

ARTIGO EFEITO DO ÂNGULO DE SAÍDA DA PÁ DE UM ROTOR DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA APLICADA EM UM SISTEMA DE BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO POR ANÁLISE DE CFD

Caio Cesar Ferreira de Freitas ^[1], Victor Wagner Freire de Azevedo ^[2]

¹ Graduando do curso Bacharelado em Engenharia Mecânica, UFERSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E- mail: caiocesarfreitas10@hotmail.com

² Professor Doutor, RN – UFERSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E-mail: victorwfreire@ufersa.edu.br

Data da defesa: 19/11/2021;

Resumo: Os métodos de elevação artificial para exploração e produção de petróleo evoluíram ao longo das últimas décadas visando aperfeiçoar o desempenho dos poços. O sistema de Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), cuja finalidade é a elevação do fluido até a superfície, tornou-se uma alternativa viável devido à capacidade de ser aplicada em ambientes marítimos e terrestres. No presente trabalho, um rotor utilizado no referido sistema foi estudado através de um modelo computacional desenvolvido no pacote comercial ANSYS® CFX®. Foi utilizado como parâmetro no rotor, 1 atm na entrada e vazão de descarga variando 0,09 a 0,18 m³/s, além de um óleo como fluido de trabalho com viscosidade de 0.04 kg/m.s e densidade 904.15 kg/m³, com a finalidade de analisar a influência do ângulo de descarga da pá nas características da bomba. Os resultados mostram que o ângulo de saída da pá afeta significativamente as características de altura de elevação, potência e eficiência.

Palavras-chave: Bomba Centrífuga Submersa. Ângulo de Saída da Lâmina. Fluidodinâmica Computacional.

1. INTRODUÇÃO

Embora as pesquisas constantes ao longo da última década tornam-se viáveis a produção de fontes de energia renováveis, como alternativa a suceder o petróleo, atualmente, ainda a sociedade demanda dessa matéria-prima, cuja exploração é essencial para o contínuo crescimento das grandes economias mundiais, pois esse insumo ainda está presente em diversas áreas da indústria (Maitelli, 2010).

A extração e produção constante de petróleo em águas profundas (offshore) e em poços terrestres exige a necessidade de tecnologias e procedimentos que tornem economicamente viável os custos de operação, considerando que as perdas de pressão ao longo da tubulação, diminuição da temperatura e consequentemente o aumento de viscosidade dificultam o escoamento do fluido até a superfície (Maitelli, 2010).

Diante desse contexto, a exploração do petróleo pela indústria petrolífera nos poços, é utilizado como recurso para aplicação em elevação artificial de petróleo com a utilização do bombeio centrífugo submerso (BCS). Esse método é usualmente utilizado em poços com baixos níveis de pressão e vazão abaixo do que se poderia produzir e, tem se mostrado mais vantajoso em relação a outros métodos, como Bombas de Cavidade Progressiva e Gás Lift, por exemplo (Liu et al., 2020).

As bombas centrífugas são um dos principais tipos de bomba com relação a classe de bombas

chamadas “cinéticas”, pois são utilizadas em larga escala para diferentes aplicações em vários setores industriais, agricultura, estações de transporte de água, e no caso deste artigo, para área petrolífera. Usualmente, as bombas centrífugas são compostas por um rotor que são acionadas através de um eixo no interior de uma voluta, que irá rotacionar e fornecer energia ao fluido (Kumar et al., 2017).

Dessa forma, o desempenho da bomba centrífuga irá influenciar diretamente na performance de um poço que utiliza BCS como mecanismo de elevação, com base na influência de parâmetros de diferentes geometrias do rotor. Muitos estudos com CFD foram desenvolvidos com o objetivo de analisar a influência do ângulo de saída da pá do rotor nas características do fluxo de bombas centrífugas. Com base no que Peng et al. (2020), estudaram os efeitos de vários ângulos no bordo de fuga da lâmina e concluiu que com a alteração da geometria da pá, as curvas características das bombas centrífugas sofrem alteração, tornando-as com melhores desempenhos e eficiência, necessárias para escoar fluidos com elevadas viscosidades. Bacharoudis et al. (2008), investigaram o comportamento dos efeitos de vários ângulos de saída do rotor para mostrar que conforme o ângulo de saída aumentou, as curvas características tornaram-se mais suave. Kumar et al. (2017), demonstraram em seu estudo que a variação do ângulo na saída do rotor aumenta o desempenho da bomba centrífuga.

Avaliar, com base na literatura pesquisada, os efeitos do ângulo de saída da pá na eficiência, potência e altura de elevação, considerando uma aplicação em bomba centrífuga.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Equações Governantes

Para análise do comportamento do fluido durante o escoamento no volume de controle, entre a sucção e a descarga do rotor, será fundamental aplicar os princípios das equações da conservação da massa e quantidade de movimento, no qual seus equacionamentos representam o comportamento do escoamento (Maitelli, 2010).

O escoamento é governado pela equação de conservação da massa (Fox et al., 2010)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

e pela conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

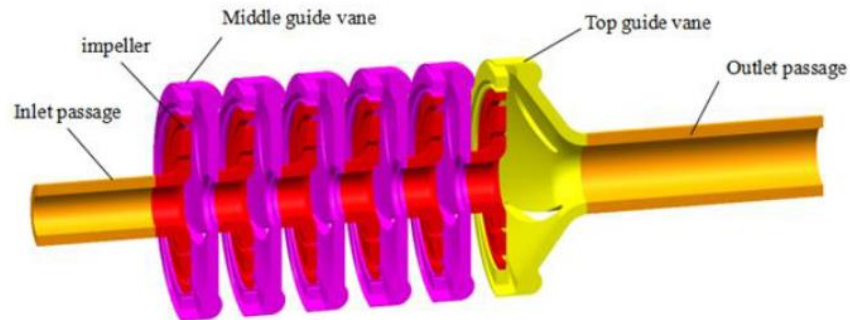
representadas pelas Eqs. 1 e 2. Nas referidas equações, ρ representa a massa específica, u a velocidade, v a viscosidade cinemática e os sub índices i e j as componentes horizontal e vertical do escoamento.

2.2 A bomba centrífuga

O objeto de estudo do presente trabalho, a bomba centrífuga submersa de múltiplos estágios. Este dispositivo transmite energia ao fluido através do rotor, que é acoplado a um motor elétrico. À medida que o rotor executa o seu movimento rotacional, o fluido é forçado a percorrer as pás, aumentando sua energia cinética até chegar na voluta, onde parte dessa energia é convertida em energia de pressão. Cada estágio fornece ao fluido um incremento de pressão com o objetivo de elevar o fluido até a superfície, conforme tal necessidade (Thomas et al.,

2001). A Fig. 1 representa um modelo de bomba centrífuga multiestágios.

Figura 1: Representação de um modelo de bomba multiestágios.



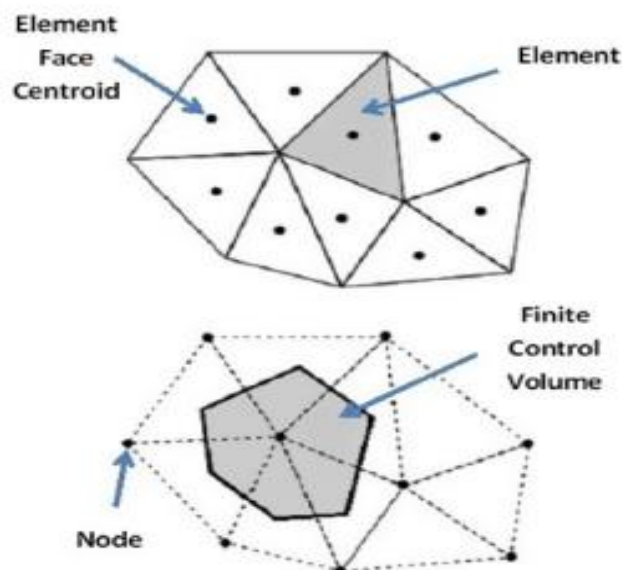
Fonte: Peng et al., 2020

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho o pacote comercial Ansys® CFX® foi utilizado, que discretiza as equações governantes do escoamento de acordo com o método dos volumes finitos (MVF), onde o domínio computacional é subdividido em pequenos volumes elementares e aplicado um balanço das equações governantes nesses volumes, conforme ilustra a Fig. 2. O sistema de equações formado por esses balanços em cada volume é resolvido de maneira iterativa através de métodos numéricos já implementados no software.

A bomba centrífuga utilizada no presente estudo foi inspirada na utilizada por Bellary et al. (2015), cujas características estão representadas na Tabela 1 e representada através da Figura 3. O módulo Ansys® BladeGen® foi utilizado para confecção da geometria, conforme ilustra a Fig. 4, sendo que diferentes ângulos de descarga da pá foram utilizados.

Figura 2: Representação esquemática do domínio discretizado.



Fonte: Yousefi et al., 2019.

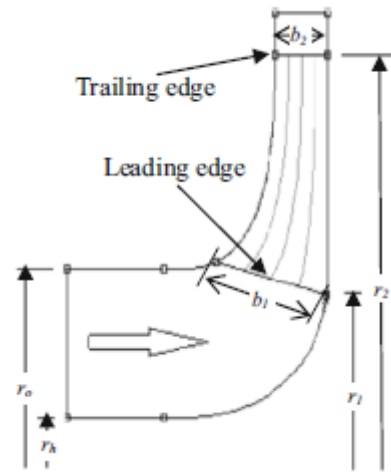
Tabela 1: Dimensões características do rotor e lâmina.

CARACTERÍSTICA	DIMENSÃO
Diâmetro do eixo (D_h)	55 mm
Diâmetro do olho (D_o)	182 mm

Diâmetro saída da pá (D2)	365 mm
Comprimento da pá na entrada (b1)	54 mm
Comprimento da pá na saída (b2)	30 mm
Ângulo da pá na entrada (β_1)	23°
Ângulos da pá na saída (β_2)	18°, 22°, 26°, 30° e 34°
Número de pás	7
Espessura da pá	5 mm

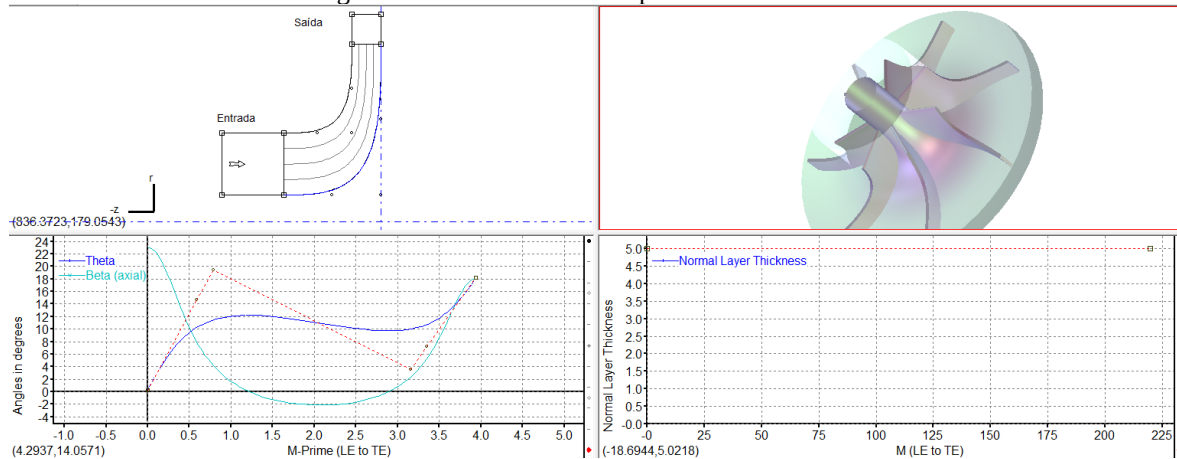
Fonte: Adaptado de Bellary et al., 2015.

Figura 3: Representação das características das pás.



Fonte: Bellary et al., 2015.

Figura 4: Tela do BladeGen® perfil meridional do rotor



Fonte: Autoria própria, 2021.

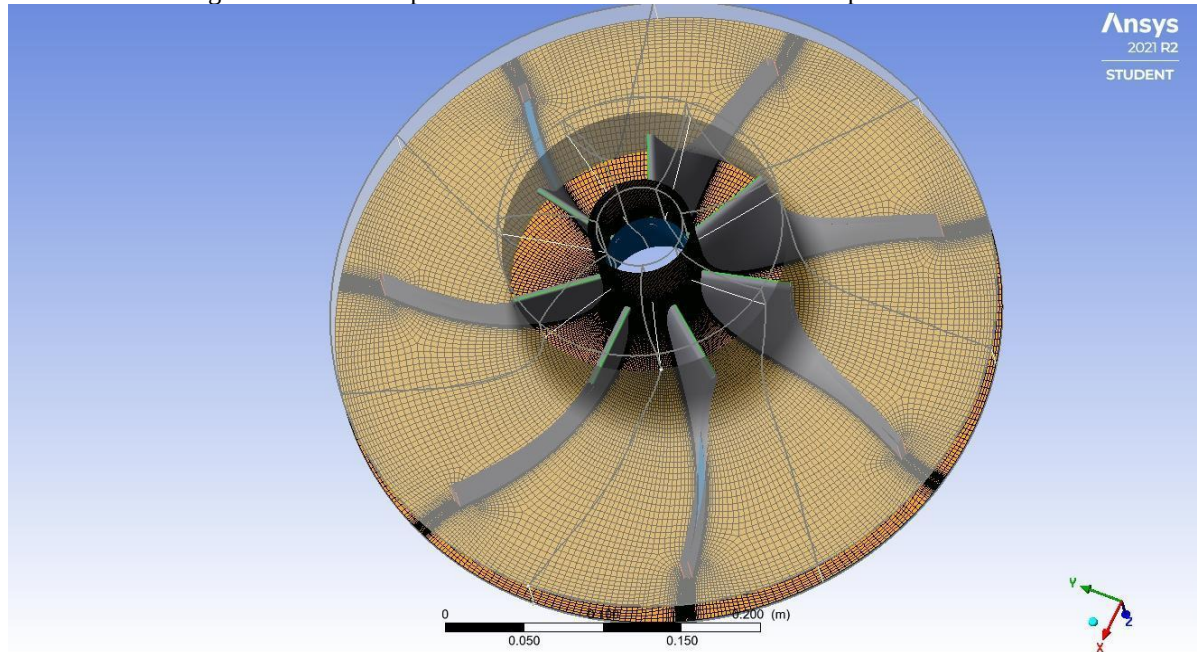
A malha computacional foi desenvolvida no módulo TurboGrid®, em conformidade com o procedimento padrão do próprio software para a formação da malha, no qual está implementado um método para o refino de malha, em que o fator de refinamento é função de uma variável que leva em conta o tamanho dos volumes da malha. Diferentes malhas foram geradas utilizando o fator de refino já implementado no TurboGrid®, onde que, dependendo do ângulo de inclinação da pá, a quantidade de elementos e de nós será obtida, de acordo com a Tabela 2. Foram geradas malhas computacionais para diferentes ângulos de inclinação da pá, conforme mostra a Tab. 2, que, mesmo utilizando o mesmo fator de refino, gerou malhas com uma quantidade de volumes aproximadamente iguais, as mudanças ocorrem devido a mudanças da geometria do rotor, devido aos diferentes ângulos de inclinação da pá. A Fig. 5 ilustra uma dessas malhas computacionais geradas no TurboGrid® para o rotor que está sendo estudado.

Tabela 2: Malhas computacionais geradas para diferentes ângulos de inclinação das pás do rotor na saída.

	Fator de tamanho 1.5				
	18°	22°	26°	30°	34°
Elementos	200536	201992	201997	202804	276024
Nós	218312	219936	219938	220806	297408

Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 5: Malha computacional utilizada em um dos casos do presente estudo.



Fonte: Autoria própria, 2021.

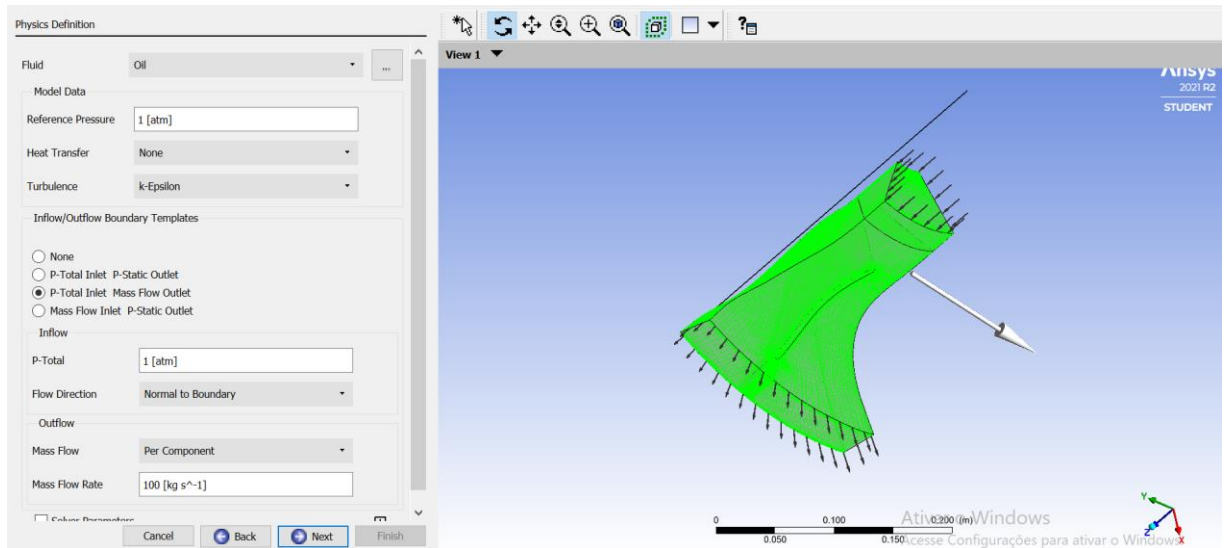
O presente estudo utilizou óleo como fluido de trabalho com viscosidade de 0.04 kg/m.s e densidade igual a 904.15 kg/m^3 (Maitelli, 2010). O modelo de turbulência $\kappa - \epsilon$ foi utilizado devido a sua enorme aplicação e por ser confiável e validado em aplicações que envolve modelo de domínio fechado e considerando a ligação entre as estruturas da bomba. A velocidade de rotação foi adotada como 3500 rpm , no sentido contrário à inclinação da pá. Para a saída foram consideradas diferentes vazões mássicas, variando entre 80 e 160 kg/s , e na entrada a pressão foi fixada em 1 atm , conforme mostra a Tab. 4. Na Fig. 6 pode ser visto o domínio de cálculo que o CFX® resolve. O software resolve apenas o escoamento ilustrado na seção ilustrada da bomba (entrada e saída de fluido), aplicando condições periódicas para replicar o comportamento da seção de cálculo para as demais seções do rotor.

Tabela 4: Propriedades das condições de contorno.

Condição de pressão na entrada	1 atm
Condição fluxo de massa na saída	80-160 kg/s com incremento de 20 kg/s
Condição vazão volumétrica na saída	0.09-0.18 m ³ /s com incremento de 0.02 m ³ /s
Velocidade de rotação do rotor	3500 rpm

Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 6: Tela CFX-Pre das condições do domínio de escoamento na entrada e saída.



Fonte: Autoria Própria, 2021.

3. RESULTADOS

Inicialmente, o modelo numérico desenvolvido precisou ser validado, para isso, resultados presentes em Kumar et al. (2017) foram utilizados, que utilizou uma bomba similar. O ângulo de inclinação da pá de 50° foi considerado e, como o referido trabalho utilizou água como fluido de trabalho, a validação precisou ser realizada com o mesmo fluido ($\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 0,001002 \text{ Pa.s}$). A velocidade de rotação considerada foi de 1470 rpm e a malha computacional utilizada, seguindo o mesmo fator de refino de 1,5, está representada na Tab. 5.

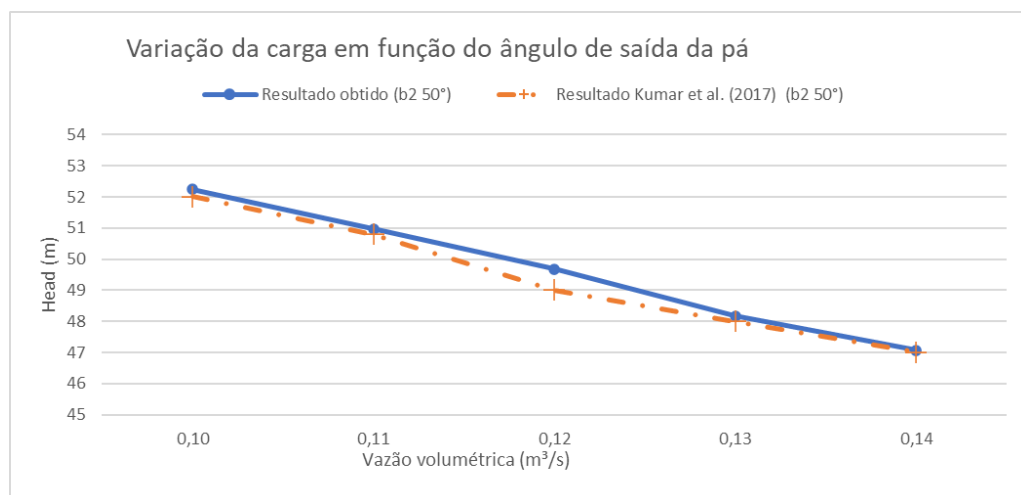
A Fig. 7 mostra a curva característica para essa inclinação comparados com os resultados obtidos por Kumar et al. (2017). Pode ser observado que o presente modelo foi capaz de prever o comportamento da bomba com bastante precisão, com a resolução utilizada na malha computacional.

Tabela 5: Características de malha utilizando água

	Fator de refino 1.5	
	Elementos	Nós
$\beta 2 (50^\circ)$	275931	296352

Fonte: Autoria própria, 2021.

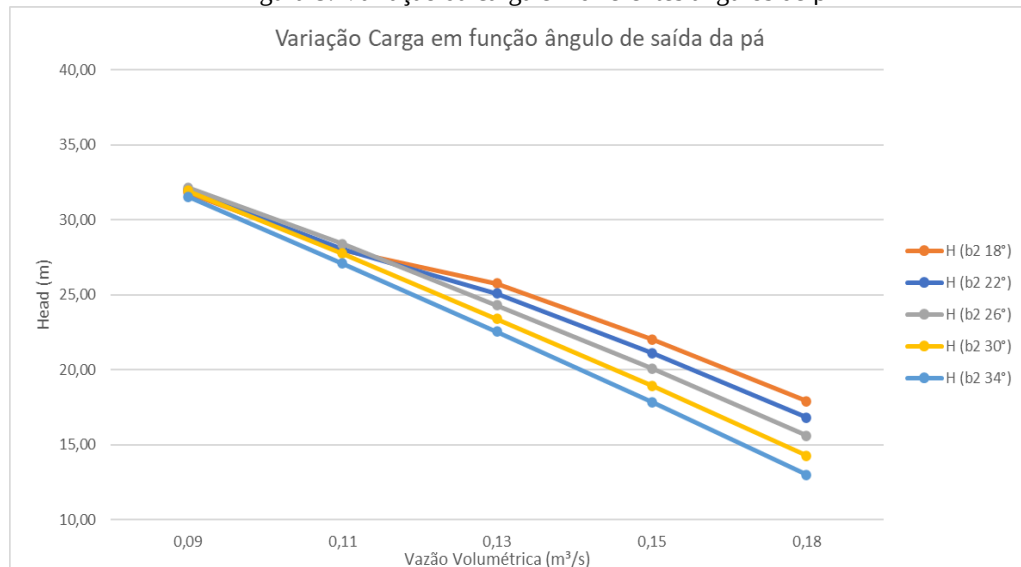
Figura 7: Curvas características da altura de carga em relação à vazão. Curvas para validação refino da malha



Fonte: Autoria própria 2021.

Dessa forma, os casos descritos na Tab. 2 foram simulados, conforme mostram as Figs. 8-10 para a altura de carga, potência e eficiência.

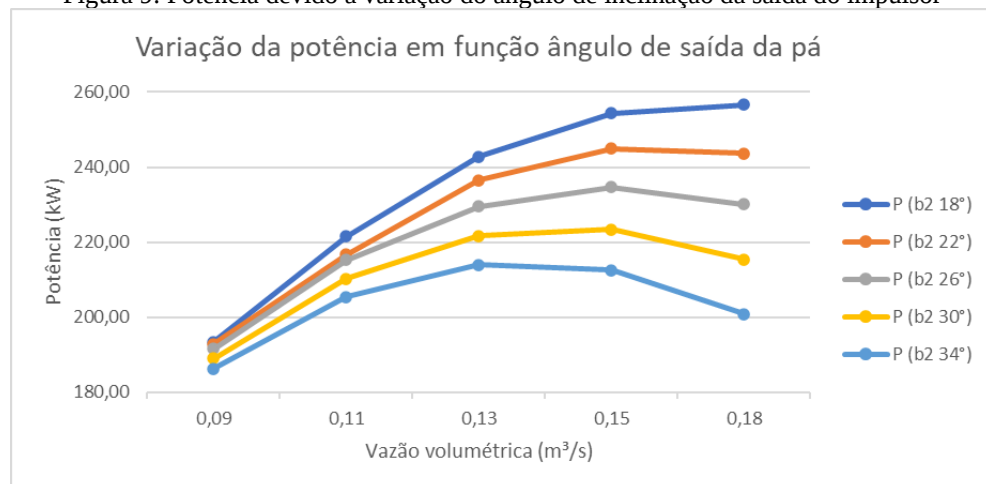
Figura 8: Variação da carga em diferentes ângulos de β_2



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Com os resultados para a carga, mostrados na Fig. 8, pode ser observado que para maiores ângulos de inclinação a carga diminui à medida que a vazão cresce, sendo mais acentuada, para um valor valor de ângulo de inclinação 34°, e de maneira menos acentuada para um menor ângulo de inclinação 18°.

Figura 9: Potência devido a variação do ângulo de inclinação da saída do impulsor

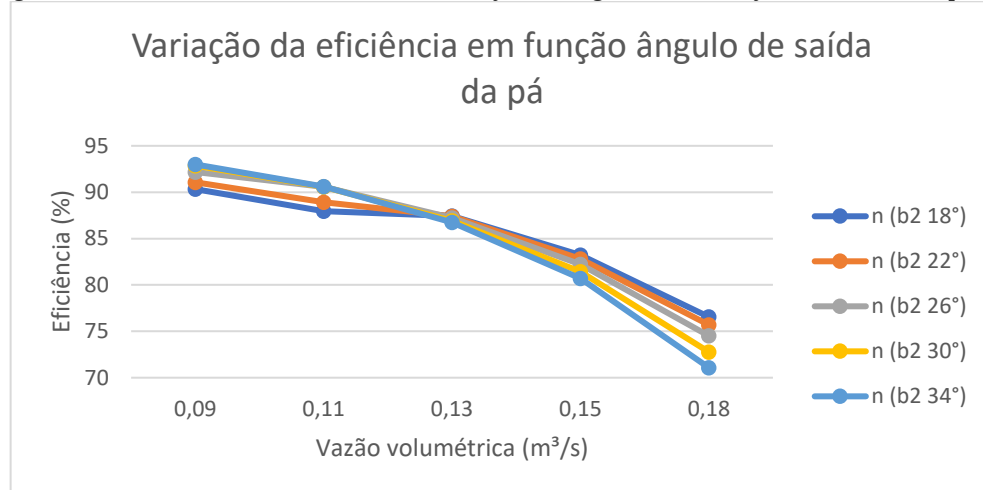


Fonte: Autoria Própria, 2021.

Na Fig. 9 podem ser observados os resultados para a potência de acionamento da bomba. Pode ser visto que com o aumento da vazão a potência aumenta à medida que o ângulo de inclinação de saída da pá (β_2) aumenta até a vazão de 0,13 m³/s, quando a vazão aumenta para 0,15 m³/s há uma diminuição da potência apenas para o maior valor de ângulo de inclinação 34° (214 kW para 212,5 kW), com aumento de potência para todos os outros ângulos, a partir da vazão 0,15 m³/s, há um pequeno aumento da potência, somente para o ângulo de inclinação de 18° (254 kW para 256,7 kW), e diminuindo para os outros valores de ângulos de inclinação, sendo esta redução mais acentuada para o maior valor de ângulo 34° (200 kW). Mas, conforme

estudo realizado por Liu et al. (2020), em que os efeitos da viscosidade em bombas centrífugas são analisados, os autores chegaram à conclusão que a faixa de ângulo de inclinação na saída ente 27° e 32° são as melhores para fluidos com viscosidade mais alta, o que torna bastante coerente o resultado obtido para a inclinação da pá de 34°, fornecendo a menor potência de acionamento para a bomba.

Figura 10: Gráfico de eficiência devido a variação do ângulo de inclinação da saída do impulsor



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A eficiência da bomba, conforme ilustra a Fig. 10, não demonstrou uma dependência elevada do ângulo de inclinação da pá. Os resultados ficaram aproximadamente semelhantes na faixa de vazão intermediária de 0,13 m³/s, e de 76,5 % para 71% a diferença entre o menor e maior ângulo de inclinação, respectivamente, na faixa mais elevada de vazão 0,18 m³/s, o que contraria com os resultados obtidos por Yousefi et al. (2019), onde para fluidos de altas viscosidades a eficiência seria maior para maiores ângulos.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho desenvolveu um modelo de um rotor aplicado a bombas centrífugas capaz de prever o comportamento de desempenho, carga e potência da bomba a partir da variação do ângulo de inclinação na saída da pá, permanecendo com as outras dimensões do rotor constante e considerando um fluido com elevada viscosidade.

Com os resultados obtidos diante das simulações numéricas computacionais, pode-se observar que as curvas características de carga e potência sofreram considerável influência em consequência dos efeitos da variação do ângulo de inclinação de saída da pá, sendo a eficiência pouco influenciada por essa variável. A altura de elevação fornecida pelo rotor praticamente não se altera para baixas vazões, porém quando se aumenta a vazão, esse parâmetro será maior onde se tem um ângulo de descarga da pá menor. A potência de acionamento sofre pouca influência para a menos vazão, mas ela cresce entre as vazões 0,09 m³/s até 0,13 m³/s para todos os ângulos, porém entre 0,15-0,18 m³/s, a potência de acionamento diminuir para todos os ângulos, exceto para 18°. Os valores de eficiência são relativamente próximos para todos os ângulos quando se tem vazões baixas, entretanto quando se aumenta consideravelmente a vazão, temos maior eficiência para ângulos de saída menores, o que contraria resultados obtidos com fluidos de maiores viscosidades.

De forma geral, o trabalho demonstra-se viável, pois apresenta baixo custo de elaboração, além de que as ferramentas metodológicas são confiáveis, permitindo análise sucinta sobre como a geometria de um rotor altera as características de bombas.

5. AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento em especial ao professor Dr. Victor Wagner, por ter se disponibilizado a ser meu orientador e ter exercido uma função importante, e com serenidade contribuiu para me repassar mais experiências e aprendizado.

Aos professores membros da banca examinadora, Dra. Fernanda Alves e Me. Felipe Bento, pelas considerações ao trabalho, contribuindo para melhorar o projeto com sugestões claras e objetivas.

6. REFERÊNCIAS

BACHAROUDIS, E., FILIOS, A., MENTZOS, M., MARGARIS, D. Parametric Study of a Centrifugal Pump Impeller by Varying the Outlet Blade Angle. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2, p. 75-83. (2008).

BELLARY, Sayed Ahmed Imran; SAMADA, Abdus. Pumping crude oil by centrifugal impeller having different blade angles and surface roughness. *Petrol Explor Prod Technol. Chennai*, p. 117-127. (2015).

THOMAS, J. E.; TRIGGIA, A.; CORREIA, C. A.; FILHO, C. V.; XAVIER, J. A. D.; MACHADO, J. C. V.; FILHO, J. E. de S.; PAULA, J. L. de; ROSSI, N. C. M. de; PITOMBO, N. E. S.; GOUVEIA, P. C. V. de M.; CARVALHO, R. de S.; BARAGAN, R. V. *Fundamentos da engenharia de petróleo*. Segunda edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

FOX, R.W., MCDONALD, A.T. and PRITCHARD, P.J.; *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. LTC, 8ª ed. (2010).

KUMAR, A.; Jain, K.K.; DAVE, R.K.; CHOUDHARY, A. CFD analysis of centrifugal pump impeller having different exit blade width, exit diameter and trailing edge blade angle to enhance performance. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(5), p. 1231-1239 (2017).

LIU, P.; WANG, Y.; YAN, F.; NIE, C.; OUYANG, X.; XU, J.; GONG, J. Effects of fluid viscosity and two-phase flow on performance of ESP. *Energies* 2020, 13, 5486.

MAITELLI, C. W. S. *Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional*. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, dez. 2010.

PENG, G., CHEN, Q., ZHOU, L., PAN, B., and ZHU, Y. Effect of blade outlet angle on the flow field and preventing overload in a centrifugal pump, *Micromachines*, vol. 11, no. 9, p. 811, (2020).

YOUSEFI, Hossein; NOOROLLAHI, Younes; TAHANI, Mojtaba; FAHIMI, Roshanak; SAREMIAN, Salman. Numerical simulation for obtaining optimal impeller's blade parameters of a centrifugal pump for high-viscosity fluid pumping. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Tehran, p. 16-26. (2019).