nas regiões mais importantes da malha. Descrevem-se em seguida as características da malhas geradas. A malha foi gerada de forma automática e é totalmente estruturada, construída para um modelo de simulação de escoamento periódico em função da simetria do modelo realizada num domínio contendo apenas uma das pás. O domínio é definido em termos de um canal que é percorrido pelo fluido limitado pelas regiões sólidas tais como as pás, cubo e o invólucro exterior.

Tabela 2. Características da malha

Grandeza	Valor
Número de nós	297693
Número de Elementos	273408
Número de Hexaedros	273408

Na Fig. 3 é apresentada a malha tridimensional utilizada com regiões diferenciadas por cores diferentes. A verde está representada a seção de entrada, em vermelho a seção de saída, em roxo o invólucro exterior, em amarelo as faces periódicas e azul escuro o cubo.

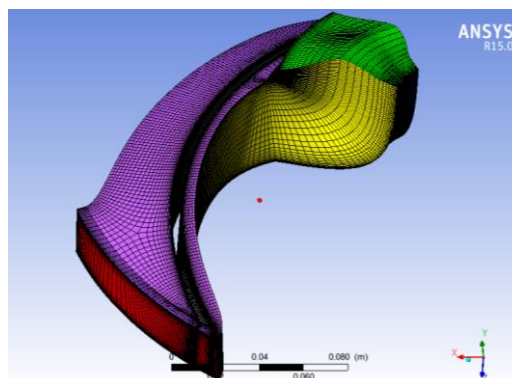


Figura 3. Malha tridimensional para o rotor

3.3 Parâmetros das Simulações

As simulações foram efetuadas para três fluidos de trabalho com propriedades viscosas distintas, água ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ e $\mu=8,899 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), petróleo pesado ($\rho=942,1 \text{ kg/m}^3$ e $\mu=66,06 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) e petróleo leve ($\rho=883,3 \text{ kg/m}^3$ e $\mu=52,26 \text{ mPa}\cdot\text{s}$). O escoamento foi considerado em regime estacionário com pressão de referência igual a uma atmosfera, o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão (Launder, 1974) cujos critérios de convergência estipulados em resíduo RMS mínimo de 0,0001 na continuidade, nas três componentes da velocidade e nas variáveis k e ε , e um limite máximo de 1000 iterações. O escoamento no rotor foi simulado para cada um dos fluidos fixando a velocidade de rotação em 1450 r.p.m. em torno do eixo Z no sentido oposto ao da inclinação das pás. A condição de contorno imposta na seção de entrada, para todas as simulações, foi uma pressão total de uma atmosfera e escoamento normal à seção (*pressure inlet*) e à saída foi fixada a vazão mássica (*mass flow rate*) e nas superfícies sólidas consideradas lisas foi imposta a condição de não escorregamento (*no-slip*). Dentro de uma faixa operacional de vazões volumétricas foram escolhidos estrategicamente dez pontos conforme a Tab. 3.

Tabela 3. Condições de contorno à saída

Simulação	Q (m ³ /s)	Água	Petróleo Pesado	Petróleo Leve
		$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}$ (kg/s)
1	0,015	15,00	14,13	13,25
2	0,025	25,00	23,55	22,08
3	0,045	45,00	42,39	39,75
4	0,065	65,00	61,24	57,41
5	0,085	85,00	80,08	75,08
6	0,105	105,00	98,92	92,75
7	0,125	125,00	117,76	110,41
8	0,145	145,00	136,60	128,08
9	0,165	165,00	155,45	145,75
10	0,185	185,00	174,29	163,41

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram efetuadas simulações do escoamento para os três fluidos já citados e para todas as vazões referidas na Tab. 3, num total de trinta simulações. As simulações foram realizadas em um computador modelo HP Compac Pro 6305 SFF, processador AMD A8-5500B APU 3,2 GHz e memória 4 GB, alocado nas instalações físicas do Laboratório de Simulação (LABSIM) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Mediante a realização dos procedimentos listados anteriormente foi possível construir e analisar as curvas características de desempenho para o rotor da bomba atrás referida, bem como as curvas de correlação entre os coeficientes adimensionais, parâmetros de correlação das propriedades viscosas e distribuição de velocidades e pressão no domínio.

Nas simulações realizadas foi observada uma maior dificuldade na convergência para os pontos de baixa vazão para todos os fluidos de trabalho. Essa dificuldade na convergência para baixas vazões existe devido à formação de zonas de recirculação de fluido do escoamento na região entre pás. Além disso, verificou-se que em viscosidades mais baixas como no caso da água o número de iterações é bem maior, variando entre 57 e 338 iterações, ao passo que para o petróleo leve o intervalo varia entre 25 e 148, e para o petróleo pesado varia entre 25 e 128.

Os resultados obtidos para os valores de altura útil de elevação, potência, rendimento e coeficientes adimensionais para os fluidos de trabalho são apresentados em seguida. Os dados obtidos para altura útil de elevação, potência e rendimento foram plotados em função da vazão volumétrica estipulada. A Fig. 4 mostra três gráficos, comparando cada grandeza individualmente em relação ao fluido utilizado. Em forma alternativa de análise são apresentadas na Fig. 5 as curvas características dos coeficientes adimensionais. Em detrimento das propriedades viscosas é possível observar uma redução da eficiência dos petróleos em relação à água. Outro fato está relacionado com o deslocamento do ponto de máximo rendimento. Para a água o rendimento máximo é de 96,1 % na vazão de 0,085 m³/s e para os petróleos leve e pesado, rendimentos máximo de 93,4 % e 93,4 %, respectivamente, ocorrem, porém na vazão de 0,065 m³/s, isto é para uma vazão menor em conformidade com a Eq. (5), de modo a garantir a igualdade da velocidade específica. Convém ressaltar que como as simulações foram realizadas apenas para o rotor da bomba e o rendimento mostrado é apenas hidráulico e se refere somente às perdas no rotor.

As curvas de potência dependem basicamente de três variáveis, a altura útil de elevação, o rendimento e a massa específica do fluido. Os fluidos mais viscosos têm maiores potências dissipada devido à dificuldades de escoamento, contudo observando o arranjo das curvas o parâmetro que influenciou diretamente a potência foi a massa específica, em que os níveis de maiores potência são observados para água seguida pelo petróleo pesado e pelo petróleo leve, especificamente nessa ordem. Com o aumento da viscosidade a altura de elevação é menor reduzindo os níveis de potência dissipada, ao passo que o rendimento é menor elevando os níveis de potência, o que nos leva a crer que

aparentemente que a influência desses parâmetros são equivalentes e contrárias, cujo fator que predomina na disparidade entre as curvas é a massa específica.

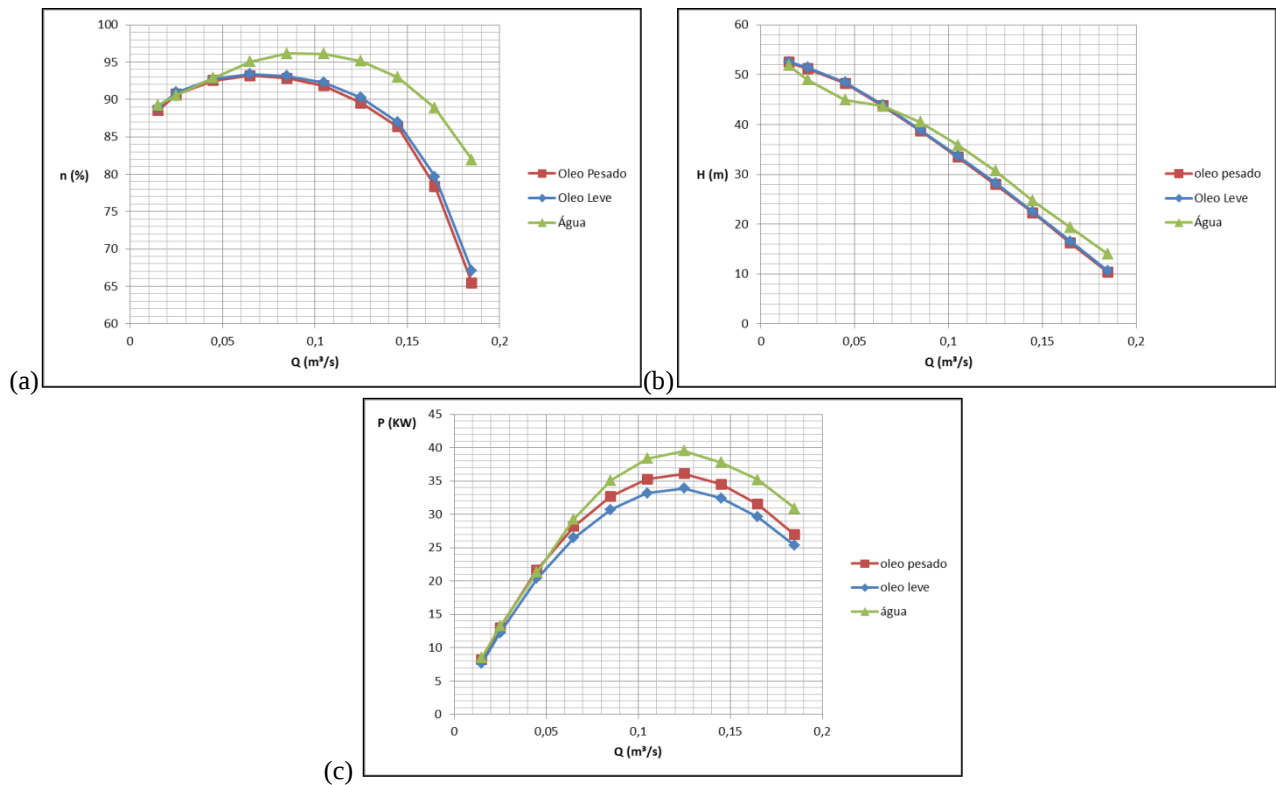


Figura 4. Comparação entre as curvas características da bomba para os três fluidos utilizados: (a) rendimento η ; (b) altura de elevação H e (c) potência motriz P .

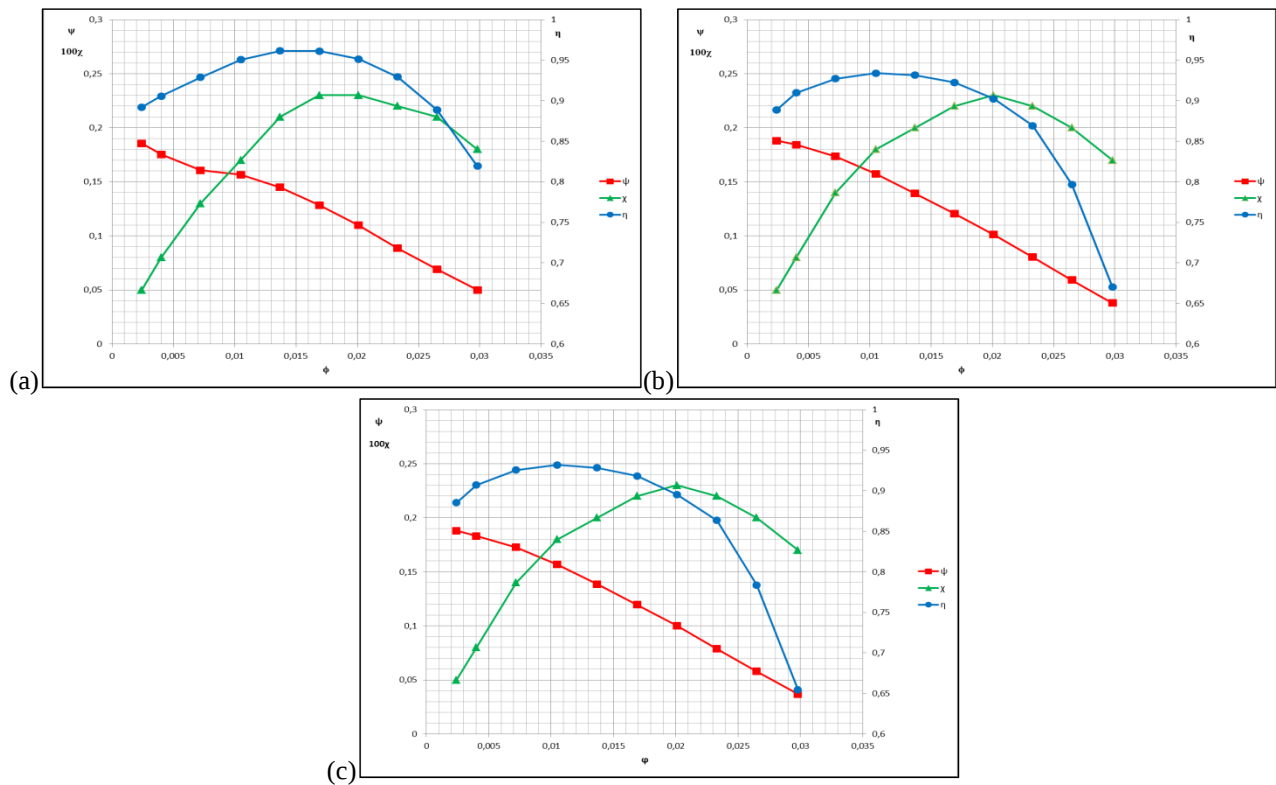


Figura 5. Curvas características dos coeficientes adimensionais para: (a) água; (b) petróleo leve e (c) petróleo pesado.

Na altura de elevação os resultados confirmam o esperado, com os fluidos menos viscosos, e consequentemente com maiores números de Reynolds, com maior altura de elevação, para a mesma vazão, que os fluidos mais viscosos. Para os pontos de baixa vazão, para a água se verifica uma situação contrária, exibindo a água menor altura de elevação que os petróleos. Isto se deve, provavelmente, a um problema relacionado à malha utilizada, cuja seção de entrada de fluido é muito próxima da aresta de entrada do rotor caracterizando um fenômeno de pré-rotação que induz formação de vórtices no escoamento, com escoamento parcialmente em sentido reverso na seção de entrada. Na Fig. 6 se comparam, as distribuições de velocidades para a água e para o petróleo pesado, numa seção a 50% da envergadura da pá do rotor, isto é, a 50% da largura b do rotor, para vazões $0,045 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$. Para o escoamento com petróleo para $Q=0,045 \text{ m}^3/\text{s}$, Fig. 6 (b) é visível uma zona de recirculação de fluido muito extensa com recirculação do fluido, deve a , enquanto, no escoamento com água Fig. 6 (a) uma zona de baixa velocidade no lado de pressão da pá. Na vazão de $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$, Fig. 6 (c) e (d), o escoamento é quase sempre colado à pá com exceção de uma pequena zona próximo do bordo de fuga.

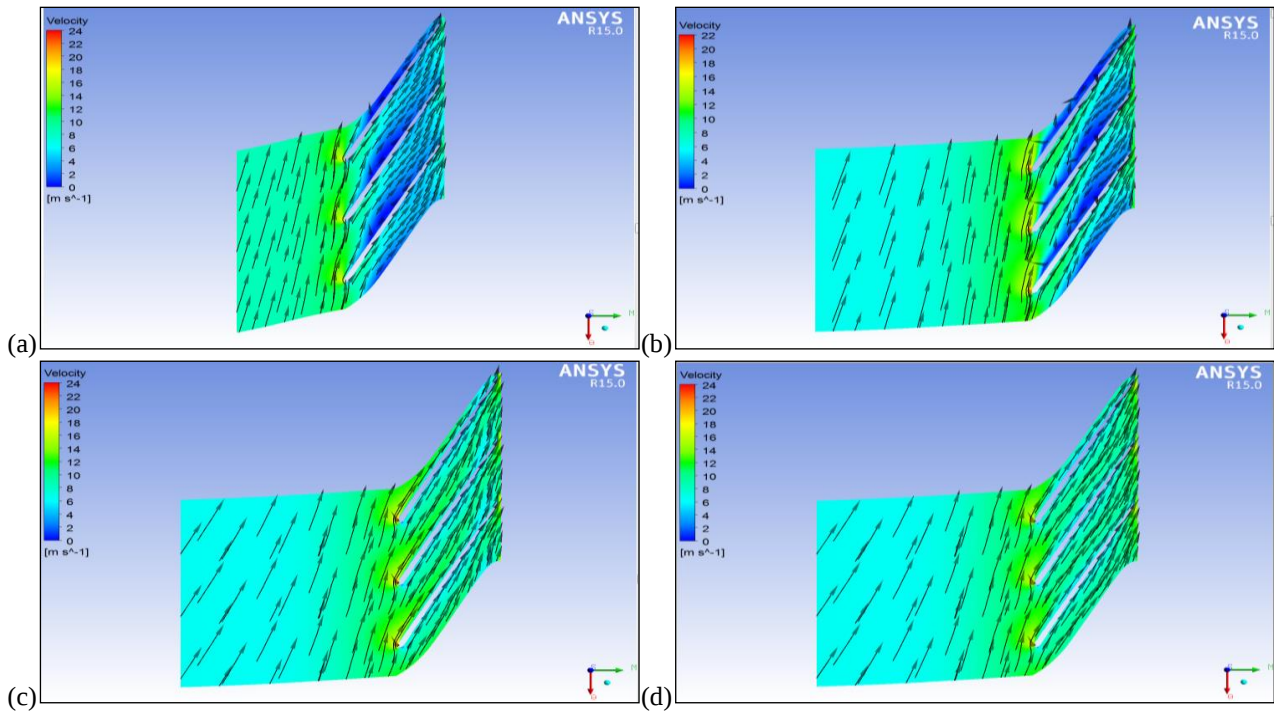
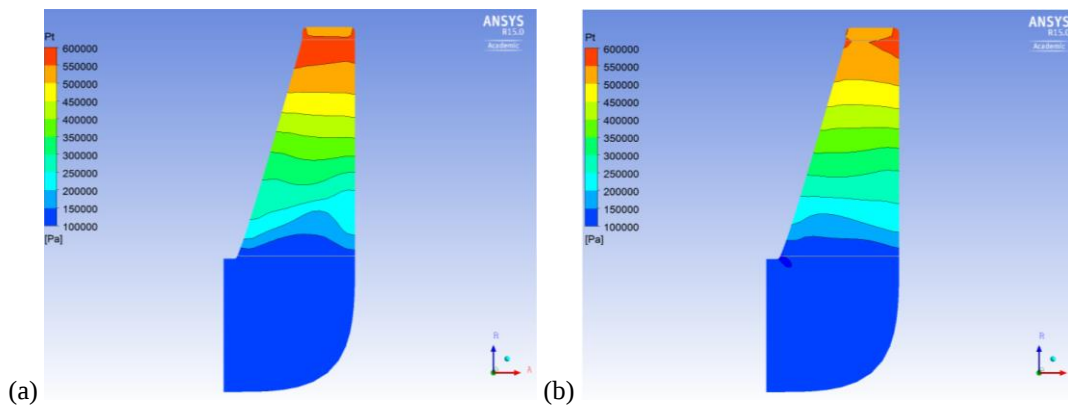


Figura 6. Vetores de velocidades para uma seção a 50% da envergadura da pá do rotor para: (a) água $Q=0,045 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) petróleo pesado $Q=0,045 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) água $Q=0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ e (d) petróleo pesado $Q=0,085 \text{ m}^3/\text{s}$.

As curvas de potência dependem basicamente de três variáveis, a altura útil de elevação, o rendimento e a massa específica do fluido. Os fluidos mais viscosos têm maiores potências dissipada devido à dificuldades de escoamento, contudo observando as curvas (Fig. 4c) se observa que o parâmetro que mais influenciou diretamente a potência foi a massa específica, em que os níveis de maiores potência são observados para água seguida pelo petróleo pesado e pelo petróleo leve, especificamente nessa ordem. Com o aumento da viscosidade a altura de elevação é menor reduzindo os níveis de potência dissipada, ao passo que o rendimento é menor elevando os níveis de potência, o que nos leva a crer que aparentemente que a influência desses parâmetros são equivalentes e contrárias, cujo fator que predomina na disparidade entre as curvas é a massa específica.



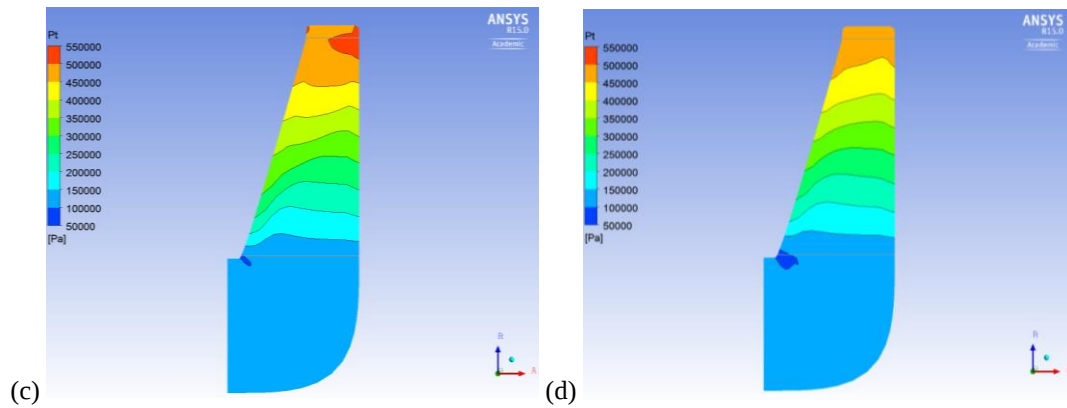


Figura 7. Distribuição meridiana dos valores médios da pressão total para: (a) água $Q=0,045 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) petróleo pesado $Q=0,045 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) água $Q=0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ e (d) petróleo pesado $Q=0,085 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Fig. 7 mostra as distribuições meridianas dos valores médios (*mass averaged*) da pressão total para a água e o petróleo pesado nas vazões de $0,045 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$. É possível verificar aumentos de pressão gradativos ao longo do escoamento do fluido em ambos os fluidos e a pequena variação de pressão segundo a envergadura em especial nas regiões da pá mais próximas da seção de saída do rotor. Nas simulações com água observam-se maiores gradientes de pressão total quando comparados às simulações com petróleo, isto se deve a diferença de propriedades viscosas dos fluidos de trabalho. Além disso, em vazões mais baixas se percebeu maiores gradientes de pressão total tanto para a água quanto para o petróleo, efeito associado aos maiores valores de altura de elevação.

Uma forma de validação dos resultados obtidos para as simulações é através da teoria unidimensional de escoamento que considera os triângulos de velocidade à entrada e saída do rotor já comentada neste artigo. Segundo a teoria a altura de elevação H_e é independente do fluido de trabalho utilizado, dessa forma, através do cálculo dos triângulos de velocidade mediante as características geométricas do modelo para as vazões de trabalho utilizadas resulta uma curva teórica da altura de elevação H_e em função da vazão volumétrica. Fazendo a razão entre a altura útil de elevação H e o rendimento η para os fluidos de trabalho referente aos pontos de vazão volumétrica em análise é possível comparar as curvas obtidas. A Fig. 8 demonstra tais curvas, onde é possível observar que as curvas para todos os fluidos estudados estão em comum acordo com a curva teórica obtida com um desvio máximo de 4,5 m.

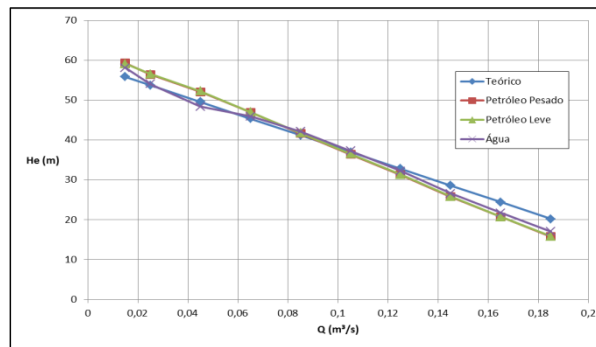


Figura 8. Comparação entre as curvas de altura de total elevação H_e

Os fatores f_H e f_η representativos do efeito da variação do número de Reynolds sobre o rendimento e a altura de elevação foram obtidos, para vários valores de velocidade específica, tomando como base para os cálculos os resultados obtidos para as simulações com água. No gráfico da Fig. 1 obtido de Falcão (2004) se verifica que em escoamentos com números de Reynolds superiores a 10^7 , a altura de elevação e o rendimento a influência do número de Reynolds é inexistente. Para o escoamento com água o número de Reynolds é igual a $2,025 \times 10^7$, enquanto para o petróleo leve o $Re=3,055 \times 10^5$ e para o petróleo pesado $Re=2,577 \times 10^5$. Os valores dos gráficos na Fig. 9 foram obtidos por meio de um processo iterativo, calculando uma velocidade específica para cada ponto tomando como referencia vazões e alturas de elevação das simulações com água, garantindo deste modo que os pontos de funcionamento em comparação têm a mesma velocidade específica N_s . Para estimar as respectivas vazões e alturas de elevação para uma mesma velocidade específica para os demais fluidos, foram gerados polinômios de grau 2 e 4 para a altura de elevação e rendimento, respectivamente, em função da vazão volumétrica conforme a Tab. 4. Através do processo iterativo foram atribuídos valores de vazão de forma que a velocidade específica de calculada fosse próxima a de referência com resíduo mínimo de 0,00001. Os coeficientes f_H e f_η são obtidos a partir dos cocientes entre a altura de elevação e o rendimento, obtidos no processo iterativo referido com os valores referentes às simulações com água com a mesma velocidade específica.

$$(f_H)_x = \frac{H_x}{H_{\text{água}}}; (f_\eta)_x = \frac{\eta_x}{\eta_{\text{água}}}. \quad (6)$$

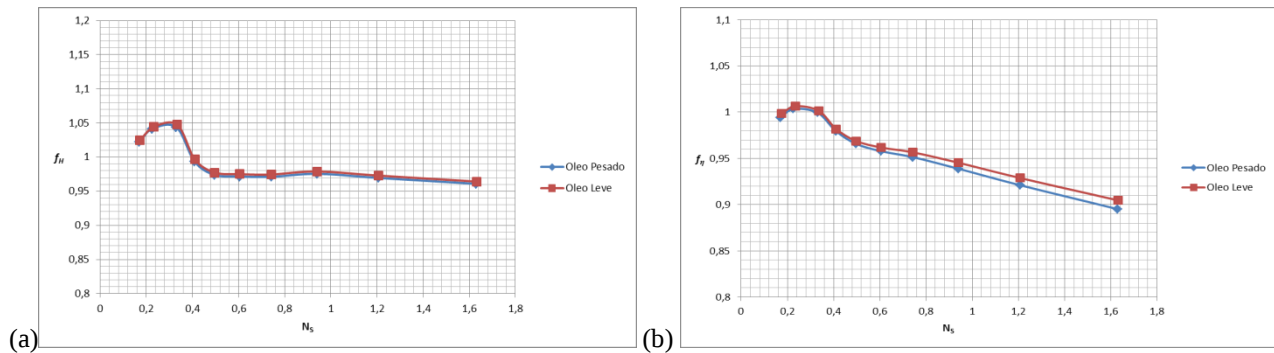


Figura 9. Variação dos coeficientes de influência do número de Reynolds em função da velocidade específica N_s da bomba: (a) f_h e (b) f_η

Tabela 4. Polinômios para altura de elevação e rendimento

Fluido	Grandeza	Polinômio
Petróleo Leve	η (%)	$-14943Q^4 + 48814Q^3 - 6608Q^2 + 405,48Q + 84,171$
	H (m)	$-486,61Q^2 - 155,57Q + 55,641$
Petróleo Pesado	η (%)	$-155793Q^4 + 51291Q^3 - 7005Q^2 + 429,07Q + 83,53$
	H (m)	$-486,35Q^2 - 156,75Q + 55,498$

Foram escolhidos 5 pontos intermediários de velocidade específica próximos à vazão nominal e calculados os fatores f_H e f_η . Tais pontos remetem maior confiabilidade tendo em vista os problemas relacionados à malha já descritos neste artigo, observáveis nos pontos de menores velocidades específicas que estão associados às baixas vazões e a partir destes calculada uma média aritmética dos valores em questão. Em paralelo, através do cálculo do número de Reynolds foram aferidos ao gráfico da Fig. 4 os valores de f_H e f_η . Os resultados dos cálculos realizados estão descritos na Tab. 5, onde o termo (Calc.) se refere aos valores calculados pelo ANSYS e (teór.) aos valores teóricos obtido através do gráfico. Diante do exposto, dentro de um percentual para margens de erro de 10 % os resultados foram coerentes e condizentes com a literatura (Falcão, 2004).

Tabela 5. Fatores representativos do efeito da variação do número de Reynolds

Fluido	Nº de Reynolds	f_h (calc.)	f_h (teór.)	Desvio (%)	F_η (calc.)	F_η (teór.)	Desvio (%)
Petróleo Leve	305465	0,9805	0,99	0,95	0,9628	0,90	6,98
Petróleo Pesado	257739	0,9771	0,985	0,80	0,9586	0,91	5,34

5. CONCLUSÕES

Em detrimento dos procedimentos realizados foi possível construir e analisar as curvas características de desempenho para o rotor da bomba, bem como as curvas de correlação entre os coeficientes adimensionais, parâmetros de correlação das propriedades viscosas e distribuição de velocidades e pressão no domínio em função da variação do número de Reynolds. Para obtenção de melhores resultados sugere-se para trabalhos futuros a correção dos problemas encontrados correlacionados à qualidade e refinamento da malha e ao problema de condição de contorno quanto à proximidade da seção de entrada de fluido ao bordo de entrada do rotor bem como à análise incluindo um difusor no sistema de forma a se obter resultados mais condizentes com a realidade. Além disso, sugere-se a realização de simulações com uma variedade maior de fluidos de trabalho de forma a se obter as curvas dos fatores representativos da influência do número de Reynolds para a altura útil de elevação e rendimento de forma numérica e posterior comparação com as curvas obtidas por Falcão (2004).

6. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Recursos Humanos da PRH – ANP/MCT n.º 56 pelo apoio, contribuição e fornecimento de subsídios importantes à realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Anagnostopoulos, J., 2009, "A Fast Numerical Method for Flow Analysis and Blade Design in Centrifugal Pump Impellers", *Computers&Fluids*, Vol. 38, pp. 284-289.
- ANSYS, Inc, 2013, ANSYS CFX Reference Guide, Release 15.0, Southpointe, 402 p.
- ANSYS, Inc, 2013, ANSYS TurboSystem, User's Guide Release 15.0, Southpointe, 338 p.
- Falcão, A.F.O., 2004, "Mecânica dos Fluidos II: Turbomáquinas", Instituto Superior Técnico, Lisboa, 130p.
- Fox, R.W., Pritchard, P.J., e McDonald, A.T., 2012, "Introdução à Mecânica dos Fluidos", LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 871p.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol 3, No. 2, pp. 269-289.
- Li, W., 2000, "Effects of Viscosity of fluids on Centrifugal Pump Performance and Flow Pattern in the Impeller", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol 2, p. 207-212.
- Macintyre, A.J., 1997, "Bombas e instalações de bombeamento", LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Maliska, C.R., 2004, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Segala, W., 2010, "Simulação Numérica do Escoamento Monofásico no Primeiro Estágio de uma Bomba Centrífuga de Duplo Estágio", Tese de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Sirino, T., 2013, "Estudo numérico da influência da viscosidade no desempenho de uma bomba centrífuga submersa", Tese de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Souza, F.A.M., 2014, "Projeto de uma Bomba Centrífuga", Projeto de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Brasil.
- Thomas, J.E., 2001, "Fundamentos de engenharia de petróleo", PETROBRAS, Rio de Janeiro, Brasil.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE REYNOLDS NUMBER IN THE OPERATING CHARACTERISTIC CURVES OF AN IMPELLER OF A CENTRIFUGAL PUMP.

Ítalo Sabino Bezerra, italosb94@hotmail.com¹
 Luís Morão Cabral Ferro, lferro@ufersa.edu.br¹

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido- UFERSA, Av. Francisco Mota, 572 - Bairro Costa e Silva, Mossoró RN, CEP: 59.625-900

Abstract: *Pumps are devices that transform mechanical energy from the rotation of an impeller into kinetic energy and pressure and are used for the displacement of fluids. The pump performance is represented graphically by the characteristics curves obtained experimentally or numerically. These curves represent the variation of some characteristic quantities as total dynamic head, efficiency and brake horsepower as a function of flow rate. They are generally obtained for a constant rotational speed and for a specific fluid, generally water at a specified temperature. Experimental curves can be obtained using a laboratory setup, but requires the manufacture of a pump model and use of measuring devices. Computational Fluid Dynamics (CFD) may thus be used as a tool to compute the viscous flow in a pump enabling an easy and fast way to analyze the influence of a large number of parameters in the operation conditions of a pump, and compute the pump characteristics curves as a function of flow rate. In the petroleum extraction and distributions centrifugal pumps are also used. The CFD can be applied to determine the operating conditions with different types of petroleum. The purpose of this paper is to compute, using the CFD, the flow in a centrifugal pump for two different petroleum and compare with water to verify and quantify the influence of Reynolds number in the pump performance and to determine correlations curves for efficiency and height coefficient. It will be also shown the behavior of the flow streamlines within the pump impeller for the different types of petroleum. The flow is computed using the ANSYS CFX code. The flow is assumed permanent and the reference pressure is specified as one atmosphere. The solid surfaces are assumed smooth and turbulence model chosen is the k-ε. At the inlet section the total pressure is specified equal to one atmosphere and on the output section the mass flow is specified. At solid walls is prescribed the no-slipping condition, with the velocity of the flow equal to the wall speed. The pump performance characteristics curves are plotted and compared for the three fluids, as well as correlation of the head coefficient and efficiency as a function of Reynolds number. The streamlines, velocity distributions and pressure distributions on the blade surface of the impeller for the three fluids.*

Keywords: centrifugal pump, CFD, characteristic curves, Reynolds number.