

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

PREDIÇÃO DE OPERAÇÃO DE BOMBAS COMO TURBINA E SUA APLICAÇÃO PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

* Juliana Gaia Ducati ¹
Juliana Melo de Sousa ²
Davi Edson Sales e Souza ²
André Luiz Amarante Mesquita ³

PREDICTION OF PUMPS AS TURBINE OPERATION AND ITS APPLICATION FOR ENERGY RECOVERY IN WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

Recibido el 3 de mayo de 2022. Aceptado el 8 de agosto de 2022

Abstract

Pumps as turbines (PAT) are a sustainable alternative for generating energy by taking advantage of the hydraulic potential of a site. However, there are difficulties in predicting the turbine mode characteristic curves for off-design operating points, based on the curves provided by the pump manufacturers. The purpose of this work is to predict the PAT operating range of pumps selected to work as pressure-reducing valves (PRV) in the water supply system (WSS) of Vila Permanente, in Tucuruí - Pará, Brazil. Three experimental studies were evaluated for the prediction of head (Ht) and flow (Qt) of PATs in turbine mode at the best efficiency point (BEP). Then, a second method was applied that considers the entire operating range of PAT, combined with the methods in the BEP to obtain characteristic curves QxH (flow x head) and Qxη (flow x efficiency) of PAT. With the head and flow values of the pressure points in the WSS under study, centrifugal pumps were selected to work as turbines, applying the best combination of method and obtaining the characteristic curves of PAT in turbine mode, in order to obtain the operation range of the PAT, in addition to the calculations of partial energy recovery with values of 372.3 MWh/year.

Keywords: pump-as-turbine, water supply system, energy recovery.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí, Brasil.

² Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí, Brasil.

³ Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí, Brasil.

*Autor correspondente: Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí, Brasil, 68455-901. Brasil. Email: julianagarciagaia@gmail.com

Resumo

As bombas funcionando como turbinas (BFT) são uma alternativa sustentável para geração de energia aproveitando o potencial hidráulico de um local. Entretanto, dificuldades são encontradas na predição da curva característica em modo turbina para pontos de operação fora da condição nominal, a partir de curvas fornecidas pelos fabricantes de bombas. Este trabalho tem como propósito prever a faixa de operação de BFT de bombas selecionadas para funcionar como válvulas redutoras de pressão (VRP) no sistema de abastecimento de água (SAA) da Vila Permanente, em Tucuruí – Pará, Brasil. Avaliaram-se três estudos experimentais para a previsão de altura (Ht) e vazão (Qt) de BFTs no modo turbina no melhor ponto de eficiência (BEP). Em seguida, aplicou-se um segundo método que considera toda faixa de operação da BFT, combinado com os métodos no BEP para obter curvas características QxH (vazão x altura) e Qx η (vazão x eficiência) da BFT. Com os valores de altura e vazão dos pontos de pressão no SAA em estudo, selecionaram-se bombas centrífugas para funcionar como turbinas, aplicando a melhor combinação de método e obtendo as curvas características da BFT no modo turbina, de modo a obter a faixa de operação da BFT, além dos cálculos de recuperação parcial de energia com valores em 372.3 MWh/ano.

Palavras-chave: bomba como turbina, sistema de abastecimento de água, recuperação de energia.

Introdução

O avanço tecnológico e o advento de necessidades da vida moderna, associado a expansão contínua da população global, um dos maiores obstáculos atualmente encontrados é a incerteza relativa à possibilidade futura de energia diante à demanda, sobretudo em razão do emprego extensivo de fontes não-renováveis e ao abuso de alta proporção dos recursos concedidos pelo planeta (Mauad *et al.*, 2017). A água é o recurso natural em maior quantidade no mundo. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021), a água é uma das poucas fontes para produção de energia que não causa aumento do aquecimento global, que é a dificuldade central do problema ambiental atual, e é um recurso renovável.

De acordo com Tsutiya (2006), existem quatro áreas de oportunidade para melhoria da eficiência energética em sistemas de abastecimento de água (SAA): o uso racional de água para reduzir o consumo energético, a configuração e operação do sistema relacionado com seus sistemas de produção (captação, tratamento e configuração de distribuição) e à estrutura (uso de válvulas redutoras de pressão, atrito gerado por materiais da tubulação, etc), a otimização da eficiência eletromecânica de bombas e motores e a redução de perdas de água na distribuição. Uma maneira simples para melhorar os índices de eficiência de um SAA, reduzindo a energia requerida para essa distribuição, é fazendo a regulação da pressão. As estratégias de regulação de pressão podem ser feitas basicamente de duas maneiras: com o uso de válvulas redutoras de pressão (VRPs) e utilizando áreas de medição distritais (AMDs).

De acordo com Gupta e Kulat (2018), as válvulas redutoras de pressão (VRP) têm como vantagens o baixo custo de investimento inicial, diminui os vazamentos de água na rede, gerencia a pressão a jusante da válvula e projeto e funcionamento relativamente simples. Como desvantagens, pode-

se citar que a energia é dissipada, porém não recuperada; pode apresentar defeitos se for introduzida energia no sistema (Creaco e Walski, 2017). Pensando nisso, recentemente têm se empregado bombas funcionando como turbinas (BFTs) em substituição das VRPs. Na verdade, a utilização de BFTs aplicadas a redes de distribuição de água (RDA) mostra como vantagens a recuperação de energia; diminuição vazamentos de água na rede; e gerenciamento da pressão a jusante (Pérez-Sánchez *et al.*, 2018).

Quando Thoma e Kittredge (1931) estavam examinando as características das bombas por completo, aleatoriamente se depararam com a possibilidade de que as bombas podiam ser operadas de forma muito eficiente no modo reverso. Entre os anos de 1950 e 1960, o conceito de usinas hidrelétricas bombeadas, que são as que possuem um sistema para bombear água de um reservatório inferior para um superior proporcionalmente a vazão hidráulica, na faixa de 50 a 100 MW, foi aperfeiçoado, sobretudo em países desenvolvidos para gerenciar as solicitações de energia de pico. Este cenário, então, estimulou uma fase produtiva de pesquisa e, em seguida, bombas padrões foram estudadas no modo de turbina.

Os avanços nas tecnologias de controle de máquinas elétricas permitiram o uso de BFTs para geração de energia elétrica, pois viabilizaram a regulagem do acionamento com velocidade, sentido de rotação e torque variáveis, criando a possibilidade da utilização de bombas trabalhando em modo inverso para geração de energia (Fernandez *et al.*, 2004). Diversos métodos para calcular o desempenho das BFTs foram propostos na literatura; alguns baseados no desempenho do modo de bomba e outros na geometria da máquina. Isbasoiu *et al.* (2007) reportaram que a seleção de uma BFT para um determinado local deve ser feita de acordo com os requisitos específicos de vazão e altura. A bomba escolhida deve ter queda de vazão no melhor ponto de eficiência (BEP) o mais próximo possível das condições do local. Embora a eficiência da BFT seja aproximadamente a mesma que no modo de bomba, no BEP, os valores de pressão e vazão são diferentes nos modos da bomba e da turbina.

As metodologias para a predição da BFT no BEP são bem abordadas na literatura, porém existe uma escassez de métodos de predição para BFT operando em toda a faixa de operação. Os modelos que predizem o desempenho de BFTs no BEP não conseguem prever a curva característica no modo turbina, com aplicação em todos os pontos da curva gerando resultados que divergem da realidade. Recentemente os estudos científicos foram estendidos e publicados sobre o desempenho de BFT em condições operacionais em toda faixa de operação (Renzi *et al.*, 2020). De acordo com Rossi *et al.*, (2019), a parte mais trabalhosa no estudo de BFTs é a avaliação de seus valores de BEP juntamente com as condições em toda a faixa de operação quando funcionam no modo turbina, para ter uma previsão objetiva e confiável.

Dessa maneira, é fundamental a busca, através de pesquisa e análise, de um método confiável que opere além do BEP visando a sua aplicação na área de sistemas híbridos com armazenamento bombeado (Andrade *et al.*, 2020) e a recuperação de energia em RDAs. Neste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia que une dois métodos para a previsão de BFTs. O primeiro considera o ponto de melhor eficiência da bomba (BEP) para selecionar a turbina adequada, enquanto o segundo prediz a BFT para toda faixa operacional. O método proposto foi validado e em seguida aplicado em uma rede real substituindo VRPs por BFTs para a recuperação de energia desperdiçada pelas válvulas.

Material e métodos

Modelos para predição da operação de bomba como turbina

A associação de dois métodos consolidados na literatura para prever o comportamento das BFTs é proposta neste trabalho. Inicialmente, são apresentadas três metodologias para seleção de BFTs baseadas no melhor ponto de eficiência da bomba, que foram escolhidas por serem de aplicação simples e eficácia comprovada por vários autores em testes experimentais, como Lopes (2003) e Jain e Patel (2014). Embora os métodos simples que preveem o BEP de BFTs sejam menos confiáveis (Carravetta *et al.*, 2011), é desejável sua utilização em conjunto com modelos que predizem o comportamento BFTs em toda faixa operacional, pois, o desempenho de uma BFT inicia com a previsão BEP que é condição inicial e tem papel crucial na estimativa da curva BFT fora de projeto.

O primeiro modelo, Alatorre-Frenk (1994), revisou os diversos métodos de predição de uma BFT, e sugeriu um novo método experimental de predição que não utilizasse unicamente o desempenho no modo bomba.

O método de Sharma e Williams (Williams, 1994) melhorou as equações desenvolvida no trabalho de Sharma (1985), que são utilizadas se a velocidade da turbina for igual à da bomba. O modelo de Yang (Yang *et al.*, 2012), analisou teórica, empírica e numericamente o desempenho de uma bomba e uma BFT, considerando o ponto de melhor eficiência da bomba.

Após as análises, as seguintes correlações empíricas foram propostas (Tabela 1), onde q é o coeficiente de vazão, h é o coeficiente de altura, Q_t é a vazão da turbina na rotação de funcionamento em $[m^3/s]$, Q_p é a vazão da turbina na rotação nominal da bomba em $[m^3/s]$, H_t é a altura da turbina na rotação de funcionamento em $[m]$, H_p é a altura da turbina da rotação nominal da bomba em $[m]$, η_t é o rendimento da turbina, η_p é o rendimento da bomba e $\eta_{máx}$ é o rendimento máximo da bomba.

Tabela 1. Técnicas analíticas utilizadas

Método	Altura	Vazão	Eficiência
Alatorre-Frenk (1994)	$H_t/H_p = 1/(0.85\eta_p^5+0.385)$	$Q_t/Q_p = (0.85\eta_p^5+0.385)/(2\eta_p^{9.5}+0.205)$	$\eta_t = \eta_p - 0.03$
Sharma e Williams (Williams, 1994)	$H_t = H_{bep}/\eta_{máx}^{1.2}$	$Q_t = Q_{bep}/\eta_{máx}^{0.8}$	$\eta_t = \eta_p$
Yang (Yang et al., 2012)	$h = 1.2/\eta_{máx}^{1.2}; h = H_t/H_b$	$q = 1.2/\eta_{máx}^{0.55}; q = Q_t/Q_b$	$\eta_t = \eta_p$

Método de Rossi et al. (2019)

Rossi et al. (2019) apresentaram uma avaliação abrangente de um modelo de previsão usado para avaliar as curvas características das bombas como turbinas, com atenção particular às condições operacionais fora do projeto. O modelo de previsão foi derivado da reformulação de um amplo conjunto de dados experimentais com base na literatura científica mais relevante relacionada a diversas BFTs operando em modo turbina. A capacidade de previsão do modelo foi verificada com testes experimentais e confirmada por simulações numéricas. Pela sua simplicidade, facilidade de aplicação e boa capacidade de predição, esse foi o método escolhido neste trabalho para ser avaliado.

As relações do método são descritas pelas Equações 1, 2, 3, 4 e 5, onde ϕ é o coeficiente de vazão, ψ é o coeficiente de altura, η é a eficiência, Q é a vazão em [m³/s], H é a altura em [m], g é a aceleração da gravidade [m/s²].

$$\psi / \psi_{BEPT} = 0.2394R^2 + 0.769R \quad \text{Equação (1)}$$

$$\eta/\eta_{BEPT} = -1.9788R^6 + 9.0636R^2 - 13.148R^4 + 3.8527R^3 + 4.5614R^2 - 1.3769R \quad \text{Equação (2)}$$

$$R = \Phi/\Phi_{BEPT} \quad \text{Equação (3)}$$

$$\Phi = Q/(ND^3) \quad \text{Equação (4)}$$

$$\psi = gH/(ND)^2 \quad \text{Equação (5)}$$

Validação dos métodos conjuntos

Para a validação dos três métodos em conjunto com Rossi *et al.* (2019), foram utilizados os dados experimentais de Stefanizzi *et al.* (2017) e Alves (2010), os quais serviram de referência para a comparação da eficiência dos métodos conjuntos propostos. As Figura 1 e Figura 2 apresentam a comparação das curvas QxH e das curvas Qx η para os três métodos. A partir da análise das Figuras, é possível constatar que o método de Yang *et al.* (2012a) apresenta os melhores resultados. Portanto, ele será utilizado no cálculo da predição de BFTs em conjunto com Rossi *et al.* (2019).

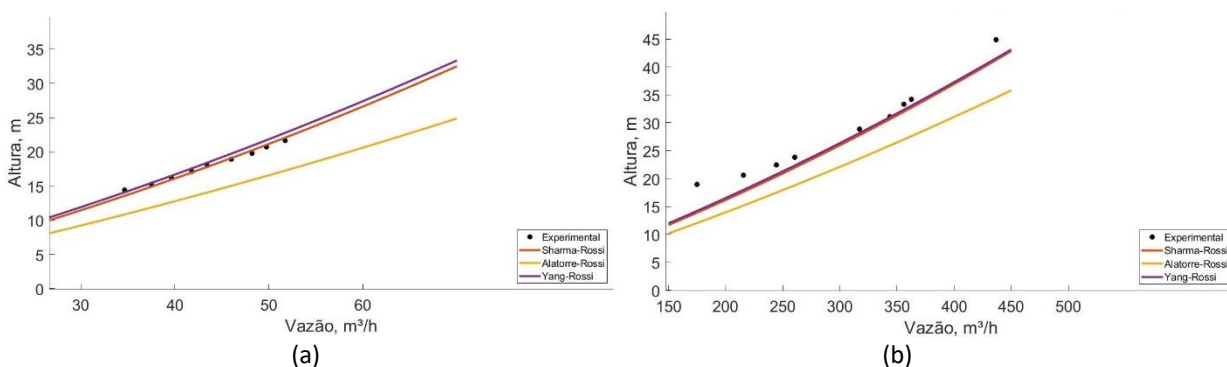


Figura 1. Comparação dos métodos aplicados com a curva experimental QxH do ensaio do trabalho de Alves (2010) (a) e Stefanizzi (2017) (b).

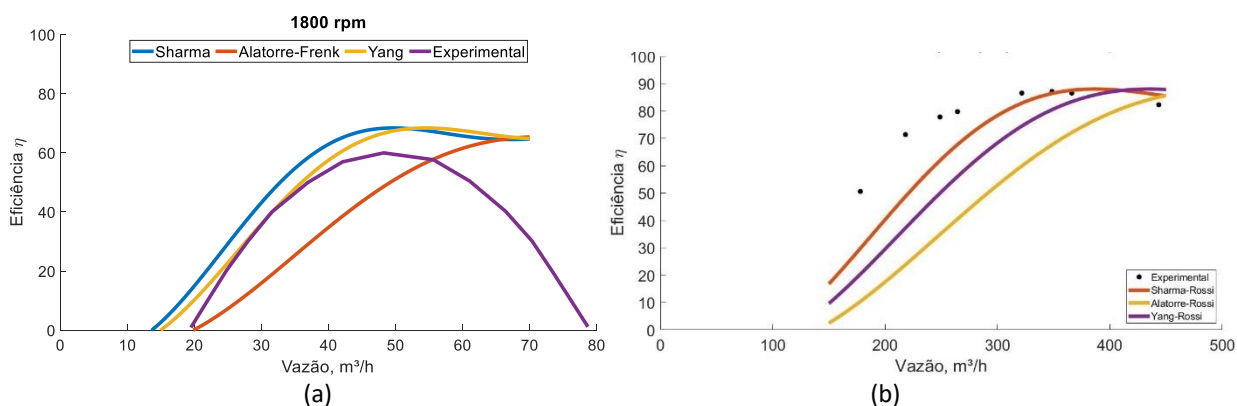


Figura 2. Comparação dos métodos para curva Qx η para o trabalho de Alves (2010) (a) e Stefanizzi (2017) (b).

Estudo de caso

O método conjunto proposto nesse artigo, foi aplicado em uma rede de distribuição de água (RDA) simulada por Souza *et al.* (2021). Nesse estudo, os autores simularam hidráulicamente uma rede que opera no município de Tucuruí, Amazônia Brasileira. A rede está implantada em uma área de topografia acidentada (56 a 206 m), ocasionando sérios problemas de pressão excessiva da RDA. O trabalho propôs a divisão da RDA em 6 áreas de medição distritais (AMD) com 14 VRPs estrategicamente posicionadas na rede, conforme a Figura 3, controlando a pressão que variou de 10 a 50 mca.

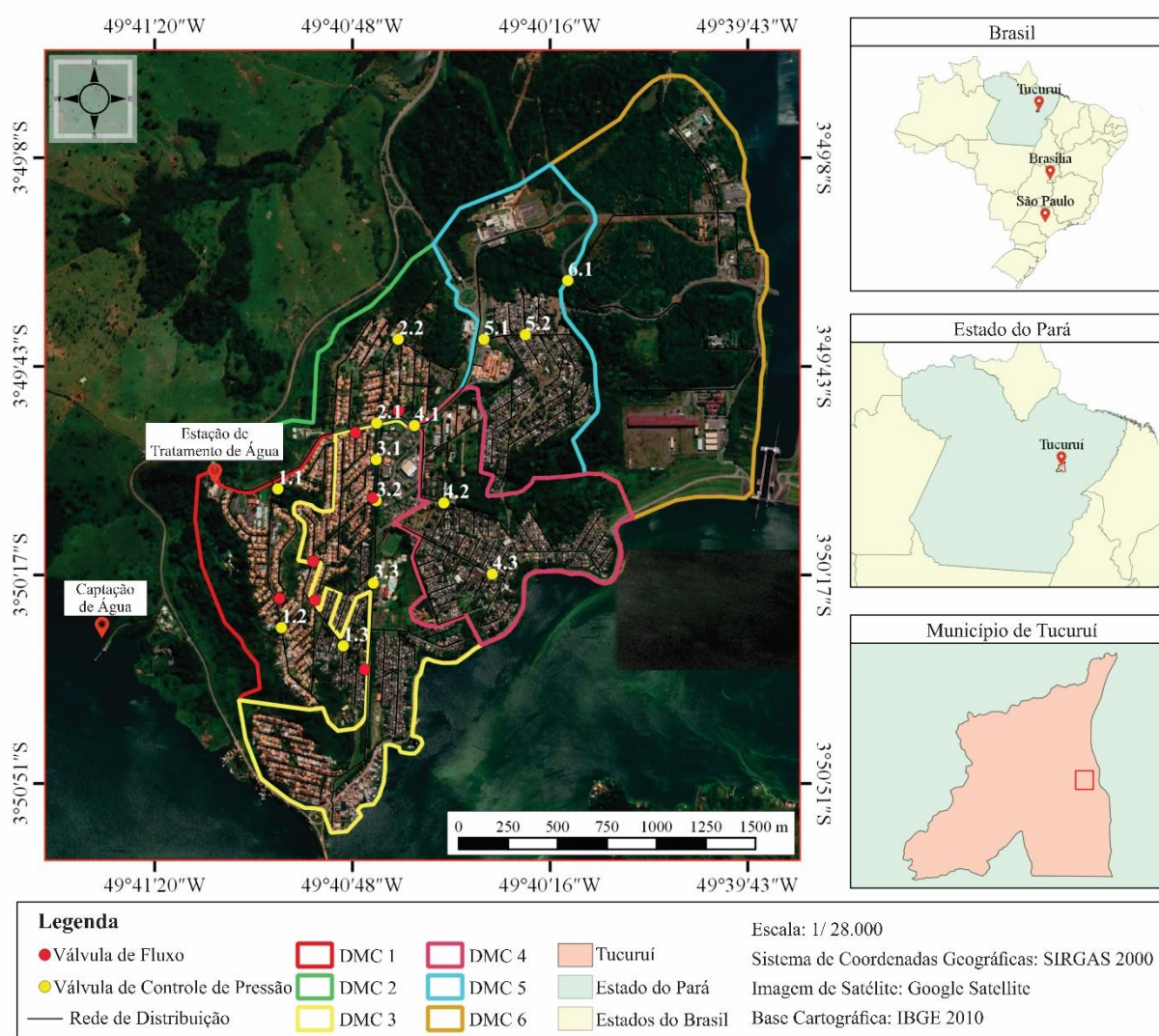


Figura 3. Divisão do sistema em AMD (Souza *et al.* 2021).

Nem sempre é financeiramente vantajoso substituir um VRP por uma bomba operando inversamente (Souza *et al.*, 2021). Na verdade, a pouca energia dissipada por uma válvula leva a seleção de um BFT de tamanho menor para o controle da pressão na rede em certas horas do dia, aumentando, significativamente, as perdas de água por vazamentos e o desperdício de energia elétrica. Portanto, das 14 válvulas sugerida pelos autores, o método foi aplicado somente à VRPs 1.3, 2.4, 3.1, 3.2 e 6.1. A partir da aplicação do método, foi estimada a quantidade de energia recuperada com a aplicação da Equação 6, onde P é a potência de saída da BFT em [kW], g é a aceleração da gravidade em [m/s^2], ρ é o peso específico da água em [kg/m^3], $QBFT$ é a vazão da BFT em [m^3/s], $HBFT$ é a altura da BFT em [m] e η_{BFT} é a eficiência da BFT. Para se obter o valor da potência em kW é preciso dividir o resultado por 1000 como indicado na Equação 6.

$$P = g \rho QBFT HBFT \eta_{BFT} / 1000$$

Equação (6)

Resultados

Para selecionar a bomba foi adotada a seguinte metodologia: inicialmente foi escolhida uma das VRP; o segundo passo é utilizar as equações do método de Yang *et al.*, (2012), empregando os valores de vazão e pressão dissipada nos dados de vazão e altura da turbina, dando um chute como valor de eficiência inicial para que assim possam ser encontrados os valores de vazão e altura da bomba; de posse desses valores, busca-se em um catálogo de fabricante de bombas a bomba correspondente; o catálogo utilizado foi do fabricante KSB; o passo seguinte é buscar a curva característica da bomba; e assim, pode-se escolher qual o rotor adequado e observar quais os valores de altura, vazão e eficiência no BEP da bomba; com esses dados, calcula-se a predição da BFT como os valores de altura, vazão e eficiência no modo turbina, de acordo com o método de Yang *et al.*, (2012), que é o método que mostra os melhores valores quando comparado com os estudos experimentais; finalmente, com os valores preditos pelo método de seleção da BFT, utiliza-se o método de Rossi *et al.*, (2019), no programa MATLAB para apresentar a previsão da curva da bomba quando esta funciona como turbina.

A seleção de bombas e o cálculo de predição pelo método de Yang *et al.*, (2012) foram obtidos e apresentados na Tabela 2. Em seguida, também são apresentados os gráficos com as curvas $Q \times H$ e $Q \times \eta$ da BFT obtida com o uso do método de Rossi *et al.*, (2019) nas Figuras 4, 5, 6, 7 e 8. Na análise das Figuras, é possível verificar a faixa de operação das bombas selecionadas para funcionar como turbina em substituição às válvulas redutoras de pressão. Essas curvas contribuem para a visualização do funcionamento das BFTs quando a vazão não é constante. Desta forma, o uso das BFTs fica ampliado e com uma faixa de operação de sua performance apresentada de forma válida, mostrando não só apenas a região das curvas de $Q \times H$ mas também da eficiência em vários pontos de vazão.

Tabela 2. Dados sobre o modelo das bombas selecionadas.

VRP	Q _b (m ³ /h)	H _b (m)	Bomba	Rotação (rpm)	Rotor (mm)	Q _{bep} (m ³ /h)	H _{bep} (m)	η máx.
1.3	31.74	21.94	KSB MEGANORM 40-250	1750	250	28	26	0.55
2.4	163.79	36.78	KWP O 100-080-400	1450	404	105	45	0.67
3.1	52.66	36.81	KSB MEGANORM 40-200	1750	209	26	20	0.58
3.2	50.53	51.77	KSB MEGANORM 40-250	1750	260	30	29	0.55
6.1	24.82	62.88	KSB MEGANORM 50-250	1750	260	46	30.5	0.64

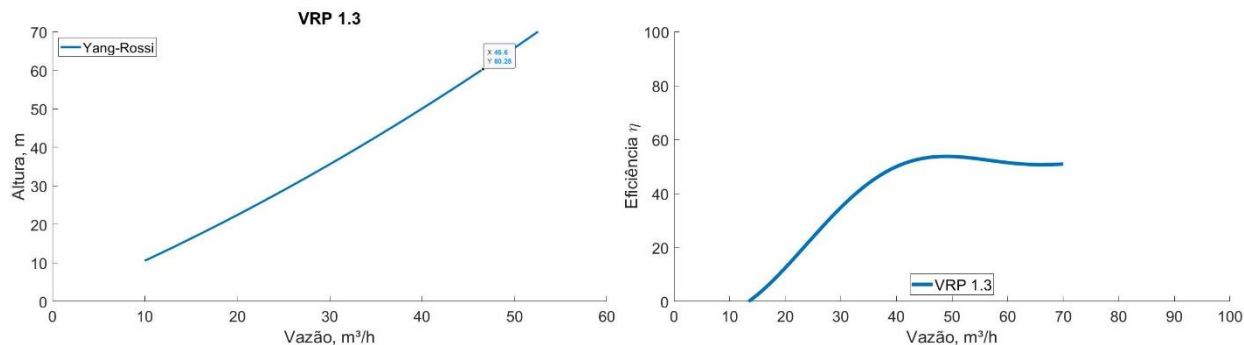


Figura 4. Curva QxH e Qxη da BFT obtida para a VRP 1.3 com o uso do método de Rossi (2019).

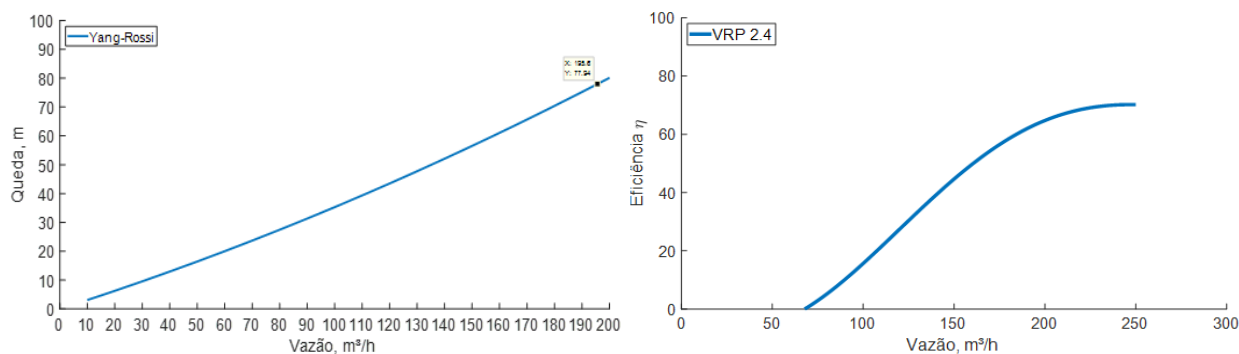


Figura 5. Curva QxH e Qxη da BFT obtida para a VRP 2.3 com o uso do método de Rossi (2019).

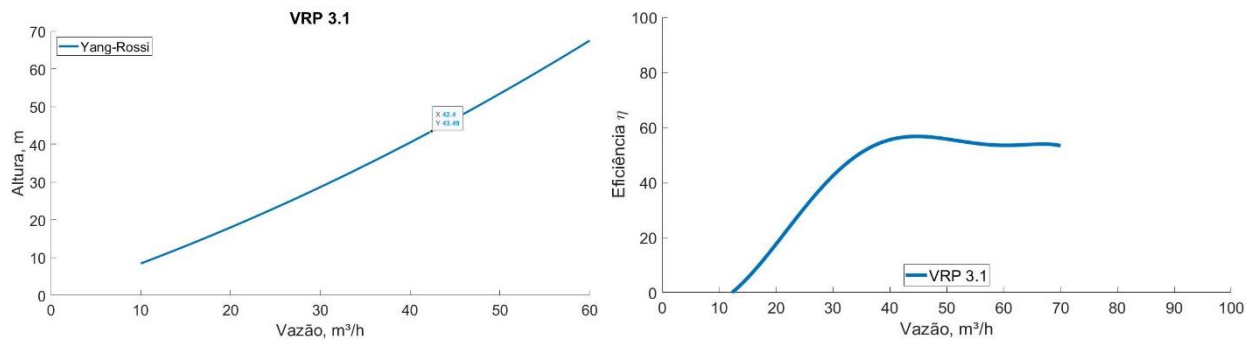


Figura 6. Curva QxH e Qx η da BFT obtida para a VRP 3.1 com o uso do método de Rossi (2019).

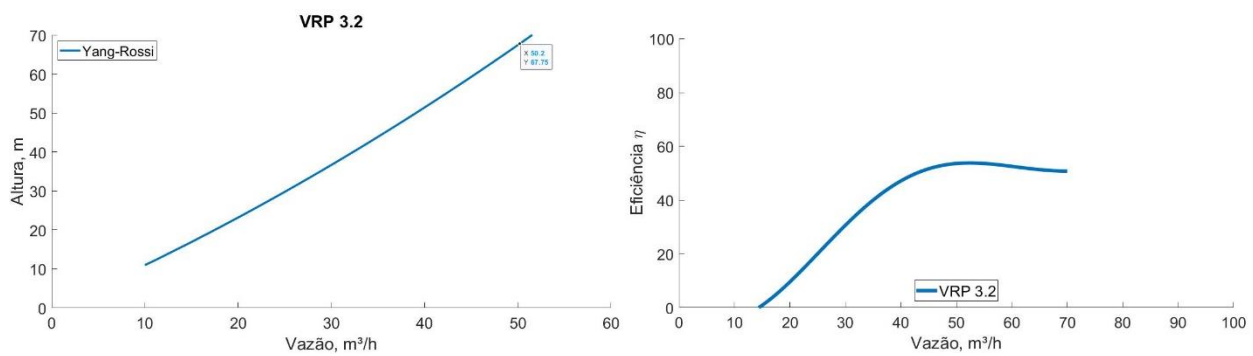


Figura 7. Curva QxH e Qx η da BFT obtida para a VRP 3.2 com o uso do método de Rossi (2019).

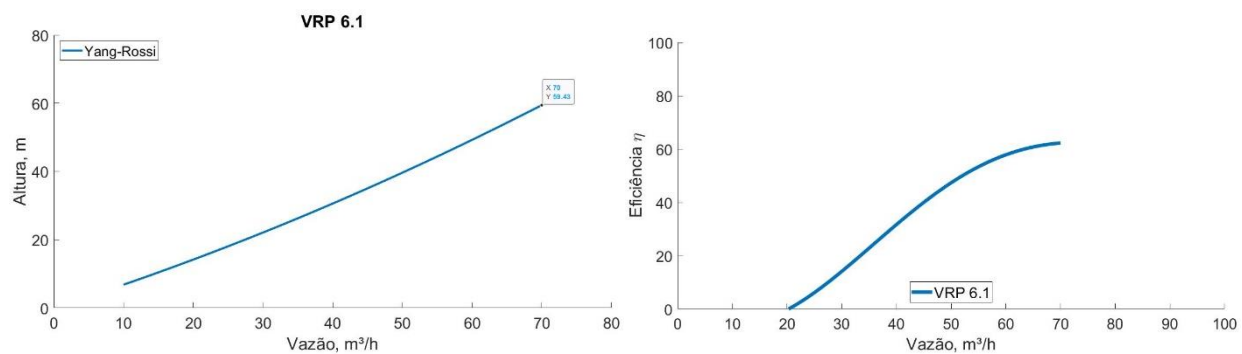


Figura 8. Curva QxH e Qx η da BFT obtida para a VRP 3.2 com o uso do método de Rossi (2019).

Ao alcançar as curvas de Q_xH e $Q_x\eta$ da BFT, percebe-se que a estimativa da faixa de operação da máquina é mais satisfatória do que apenas a previsão do BEP, pois, desta maneira, pode-se verificar vários pontos de vazão, altura e eficiência em que a turbina poderá operar. Contudo, como se trata de uma avaliação teórica, não se deve descartar o uso dos métodos no BEP, pois são procedimentos auxiliares para encontrar as curvas características da BFT e sem eles essa avaliação não seria possível.

A partir dos dados alcançados pela utilização dos métodos de predição, a energia gerada com as BFTs está relatada na Tabela 3. Para obter os valores de energia recuperada ao ano, deve-se multiplicar o resultado da Potência [kW] pelas horas do dia, ou seja, 24 horas e então pelo total de dias no ano (365 dias).

Tabela 3. Dados de estimativa de energia recuperável.

BFT	Método de Yang+Rossi			
	Qt (m ³ /h)	Ht (m)	η	P (kW)
1.3	46.7	60.2	0.55	4.2
2.4	151.3	77.7	0.67	23.0
3.1	42.1	43.7	0.60	2.9
3.2	50.0	67.2	0.60	5.0
6.1	70.6	59.8	0.64	7.4
Potência hidráulica média (kW)				42.5
Energia recuperada ao ano (MWh/ano)				372.3

Conclusões

Neste estudo foi proposto o trabalho em conjunto de dois métodos de predição de BFTs consolidados na literatura, para avaliar o comportamento de BFTs em toda faixa de operação, considerando o BEP da turbina. No estudo de caso analisado, os resultados no melhor ponto de eficiência são totalmente aceitáveis. Em contrapartida, observa-se que os resultados reproduzidos com a combinação, apesar de próximos para um caso real, precisariam de ajustes, fato que pode ser observado pela comparação da aplicação do método com as curvas obtidas experimentalmente pelos trabalhos experimentais analisados. Portanto, admite-se que tais resultados são aproximados, ou seja, são resultados que poderiam ser aperfeiçoados, porém são confiáveis para as aplicações em projetos de engenharia.

Em relação à recuperação de energia, o sistema de abastecimento de água da Vila Permanente, em Tucuruí - Pará, foi encontrado o valor parcial de 372.3 MWh/ano. Neste estudo foi demonstrado a viabilidade de ganhos na retomada de energia da instalação de BFTs para a substituição de válvulas reguladores de pressão.

Referencias bibliográficas

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (2021) *Geração: No Dia Mundial da Água, ANEEL publica infográfico sobre hidrelétricas no Brasil*. Acesso em 09 de fevereiro de 2022, disponível em: <https://bit.ly/3cPPEys>
- Alatorre-Frenk, C. (1994) *Cost minimisation in micro-hydro systems using pumps-as-turbines*, Doctoral dissertation, Development Technology Unit, Department of Engineering, Faculty of Sciences, University of Warwick, 216 pp.
- Alves, D. D. S. (2010) *Contribuição para o estudo e a aplicação de bombas funcionando como turbinas na geração descentralizada*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 120 pp.
- Andrade Furtado, G. C., Amarante Mesquita, A. L., Morabito, A., Hendrick, B. F. T., Hunt, J. D. (2020) Using hydropower waterway locks for energy storage and renewable energies integration. *APPLIED ENERGY*, **275**, 115361-115375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115361>
- Carravetta, A., Fecarotta, O., Ramos, H. (2011) Numerical simulation on pump as turbine: Mesh reliability and performance concerns. *3rd International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact*, Ischia, Itália. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2011.6036260>.
- Creaco, E., Walski, T. (2017) Economic analysis of pressure control for leakage and pipe burst reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **143**(12), 04017074. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000846](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000846)
- Fernandez, J. et al. (2004) Performance of a centrifugal pump running in inverse mode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **218** (4) 265-271. <https://doi.org/10.1243/0957650041200632>
- Gupta, A., Kulat, K. D. (2018) A selective literature review on leak management techniques for water distribution system. *Water resources management*, **32**(10), 3247-3269. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1985-6>
- Isbășoiu, E. C., Bucur, D., Ghergu, C., Dunca, G. (2007) Using standard pumps as turbines. In: *Proceedings of the CEEX2007 Conference*, 1-5 pp.
- Jain, S. V., Patel, R. N. (2014) Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **30**, 841–868. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.030>.
- Lopes, R. E., Holder, R. P., Oliveira, A. E., Martinez, C. B. (2003). O Uso de Bombas Funcionando como Turbinas Acionando Geradores de Indução. In *II Congresso de Inovação em Energia Elétrica*, 271-275
- Mauad, F. F., Ferreira, L. C.; Trindade, T. C. G. (2017) Energia renovável no Brasil: análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras. *Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos*, 348 pp. <https://doi.org/10.11606/9788580230529>
- Pérez-Sánchez, M., López-Jiménez, P. A., Ramos, H. M. (2018) Modified affinity laws in hydraulic machines towards the best efficiency line. *Water resources management*, **32**(3) 829-844. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1841-0>
- Renzi, M., Nigro, A., Rossi, M (2020) A methodology to forecast the main non-dimensional performance parameters of pumps-as-turbines (BFTs) operating at Best Efficiency Point (BEP). *Renewable Energy*, **160**, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.165>
- Rossi, M., Nigro, A., Renzi, M. (2019) Experimental and numerical assessment of a methodology for performance prediction of Pumps-as-Turbines (BFTs) operating in off-design conditions. *Applied Energy*, **248**, 555-566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.123>
- Sharma, K. J. K. E. C. (1985) Small hydroelectric project-use of centrifugal pumps as turbines. *Kirloskar Electric Co., Bangalore, India*.
- Souza, D. E. S. E., Mesquita, A. L. A., Blanco, C. J. C. (2021) Pump-as-turbine for energy recovery in municipal water supply networks. A review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **43**, 489. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03213-z>

- Stefanizzi, M., Torresi, M., Fortunato, B., Camporeale, S. M. (2017) Experimental investigation and performance prediction modeling of a single stage centrifugal pump operating as turbine. *Energy Procedia*, **126**, 589-596. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.218>
- Thoma, D., Kittredge, C. P. (1931) Centrifugal pumps operated under abnormal conditions. *Journal of Power Sources*, **73**(1) 881-884.
- Tsutiya, M. T. (2006) Abastecimento de água. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 643 pp. São Paulo.
- Williams, A. A. (1994) The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **208** (1) 59-66. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1994_208_009_02
- Yang, S.; Derakhshan, S. Kong, F. (2012) Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance. *Renewable Energy*, **48**, 507-513. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.002>.
- Yang, Sun-Sheng et al. (2012) Effects of impeller trimming influencing pump as turbine. *Computers & Fluids*, **67**, 72-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.07.009>.