

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESPECIFICAÇÃO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS EM INSTALAÇÕES DE PEQUENO PORTE

Juliana Garcia Gaia, julianagarciagaia@gmail.com¹

Alexandre L.A. Mesquita, alexmesq@ufpa.br¹

André L. A. Mesquita, andream@ufpa.br¹

¹Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE), Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí, Rua Itaipu, 36 - Vila Permanente, 68464-000, Tucuruí – PA, Brasil

²Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC), Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí, Rua Itaipu, 36 - Vila Permanente, 68464-000, Tucuruí – PA, Brasil

Resumo: Bombas hidráulicas podem ser usadas como turbinas em instalações de pequeno porte em substituição às turbinas convencionais. As vantagens do uso de bombas funcionando como turbinas (BFT) são vários, tais como custo, fácil manutenção, disponibilidade, dentre outros. Como desvantagens, tem-se que como o equipamento não foi projetado para operação em reverso, o rendimento da BFT será menor que o da bomba funcionando como bomba (BFB) nas mesmas condições de altura e vazão. Portanto, o problema de seleção de bombas funcionando como turbinas têm sido motivo de pesquisa e vários métodos foram desenvolvidos para essa especificação. Desta forma, este trabalho apresenta os resultados de especificação de bomba funcionando como turbina usando três diferentes métodos. Os resultados obtidos são comparados e discutidos.

Palavras-chave: Bomba funcionando como turbina, Máquinas hidráulicas, Eficiência.

1. INTRODUÇÃO

Quando se trata de uma máquina hidráulica, pode-se dizer que existem as máquinas motoras e as geradoras. Nesse contexto, uma máquina de fluxo, operando como máquina motriz, tem como objetivo transformar um tipo de energia disponível na natureza em trabalho mecânico, e, quando opera como máquina geratriz, proporciona energia a um fluido, tendo como exemplo o transporte do fluido de um local para outro. Portanto, quando uma máquina de fluxo trabalha como motriz, é designada de turbina e, quando trabalha como geratriz, de bomba. Por outro lado, se uma bomba girar no sentido reverso, funcionará como uma máquina motriz, ou seja, como uma turbina, o que traz vantagens e desvantagens.

Como bombas não são fabricadas particularmente para geração de energia, existem alguns inconvenientes no momento em que estas são usadas como turbinas, pois a eficiência geralmente é mais baixa em comparação com turbinas convencionais [1,2]. Por outro lado, são várias as vantagens do uso de bombas funcionando como turbinas BFT ou PAT (*pump as turbine*), tais como baixo custo, menos complexidade, disponibilidade para uma grande faixa de cargas e vazões, fácil manutenção, dentre outros [3].

A seleção de uma bomba para ser usada no modo turbina para uma determinada aplicação é o principal fator na instalação de uma central reversível. São vários fatores que devem ser levados em conta, como a carga, vazão e velocidade específica. Portanto, vários métodos de seleção de BFT existem na literatura. Este trabalho apresenta a metodologia de três métodos; o método de Viana [4,5], método de Chapallaz et al. [6] e método de Alatorre-Frenk e Troncoso-Torres [7]. As três metodologias são aplicadas um estudo de caso fictício e os seus resultados são comparados.

2. METODOLOGIA

Uma vez que a altura e a vazão de BFT são superiores com relação à BFB, foi de grande importância o desenvolvimento de métodos para selecionar as bombas que vão funcionar como turbinas, com o objetivo de padronizar a seleção desses equipamentos. Em vista disso, torna-se realizável selecionar uma bomba para operar como turbina através dos métodos apresentados, a partir de dados de altura e vazão disponíveis, e na rotação específica.

2.1. Método de Viana

No trabalho produzido por Viana [4,5], os ensaios foram executados em bombas de fabricantes nacionais, tendo como resultados alcançados destes ensaios a obtenção dos coeficientes de maneira empírica, que associam a altura e a vazão da BFT e da BFB de acordo com a rotação específica da bomba, sendo designados coeficientes de altura e de vazão. O gráfico para obtenção desses coeficientes é apresentado na Fig. 1. De posse desses coeficientes, determinam-se a altura e vazão da bomba através das Eqs. (1) e (2), e então seleciona-se a bomba adequada que operará em reverso. A rotação específica da máquina pode ser encontrada por intermédio da Eq. (3).

$$H_b = k_a \cdot H_t \quad (1)$$

$$Q_b = k_q \cdot Q_t \quad (2)$$

$$n_{qA} = \frac{n_t \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{\frac{3}{4}}} \cdot 10^3 \quad (3)$$

Onde:

H_b - altura da bomba que será utilizada como turbina [m];

k_a - coeficiente de altura de Viana [1];

H_t - altura disponível no aproveitamento (da BFT) [m];

Q_b - vazão da bomba que será utilizada como turbina [m³/s];

k_q - coeficiente de vazão de Viana [1];

Q_t - vazão disponível no aproveitamento (BFT) [m³/s].

n_{qA} - rotação específica da bomba ou da BFT no Sistema Internacional [1];

n_t - rotação da BFT [rps];

g - aceleração da gravidade [m/s²];

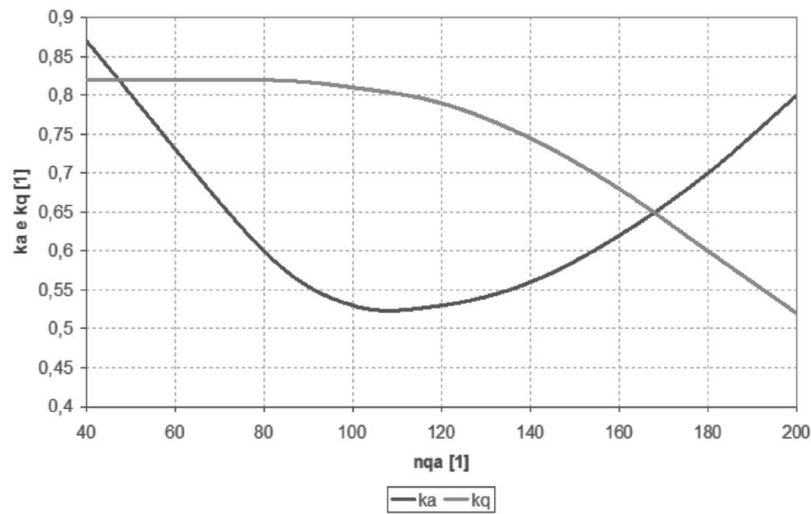


Figura 1. Coeficientes de vazão e altura [4].

Como os catálogos dos fabricantes não contemplam as rotações de 1800 e 3600rpm, que são as velocidades síncronas dos motores de indução, pelo fato de as bombas trabalharem abaixo dessas rotações que ficam em volta de 1750 e 3500rpm. Por isso é preciso a elaboração de um ajuste na altura e na vazão da bomba com a intenção de se considerar a rotação encontrada nos catálogos. Isto pode ser feito, com boas aproximações, utilizando-se as Leis de Semelhança, através das Eqs. (4) e (5).

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b}\right)^2 \cdot H_b \quad (4)$$

$$Q_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b}\right)^2 \cdot Q_b \quad (5)$$

Onde:

H_{ob} - altura referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m];

n_{ob} - velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [rpm];

n_b - velocidade da bomba [1800rpm ou 3600rpm];

H_b - altura referente às velocidades de 1800rpm ou 3600rpm [m];

Q_{ob} - vazão referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m³/s];

Q_b - vazão referente às velocidades de 1800 ou 3600rpm [m³/s].

2.2. Método de Chapallaz

No método desenvolvido por Chapallaz et al. [6] primeiramente seleciona-se a bomba pelo gráfico da Fig. 2. Após a escolha do tipo de bomba inicia-se a seleção mais adequada para a BFT. O método é similar ao de Viana, visto que Chapallaz et al também realizaram ensaios em várias bombas e encontrou coeficientes experimentais de altura e de vazão conforme a rotação específica da bomba. Todavia, os métodos diferem pelo fato de Viana utilizar o rendimento da bomba retirado do registro catalogado do fabricante, já Chapallaz et al. empregam o rendimento da bomba nas curvas utilizadas na determinação dos coeficientes. A altura e a vazão da bomba podem ser determinadas pelas Eqs. (6) e (7).

$$H_b = \frac{H_t}{k_a} \quad (6)$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{k_q} \quad (7)$$

H_b - altura da bomba que será utilizada como turbina [m];

H_t - altura disponível no aproveitamento (da BFT) [m];

k_h - coeficiente de altura de Chapallaz [1];

Q_b - vazão da bomba que será utilizada como turbina [m];

Q_t - vazão disponível no aproveitamento (da BFT) [m³/s];

k_Q - coeficiente de vazão de Chapallaz [1].

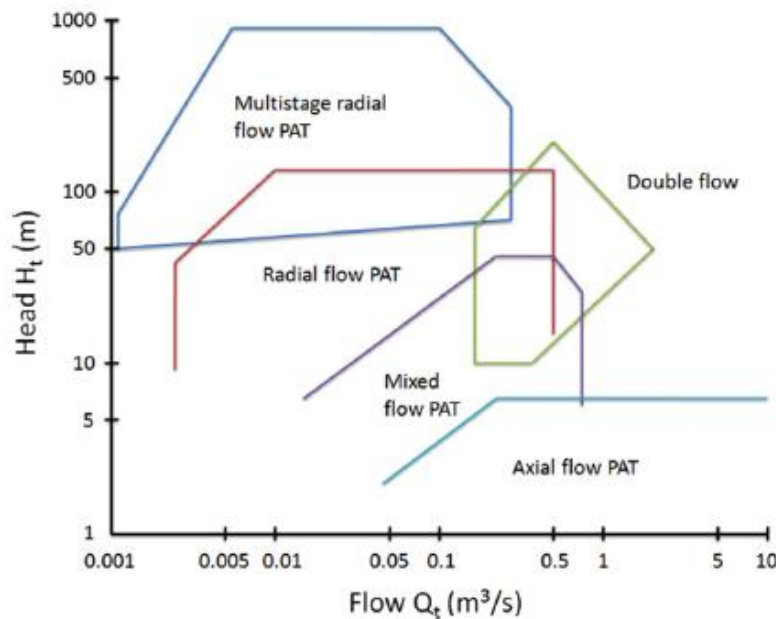


Figura 2. Pré-seleção da BFT [6].

Após o tipo de bomba ser escolhido, calcula-se a rotação específica da BFT através da Eq. (8).

$$n_{qt} = \frac{n_t \sqrt{Q_t}}{(H_t)^{\frac{3}{4}}} \quad (8)$$

Onde:

n_{qt} - rotação específica da BFT no Sistema Técnico;

n_t - rotação da BFT [rps];

Q_t - vazão da BFT [m³/s];

H_t - altura da BFT [m].

Pode-se notar que este método possui outra diferença com relação ao Método de Viana, baseando-se no cálculo da rotação específica da bomba, utilizando a rotação específica da BFT. A Equação (9), obtida experimentalmente, possibilita essa operação.

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (9)$$

Onde:

n_{qb} - rotação específica da bomba;

n_{qt} - rotação específica da BFT, calculada de acordo com a Eq. (8).

Em seguida, a vazão da bomba é estabelecida pela Eq. (10):

$$Q_b = \frac{Q_t}{1,3} \quad (10)$$

Q_b - vazão da bomba [m^3/s];

Q_t - vazão da BFT [m^3/s].

O coeficiente 1,3 é chamado de fator de conversão médio. É possível determinar o rendimento da bomba usando como base a rotação específica e a vazão da bomba, obtido através da Fig. 3. Porém, é importante lembrar que esta equação é apenas uma estimativa da vazão da bomba, para que seja feita uma pré-seleção da máquina. Esta estimativa da vazão será útil na determinação do rendimento da bomba. Conhecendo-se a rotação específica e o rendimento da bomba, que será igual ao da BFT, determinam-se os coeficientes de altura e vazão através das Figs. 4 e 5.

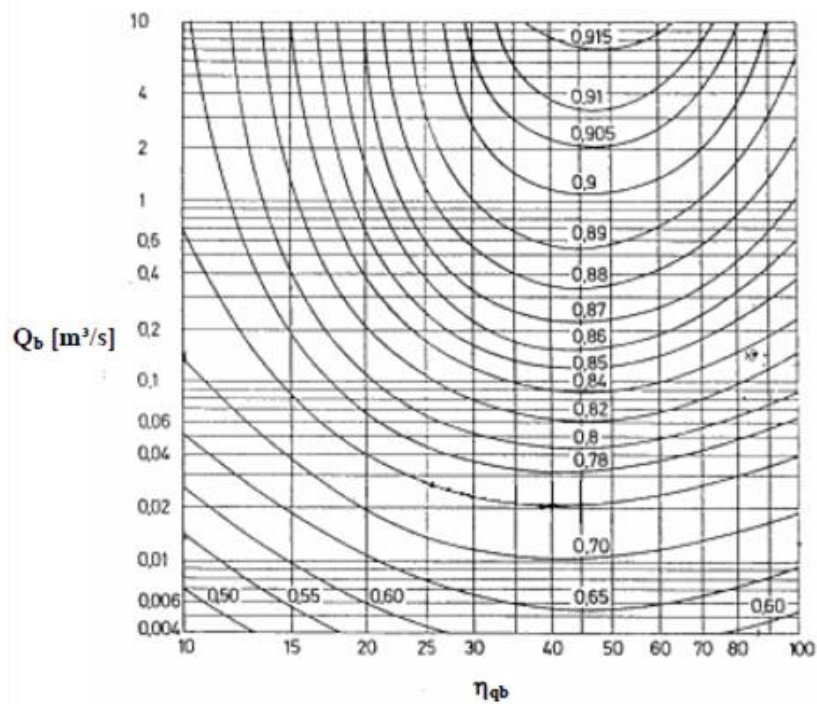


Figura 3. Rendimento da bomba em função da rotação específica e da vazão, adaptado de [6].

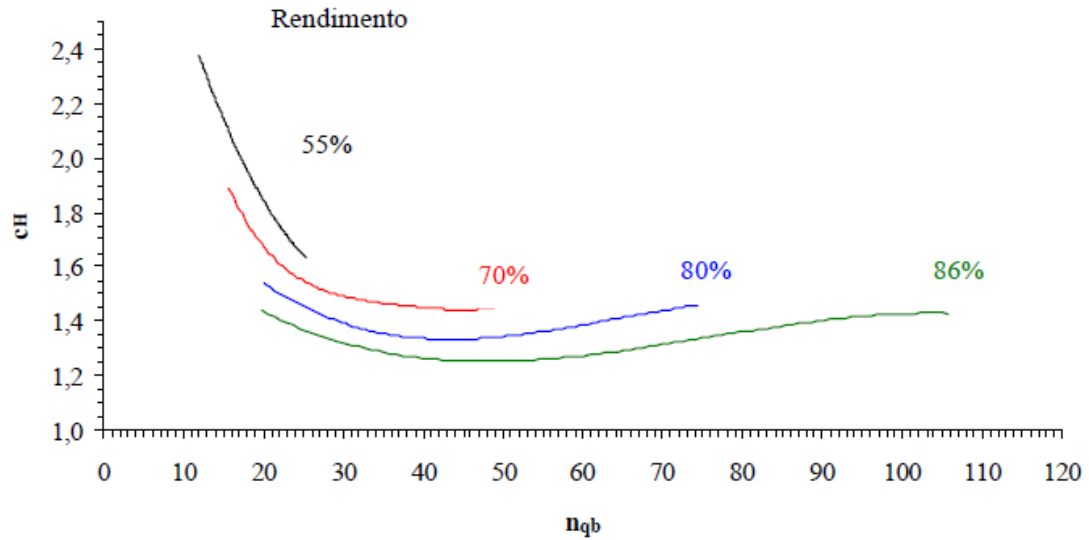


Figura 4. Coeficientes de altura de Chapallaz, adaptado de [6].

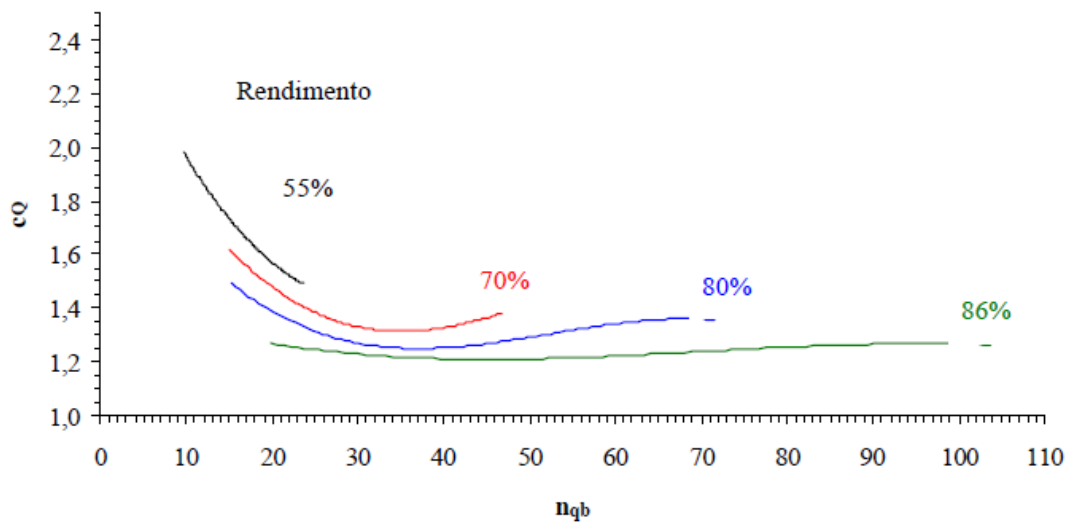


Figura 5. Coeficientes de altura de Chapallaz, adaptado de [6].

Do mesmo modo que o Método de Viana, determinados os coeficientes e , conhecendo-se a altura e a vazão do aproveitamento e calcula-se a altura e a vazão da bomba, através das Eqs. (6) e (7) e utilizando as Leis de Semelhança é possível adequar-se a rotação e seleciona-se a bomba que proporciona o rendimento mais favorável possível, nos catálogos dos fabricantes.

2.3. Método de Alatorre-Frenk e Troncoso-Torres

Alatorre-Frenk e Troncoso-Torres [7] calculam a carga, vazão e eficiência da BFT no ponto de melhor eficiência no modo reverso, usando a eficiência, carga e vazão nominal no modo direto. As correlações usadas nesse método são mostradas nas Eqs. (11), (12) e (13).

$$\frac{H_t}{H_p} = \frac{1}{0,85n_p^5 + 0,385} \quad (11)$$

$$\frac{Q_t}{Q_p} = \frac{0,85n_p^5 + 0,385}{2n_p^{9,5} + 0,205} \quad (12)$$

$$\eta_t = \eta_p - 0,03 \quad (13)$$

Onde:

H_p - altura da bomba que será utilizada como turbina [m];

H_t - altura disponível no aproveitamento (da BFT) [m];

Q_b - vazão da bomba que será utilizada como turbina [m];

Q_t - vazão disponível no aproveitamento (da BFT) [m³/s];

η_t - eficiência da BFT [1];

η_p -eficiência da bomba que será utilizada como turbina [1].

Neste trabalho os métodos são aplicados em uma situação fictícia onde dada uma vazão de projeto de 500 m³/h (0,1388 m³/s) e altura de queda da turbina de 45 m, qual especificação da BFT para este caso. Estes métodos são fundamentados em resultados empíricos de várias bombas funcionando como turbinas. Contudo, vale a pena ressaltar que a altura e vazão da BFT devem maiores que da BFB, na mesma rotação, para que o rendimento da bomba operando como turbina seja igual àquele da bomba operando como bomba [4]. O efeito resultante disso é a intensificação da potência o eixo da máquina operando em fluxo reverso.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o método de Viana [4,5], calculou-se a rotação específica após adotar a rotação de 1800 rpm, através da Eq. (3) e então, encontrou-se os valores dos coeficientes de altura e vazão, de acordo com a Fig. 1. Após isso, determinaram-se os valores de vazão e altura com as Eqs (1) e (2). Em seguida, foi calculada a correção da rotação através das Eqs. (4) e (5).

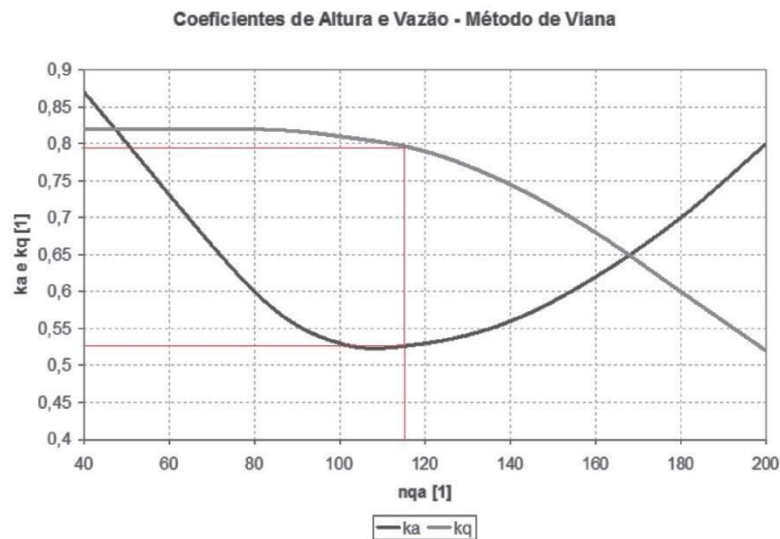


Figura 8. Encontrando os Coeficientes de Viana através da rotação específica, adaptado de [4].

$$k_a = 0,53; k_q = 0,79$$

$$n_{qA} = \frac{n_t \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{3/4}} \cdot 10^3 = 116,09 \quad (1)$$

$$H_b = k_a \cdot H_t = 23,850[m] \quad (2)$$

$$Q_b = k_q \cdot Q_t = 0,10972 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3)$$

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot H_b = 22,5434[m] \quad (4)$$

$$Q_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot Q_b = 0,10667 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (5)$$

Para Chapallaz et al. [6], selecionou-se a bomba por meio da Fig. 2, utilizando a vazão e altura de projeto, encontrando, nessa faixa, a bomba de fluxo radial e então, utilizando a rotação de 1800 rpm, determinou-se a rotação específica da BFT pela Eq. (8) e em seguida a rotação específica da bomba utilizando a Eq. (9). Assim, estabeleceu-se a vazão nominal da bomba com a Eq. (10) e com os valores de vazão nominal e rotação específica, localizou-se na Fig. 3 o rendimento da bomba. Feito isso, encontrou-se os coeficientes de altura e vazão e a partir daí, determinaram-se os valores de vazão e altura através das Eqs. (6) e (7). Em seguida, fez-se a correção da rotação através das Eqs. (4) e (5).

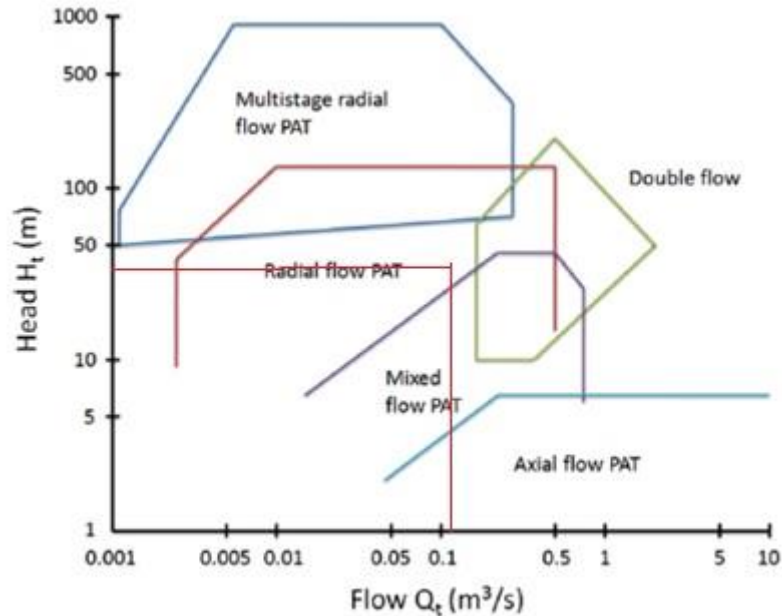


Figura 9. Indicação do tipo de bomba através da pré-seleção da BFT com os valores de vazão e altura, adaptado de [6].

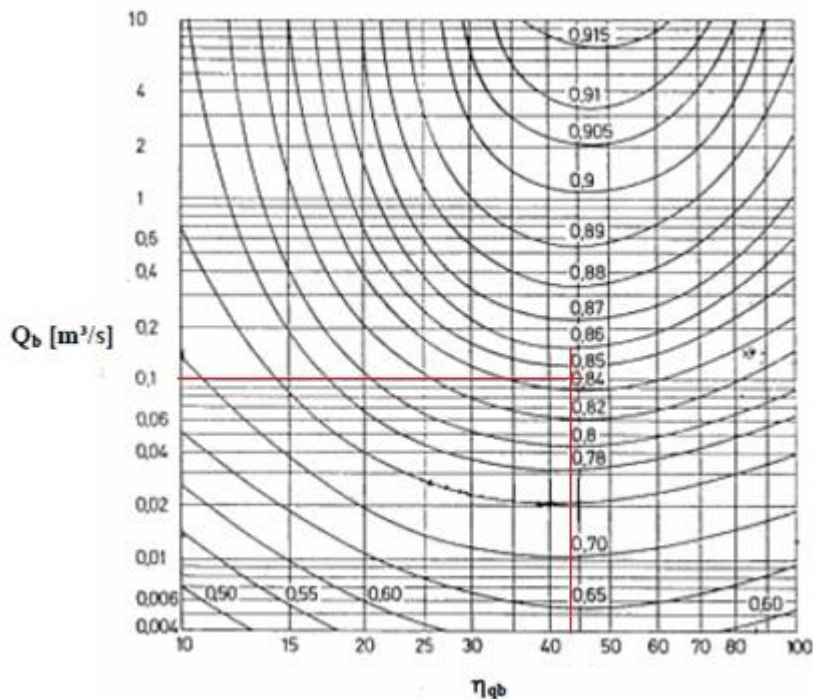


Figura 10. Demonstração do máximo rendimento da bomba em função da rotação específica e da vazão encontradas, adaptado de [6].

$$\eta = 0,845$$

$$k_a = 1,29 ; k_q = 1,3$$

$$n_{qt} = \frac{n_t \sqrt{Q_t}}{(H_t)^{\frac{3}{4}}} = 38,610 \quad (8)$$

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} = 49,382 \quad (9)$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{1,3} = 0,10684 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (10)$$

$$H_b = \frac{H_t}{k_a} = 34,884[m] \quad (6)$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{k_q} = 0,10684 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (7)$$

Assim, usando as Eqs (4) e (5):

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot H_b = 32,973[m] \quad (4)$$

$$Q_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot Q_b = 0,10387 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (5)$$

No método de Alatorre-Frenk e Troncoso-Torres [7], utilizando o rendimento da bomba fornecido pelo fabricante (85,5%), fez-se uso das Eqs (11), (12) e (13) para encontrar a altura, vazão e rendimento, respectivamente, da bomba a ser selecionada para uso como turbina.

$$\frac{H_t}{H_p} = \frac{1}{0,85n_p^5 + 0,385} = 31,943[m] \quad (11)$$

$$\frac{Q_t}{Q_p} = \frac{0,85n_p^5 + 0,385}{2n_p^{9,5} + 0,205} = 0,10304 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (12)$$

$$\eta_t = \eta_p - 0,03 = 0,825 \quad (13)$$

Analisando a Tab.1, os dois parâmetros básicos estabelecidos na seleção (H_b e Q_b) apresentam pouca variação entre os três métodos aplicados, sendo a altura da bomba o de maior variação. Apesar do método de Alatorre-Frenk e Troncoso-Torres [9] não calcular a velocidade específica e não ter coeficientes de altura e vazão, o método de Viana foi o que revelou resultados mais dispersos para um dos parâmetros analisados, no entanto, muito similar aos demais.

Tabela 1. Resultados comparativos pelos três métodos.

<i>Dados do aproveitamento: $Q_t = 0,13889[m^3/s]$; $H_t = 45[m]$</i>							
Método	k_a [1]	k_q [1]	H_b [m]	Q_b [m³/s]	H_{bc} [m]	Q_{bc} [m³/s]	η_{bft} (%)
Viana	0,53	0,79	23,850	0,10972	22,543	0,10667	0,855
Chapallaz	1,29	1,3	34,884	0,10684	32,973	0,10387	0,845
Alatorre-Frenk	-	-	31,943	0,10304	-	-	0,825

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou resultados de especificação de bombas funcionando como turbinas. Para uma determinada aplicação fictícia foram analisados três métodos de seleção: o método por Viana, método de Chapallaz et al. e o método de Alatorre-Frenk e Troncoso-Torres. Os resultados mostram que há uma razoável variação nos valores de altura corrigida da bomba encontrados nos métodos, demonstrando que esse é um assunto ainda em aberto necessitando de maiores investigações. Em consequência do seu caráter experimental, os métodos de Viana e Chapallaz são recomendados por levarem em conta a interferência da geometria do rotor, levando a um resultado mais próximo da

realidade. Ressalta-se que para os métodos apresentados não foram desenvolvidos os resultados de cálculo de altura de sucção para evitar os efeitos de cavitação.

5. REFERÊNCIAS

- [1] DERA KHSHAN, S.; NOURBAKHSH, A. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, p. 1620-1627, 2008.
- [2] YANG, S.; DERA KHSHAN, S. KONG, F. Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance. *Renewable Energy*, 48, p. 507-513, 2012.
- [3] JAIN, S.; PATEL, R. Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, p. 841-868, 2014.
- [4] VIANA, A.N.C.; Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas; Dissertação de Mestrado; EFEI; Itajubá; Dezembro, 1987.
- [5] VIANA, A. N. C. Bombas Funcionando como Turbina. Rio de Janeiro, Synergia Editora, 2012.
- [6] CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; Manual on Pumps Used as Turbines; MHPG Series; Vol. 11; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany, 1992.
- [7] C. ALATORRE-FRENK, C.; TRONCOSO-TORREZ, K. Pequeños aprovechamientos hidráulicos para generación de energía. Diseño de una microcentral para Ticuahutipan, Ver. (BEng Thesis), FI-IJNAM, Mexico, 1998.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

SPECIFICATION METHODS' COMPARISON OF PUMPS AS TURBINES IN SMALL INSTALLATIONS

Juliana Garcia Gaia, julianagarciagaia@gmail.com¹

Alexandre .L.A. Mesquita, alexmesq@ufpa.br¹

André L. A. Mesquita, andream@ufpa.br¹

¹Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE), Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí, Rua Itaipu, 36 - Vila Permanente, 68464-000, Tucuruí – PA, Brasil

²Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC), Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí, Rua Itaipu, 36 - Vila Permanente, 68464-000, Tucuruí – PA, Brasil

Abstract. Hydraulic pumps can be used as turbines in small installations instead of conventional turbines. There are many advantages of using pumps as turbines (PAT), such as cost, easy maintenance, availability, among others. The disadvantages are that the equipment was not designed for reverse operation and in the same conditions of head and flow the PAT's efficiency will be less than pump as pump's efficiency (PAP). Therefore, the problem of pumps as turbines has been the subject of research and several methods have been developed for this specification. So, this paper presents the specification results of turbine as pump using three different methods. The results reached are compared and discussed.

Keywords: Pump as Turbine, Hydraulic machines, Efficiency.