

Análise do aproveitamento energético em redes de distribuição de água com a utilização de bombas como turbina (BFT)

Analysis of energy use in water distribution networks with the use of pumps as turbine (PAT)



• **Data de entrada:**
28/03/2022

• **Data de aprovação:**
01/07/2022


Victor Renan Barbosa da Silva^{1*} | Júnior Hiroyuki Ishihara¹ | Ingrid Luna Baia Viana¹ |
Juliana Melo de Sousa¹ | Davi Edson Sales e Souza¹


DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.039>

ORCID ID

Silva VRB  <https://orcid.org/0000-0002-0081-7913>
Ishihara JH  <https://orcid.org/0009-0003-8338-3472>

Viana ILB  <https://orcid.org/0000-0003-3314-9322>

Sousa JM  <https://orcid.org/0000-0003-1265-7475>

Souza DES  <https://orcid.org/0000-0001-9632-5667>

Resumo

As redes de distribuição de água (RDAs) necessitam de pressão adequada para entregar água aos usuários. Em alguns casos, a pressão é excessiva e geralmente é dissipada por válvulas redutoras de pressão (VRP), que acabam desperdiçando essa energia contida na rede. Devido à necessidade mundial de buscar tecnologias de geração de energia renovável, pesquisadores estudaram a possibilidade de substituir essas VRPs por bomba funcionando como turbinas (BFT). Trata-se de uma bomba centrífuga operando inversamente em substituição VRP. Como as RDAs operam sob condições variáveis de vazão e pressão, a predição de BFTs ainda encontra dificuldades, o que prejudica seu controle efetivo da pressão quando substituem as VRPs. Esse trabalho analisa uma rede real com problemas na gestão das pressões. Localização distintas de VRPs para controlar a pressão da rede foram propostas em duas simulações hidráulicas. As VRPs foram substituídas por BFTs e foi avaliado qual configuração apresenta maior controle de pressão de abastecimento. A predição dessas máquinas foi realizada por um método conjunto que analisa toda a faixa de operação. Além disso, foram estimadas a quantidade de energia recuperada e as vantagens ambientais. Os resultados apontam o controle da pressão nas duas simulações (S1 e S2). Em S1, a pressão no Nó mais crítico foi reduzida em 42,80% e a recuperação de energia foi de 52 kWh/dia. Em S2, a pressão foi reduzida em 45,21% e a recuperação de energia foi de 190,96 kWh/dia; além de controlar melhor a pressão, os resultados de recuperação de energia foram 267% superiores a S1. O método conjunto, proposto na pesquisa, simplificou o processo de seleção e predição de BFT, e foi possível concluir que essas máquinas devem ser instaladas em paralelo com as VRPs, considerando que, quando as BFTs não podem ajustar a pressão em algumas horas do dia, as válvulas ajustam.

Palavras-chave: Rede de distribuição de água. Predição de bomba como turbina. Controle da pressão. Recuperação de energia.

Abstract

Water distribution networks (WDNs) need adequate pressure to deliver water to users. In some cases, the pressure is excessive and is usually dissipated by pressure reducing valves (PRVs), which end up wasting this energy contained in

¹ Universidade Federal do Pará - Tucuruí - Pará - Brasil.

* **Autor correspondente:** victor_PMT@outlook.com.

the network. Due to the worldwide need to seek renewable energy generation technologies, researchers have studied the possibility of replacing these PRVs with a pump running as turbines (PAT). It is a centrifugal pump operating inversely in substitution of PRVs. As WDNs operate under varying conditions of flow and pressure, the prediction of PATs still encounters difficulties, which impairs their effective control of pressure when replacing PRVs. This work analyzes a real network with pressure management problems. Different locations of PRVs to control network pressure were proposed in two hydraulic simulations. The PRVs were replaced by PATs and it was evaluated to see which was the best configuration for greater control of supply pressure. The prediction of these machines was performed by a joint method that analyzes the entire operating range. In addition, the amount of energy recovered and the environmental benefits were estimated. The results show the pressure control in the two simulations (S1 and S2), in S1, the pressure in the most critical node was reduced in 42.80% and the energy recovery was 52 kWh/day. In S2, the pressure was reduced in 45.21% and the energy recovery was 190.96 kWh/day; in addition to better controlling the pressure, the energy recovery results were 267% higher than S1. The joint method, proposed in the research, simplified the PAT selection and prediction process, and it was possible to conclude that these machines should be installed in parallel with the PRVs, considering that, when the PATs cannot adjust the pressure at some times of the day, the valves do.

Keywords: Water distribution network. Pump prediction as a turbine. Pressure control. Energy recovery.

1 INTRODUÇÃO

As questões climáticas têm despertado grandes discursões na sociedade. O modelo socioeconômico de produção e consumo tem proporcionado grandes impactos ambientais e as mudanças climáticas são cada vez mais perceptíveis, destacando-se o aquecimento global e a poluição. As fontes de energia renováveis são parte fundamental da solução para reduzir as emissões, e um exemplo viável são as pequenas centrais hidroelétricas aplicadas em sistemas de abastecimento de água (SAA) para recuperação de energia (EBRAHIMI; RIASI; KANDI, 2021). Esses sistemas apresentam grande energia na forma de pressão, e o excesso de pressão causa perdas por vazamento. Tradicionalmente, as válvulas redutoras de pressão (VRP) são usadas para controlar a pressão; entretanto, desperdiçam energia. Nesse contexto, as bombas funcionando como turbina (BFT) apresentam-se como uma solução interessante para reduzir a pressão e recuperar a energia contida nas redes de distribuição de água (RDA) (E SOUZA et al., 2023; LIMA et al., 2018). Essas são bombas comuns, axiais ou centrífugas,

operando em modo reverso, que, diferentemente das turbinas tradicionais, apresentam baixo custo e grande disponibilidade no mercado, além de maior faixa de operação em relação à vazão. As desvantagens são a escassez de dados em modo turbina e a dificuldade de prever o comportamento em toda a faixa de operação (CARRAVETTA et al., 2017; POLÁK, 2019).

Para solucionar o problema, diversos autores têm buscado prever o comportamento das BFTs. Muitos modelos utilizam o ponto de melhor eficiência da bomba (PME) para encontrar a turbina correspondente. No entanto, poucos investigam toda a faixa operacional, ou seja, considerando as variações de vazão e pressão das RDAs. Os métodos que investigam toda a faixa operacional são importantes para observar o comportamento da BFT fora do (PME) e a recuperação de energia em toda a faixa de operação (FERNÁNDEZ GARCÍA; MC NABOLA, 2020; LIMA et al., 2018). Além disso, muitas pesquisas têm buscado ferramentas de otimização de RDAs, objetivando controlar a pressão e diminuir o volume de vazamentos. Uma ferramenta

muito utilizada pelos pesquisadores é o EPANET, utilizado para modelar sistemas hidráulicos e simular a qualidade da água em redes de pressão. Por exemplo, Chacón et al. (2020) analisaram cinco distritos de irrigação localizados em Córdoba e Sevilha, sul da Espanha, usando o EPANET, e obtiveram resultados relevantes na recuperação de energia. Sambito et al. (2021) utilizaram o EPANET para simular uma rede teórica numa abordagem estocástica para a solução do problema de otimização multiobjetivo com BFT em SAA.

O EPANET otimiza a localização das VRPs, que podem ser substituídas por BFTs (NOVARA et al., 2019; NOVARA; MCNABOLA, 2018). Nesse caso, a otimização prévia prevê a localização ideal de VRPs na rede. Se substituída por uma BFT, pode ser considerada a posição ideal para a operação controlando a pressão e, inclusive, para a máxima recuperação de energia. No entanto, a implementação de BFTs em larga escala ainda é um desafio, pois os fabricantes não disponibilizam as curvas características no modo turbina e a literatura ainda apresenta incerteza quanto à metodologia mais adequada para determinar o desempenho em toda a faixa operacional (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021). É importante ressaltar que o estudo das BFTs em RDAs deve priorizar o controle efetivo da pressão, uma vez que está substituindo a VRP. A geração de energia renovável é considerada tecnologia extra.

Além disso, pesquisas recentes indicam o potencial de utilização das BFTs para reduzir GEE. Algieri et al. (2020) estudaram a possibilidade de aproveitamento energético em sistemas de irrigação no sul da Itália utilizando bombas como turbinas e constataram que os sistemas proporcionaram uma queda nas emissões de GEE superiores a 8.800 ton/ano se comparados à produção elétrica convencional. Balacco et al. (2020) analisaram a viabilidade técnica e econômica da substituição de VRPs por BFTs em duas RDAs italianas visando à eficiência energética; os autores estimaram,

considerando um fator de emissão de 400 g CO₂/kWh, a redução das emissões de CO₂ em 327.211 kg CO₂/ano e 20.732 kg CO₂/ano nas redes.

O objetivo desse trabalho é investigar o controle de pressão e recuperação de energia em sistema de abastecimento de água por meio de BFT combinando os dois métodos consolidados, Williams (1995) para seleção de BFT e Rossi et al. (2019) para avaliar as curvas características de BFT. A combinação dos métodos, além de selecionar a bomba adequada, deve prever o comportamento em modo turbina em condições fora de projeto. Os dados experimentais de Derakhshan e Nourbakhsh (2008) serão utilizados para validação da metodologia. Em seguida, um estudo de caso será realizado com o objetivo de investigar o controle de pressão e a recuperação de energia, aplicando a metodologia proposta em uma rede de distribuição de água real na cidade de Tucuruí, localizada no sudeste do Pará-Brasil. Por fim, por meio dos resultados de energia recuperada na RDA, uma análise da quantidade de energia produzida e de redução de emissão de CO₂ será realizada.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelo de predição de bombas como turbinas

Nesse estudo, a operação da BFT é analisada como uma VRP. Além disso, selecionar a máquina adequada é importante para a garantia do controle efetivo da pressão na RDA, segundo a legislação específica. E, como tecnologia extra, espera-se a máxima recuperação de energia renovável na rede. Dessa forma, a associação de dois métodos já consolidados na literatura científica para prever o comportamento das BFTs é proposta (GAIA, 2021). O primeiro modelo utilizado foi o de Sharma (1985), um método simples que pressupõe a eficiência da BFT sendo igual à da bomba. Este foi melhorado por Williams (1995), que analisou oito diferentes métodos que

utilizam dados da bomba no BEP para estimar o desempenho da BFT. A partir das correções, foram geradas equações para duas situações: velocidade da turbina igual à da bomba, Eq. 1 e 2, e velocidade de rotação do BFT diferente da rotação da bomba, Eq. 3 e 4; onde Q_t é a vazão no ponto de melhor eficiência da turbina, Q_{bep} é a vazão no ponto de melhor eficiência da bomba, η_{max} é a eficiência máxima da bomba, H_t é a altura da turbina no BEP, H_{bep} é a altura da bomba no BEP, N_t é a velocidade de funcionamento da turbina e N_p é a velocidade nominal da bomba.

$$Q_t = \frac{Q_{bep}}{\eta_{max}^{0.8}} \quad (1)$$

$$H_t = \frac{H_{bep}}{\eta_{max}^{1.2}} \quad (2)$$

$$Q_t = \frac{N_t}{N_p} \times \frac{Q_{bep}}{\eta_{max}^{0.8}} \quad (3)$$

$$H_t = \left(\frac{N_t}{N_p}\right)^2 \times \frac{H_{bep}}{\eta_{max}^{1.2}} \quad (4)$$

No segundo método, Rossi et al. (2019), também foi apresentado um modelo de previsão usado para avaliar as curvas características das bombas como turbinas, com atenção particular às condições operacionais fora de projeto. O modelo de previsão foi derivado da reformulação de dados experimentais da literatura mais relevantes das BFTs. A verificação da capacidade de previsão do modelo foi analisada em testes experimentais, nos modos direto e reverso, e confirmada em simulações numéricas para várias taxas de fluxo. As Eq. 5 a 9 o descrevem. Este foi escolhido pela facilidade de aplicação e boa capacidade de previsão; onde ϕ é o coeficiente de fluxo, ψ é o coeficiente de altura, η é a eficiência, N é a rotação em [rps], Q é a vazão em [m³/s], H é a altura em [m] e g é a aceleração da gravidade em [m/s²]. Embora os métodos simples que preveem o BEP de BFT sejam menos confiáveis (FECAROTTA; CARRAVE-

TTA; RAMOS, 2011), sua utilização em conjunto com métodos que predizem o comportamento BFT em toda faixa de operação é oportuna, pois o desempenho do modo turbina de uma bomba se inicia com a previsão do BEP, que é condição inicial e tem papel crucial na estimativa da curva BFT fora de projeto.

$$\frac{\psi}{\psi_{BEPT}} = 0.2394R^2 + 0.769R \quad (5)$$

$$\frac{\eta}{\eta_{BEPT}} = -1.9788R^6 + 9.0636R^5 - 13.148R^4 + 3.8527R^3 + 4.5614R^2 - 1.3769R \quad (6)$$

$$R = \frac{\phi}{\phi_{BEPT}} \quad (7)$$

$$\phi = \frac{Q}{(nD)^3} \quad (8)$$

$$\psi = \frac{gH}{(nD)^2} \quad (9)$$

2.2 Validação

O método proposto neste estudo foi validado com os resultados experimentais de BFT de Derakhshan e Nourbakhsh (2008). As curvas características dos BFT relatados pelos autores serviram de referência para comparação. Na validação, foram utilizadas máquinas com velocidades específicas e eficiências distintas. Esses parâmetros são úteis para definir o desempenho hidráulico de uma bomba centrífuga, e considerá-los pode ajudar a prever, de forma precisa, o desempenho de uma BFT (NAUTIYAL et al., 2011). As Figs. 1a e 1b mostram, respectivamente, as curvas adimensionais ψ - ϕ e η - ϕ , que representam a tendência do método proposto. É possível notar que as curvas obtidas com o método conjunto estão em concordância aceitável com os dados experimentais. Esse processo permite generalizar o estudo e prolongar sua aplicação para diversas máquinas, pois

reproduziu bem as linhas de tendências dos experimentos, independentemente do BEP da bomba

em modo turbina, velocidade específica e eficiência de cada bomba.

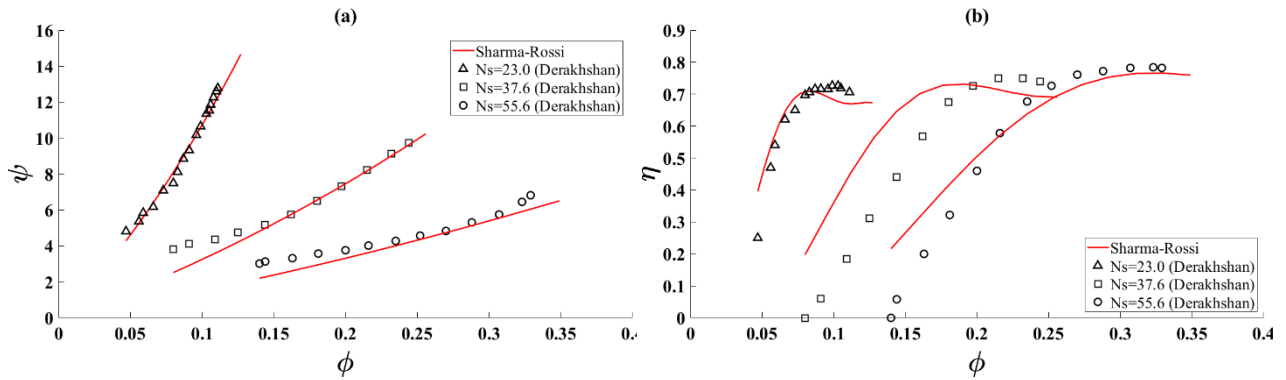


Figura 1 - Curvas de potência adimensionais da BFT medidas e estimadas (a) e curvas de eficiência da BFT medidas e estimadas (b).

2.3 Controle da pressão e recuperação de energia

A RDA foi simulada no software EPANET 2.0. Este é um programa de computador que permite a análise hidráulica de redes de dutos (ROSSMAN; OTHERS, 2000). O software otimiza e melhora uma rede com a vantagem do bom efeito de simulação e alta velocidade de operação (DUAN et al., 2019). O programa permite simular tubulações, nós, reservatórios, bombas e válvulas (SOLÓRZANO, 2017). Como já relatado, diversos estudos empregaram o EPANET para otimizar a pressão de distribuição em uma RDA (ALVISI, 2015; KARADIREK et al., 2012). Em muitos ca-

sos, as estratégias mais utilizadas dividem uma RDA maior em sub-redes menores, denominadas áreas de medições distritais (AMD), posicionando, estrategicamente, VRPs à montante dos distritos para o controle efetivo da pressão de abastecimento, conforme a Fig. 2. De fato, o ajuste e o posicionamento ideal das VRPs são tarefas fortemente conectadas, que devem considerar as demandas de água estacionárias ou as descargas variáveis de tempo requeridas nos Nós (NGUYEN et al., 2020). E com a otimização antecipada é possível estabelecer critérios técnicos capazes de auxiliar na implantação e gestão dos SAA (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021).

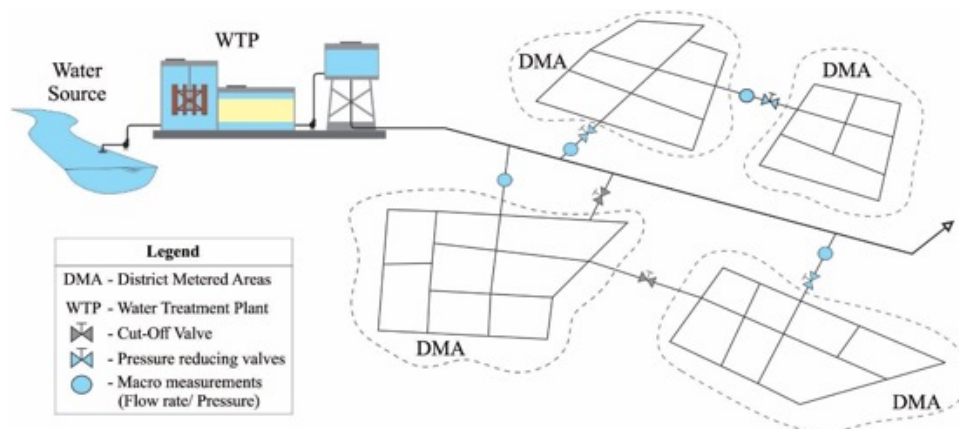


Figura 2 - Sistema de abastecimento de água dividido em (AMD) com VRPs a montante (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021).

Uma vez que a operação hidráulica em uma rede é otimizada pelo EPANET, é possível afirmar que a alocação da VRPs é considerada ideal para manter as pressões de abastecimento adequadas. Portanto, a substituição desses dispositivos por BFT também pode ser considerada ideal para a manutenção da pressão e, inclusive, a maior recuperação de energia nas AMDs (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021).

2.4 Redução de equivalente de Gases do Efeito Estufa (GEE)

Neste trabalho, para análise de redução de emissões de gases do efeito estufa será utilizado o método proposto por Lira et al. (2019). Estes propõem que as emissões de dióxido de carbono evitadas (ECO_2) são iguais à geração anual da fonte renovável (E) multiplicada pelo fator de emissão (F_e) da energia elétrica despachada no Sistema Interligado Nacional - SIN, conforme observado na Eq. 10. O fator de emissão F_e é fornecido e calculado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e tem como objetivo estimar a contribuição de um projeto de energia renovável que gere eletricidade para a rede em termos de redução de emissões de CO_2 . Em 2021, o fator de emissão médio foi de $0,5985 \text{ KgCO}_2/\text{kWh}$ (MCTI, 2021). Além disso, será estimada a quantidade de árvores equivalentes para capturar as emissões evitadas. Para isso, será utilizado

o modelo proposto por Lacerda et al. (2009), que relata que uma árvore é capaz de capturar $7,0 \text{ kg}$ de CO_2 equivalente ao ano ou $140,0 \text{ kg}$ de CO_2 equivalente em 20 anos, ou ainda $7,14$ árvores por tonelada (t) de CO_2 equivalente em 20 anos.

$$ECO_2 = E \times F_e \quad (10)$$

2.5 Estudo de caso

O estudo de caso analisou uma RDA real que abastece o bairro Cristo Vive do município de Tucuruí, ao norte do Brasil, região Amazônica. A rede opera por gravidade e beneficia uma área de, aproximadamente, $0,58 \text{ km}^2$, com variação topográfica de 75 m a 155 m . É composta por um reservatório elevado (RE), 144 trechos, 115 nós. O RE está localizado na cota 151 m e recebe água tratada de uma adutora e distribui aos usuários do sistema. A rede está sujeita a variações de consumo durante o dia, e apresenta sérias deficiências na gestão da pressão de distribuição, que varia de 20 m a $87,9 \text{ m}$, o que pode ser explicado pela topografia acentuada e a ausência de dispositivos de controle de pressão ao longo da rede. No Brasil, para o abastecimento de água são recomendados 10 mca para a pressão dinâmica mínima e 40 mca para a pressão estática máxima, com um limite de até 50 mca em regiões com extrema topografia (ABNT, 2017). A Fig. 3 mostra a variação horária do padrão de consumo da rede.

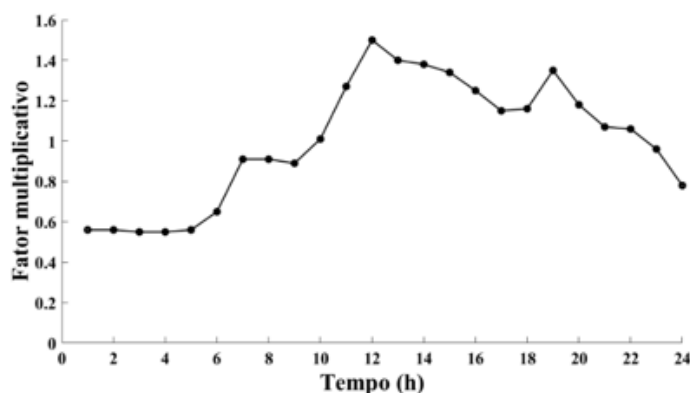


Figura 3 - Variação horária do padrão de consumo da rede.

Foram realizadas duas simulações (S1 e S2) na RDA, com o objetivo de adequar as pressões de trabalho à legislação brasileira, no caso, às

normas da ABNT, a partir de AMDs distintas. A Tabela 1 e a Fig. 4 apresentam um resumo das simulações.

Tabela 1 - Informações sobre a divisão de AMDs do estudo de caso.

Simulação	AMD	VRP	Vazão - Q (m ³ /s)	Pressão dissipada - H (m)	Variação da pressão nos Nós (m)
1	1.1	1.1.A	0,069	15,45	10 a 49,8
		1.2.A	0,155	3,05	
	1.2	1.2.B	0,016	19,13	
		1.2.C	0,036	15,12	
2	1.3	1.3.A	0,024	20,19	10 a 49
		2.1	2.1.A	0,026	
	2.2	2.2.A	0,026	24,45	
	2.3	2.3.A	0,013	23,70	
		2.3.B	0,024	19,61	

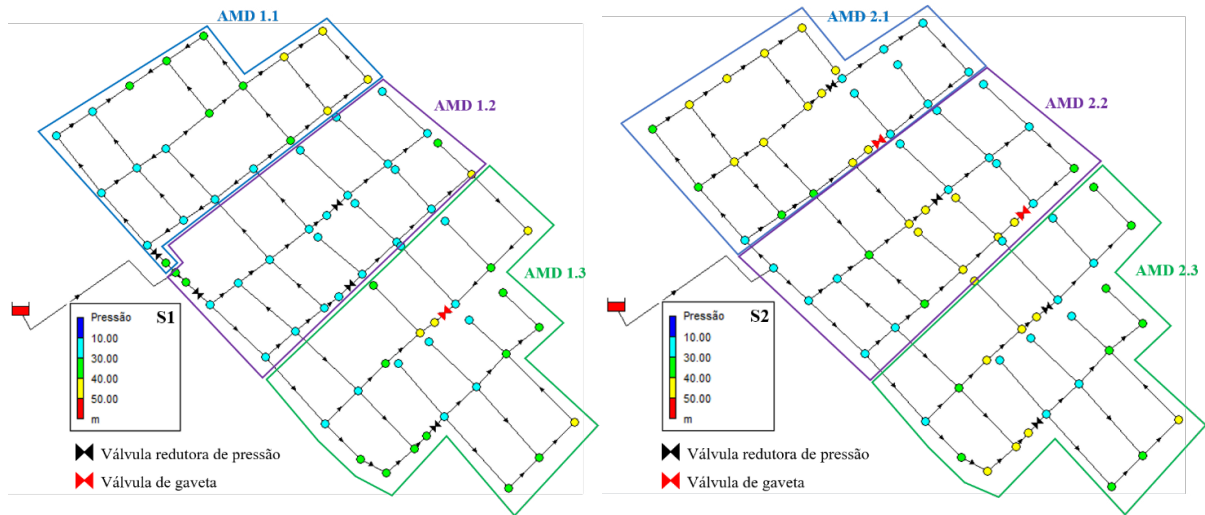


Figura 4 - Pressões nos Nós, divisão da rede em AMD e o posicionamento das VRP nas S1 e S2.

Em seguida, foram investigadas as configurações para as simulações (S₁ e S₂), onde as VRPs seriam substituídas por BFT, com velocidade de rotação constante e independente entre si, com um by-pass para a operação de uma PRV em paralelo em situações de redução drástica de consumo (Fig. 5), por exemplo, no período da madrugada. A VRP garante a pressão de abastecimento adequada ao logo do dia caso a BFT necessite de alguma manutenção. A partir disso, foi avaliado qual das simulações apresenta a melhor localização de BFT para o maior controle da pressão de abastecimento e a máxima recuperação de energia potencial da rede.

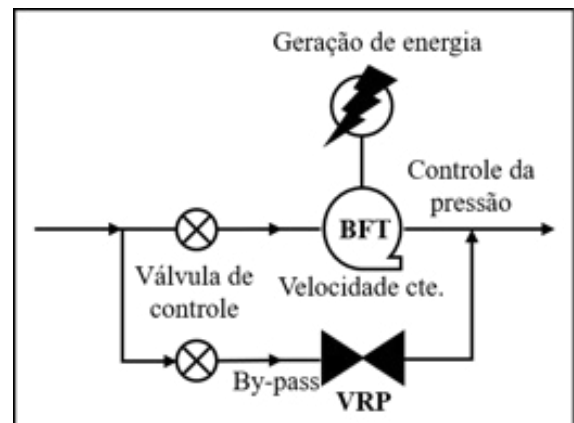


Figura 5 - Cenário proposto.

Nem sempre é financeiramente vantajoso substituir uma válvula por uma BFT, pois a pouca energia dissipada por uma VRP leva à seleção de uma máquina insuficiente para superar a pressão e a vazão ocorrentes em certa hora do dia, prejudicando a função de controle da pressão, aumentando as perdas de água por vazamentos e a recuperação de energia pela BFT (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021). Portanto, o método será aplicado somente no AMD 3 para ambas as simulações. Em S1 será substituída a VRP 1.3.A, enquanto em S2 serão a VRP 2.3.A e a VRP 2.3.B. É válido ressaltar que será analisada, em primeiro lugar, a comparação do posicionamento ideal

das BFTs em substituição às VRPs, e se essa configuração mantém as pressões de abastecimento segundo a legislação. Como tecnologia extra, será analisada a energia renovável recuperada na RDA.

3 RESULTADOS

Os modelos de bombas selecionados pelo método de Williams (1995) foram ITAP 80-260 (BOMBA 1.3.A), BMI 100-330 (BOMBA 2.3.A) e INI 50-125 (BOMBA 2.3.B). As características dessas máquinas no modo direto e reverso no BEP são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características operacionais no BEP das máquinas selecionadas.

Características	Bomba			Turbina		
	BOMBA 1.3.A	BOMBA 2.3.A	BOMBA 2.3.B	BFT 1.3.A	BFT 2.3.A	BFT 2.3.B
Q [m³/s]	0,020	0,050	0,020	0,0275	0,0674	0,0274
H [m]	14,65	21,76	18,41	22,94	33,37	28,63
Eficiência [-]	0,79	0,80	0,79	0,79	0,80	0,79
Velocidade de rotação [rpm]	1730	1770	3500	1730	1770	3500
Diâmetro do impulsor [m]	0,260	0,330	0,142	0,260	0,330	0,142

Fonte: (IMBIL, 2022a, 2022b).

3.1 Simulação 1

A Fig. 6 mostra, respectivamente, as curvas H-Q (a) e η t-Q (b), construídas por meio do método de Rossi et al. (2019), para a BFT 1.3.A operando fora

de projeto, ou seja, prevendo a curva a partir dos valores de vazão, altura manométrica e eficiência da BFT distante do seu BEP.

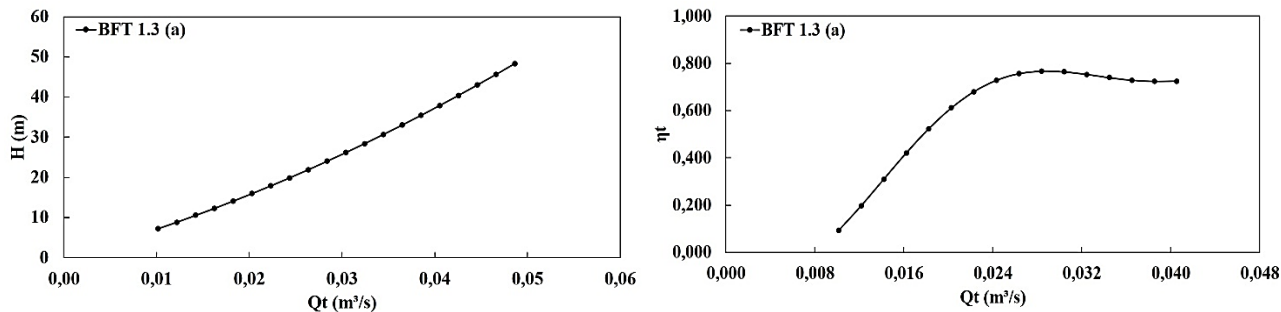


Figura 6 - Curva H(m)-Q(m³/s) (a) e Curva η t-Q(m³/s) (b) - Simulação 1.

Já a Fig. 7 apresenta as curvas de pressão para o Nó 110, mais crítico, durante 24 h de operação para três casos: rede sem controle, com VRP e com BFT. Fica claro que o desempenho da BFT se aproxima ao da VRP quando o consumo da rede é alto, das 5-23 h. No período de 23:01-5 h, a eficiência da bomba reduz e o controle da pressão é prejudicado; dessa forma, o desempenho da BFT se afasta da VRP. Isso ocorre porque as máquinas não conseguem absorver a redução das taxas de fluxo e a elevação da pressão na RDA adequadamente no período da madrugada, por operar em velocidade de rotação constante. Esse comportamento é observado nos trabalhos de Ebrahimi et al. (2021) e Jafari et al. (2015), que também utilizaram BFTs com velocidade constante durante o dia em uma RDA e durante

o período da madrugada. Nos estudos, os autores observaram um aumento indesejado na pressão dos Nós. Observa-se que na simulação 1 optou-se pela operação da BFTs no período de 5-23h. Devido à queda de rendimento de 24-4h, apenas a VRP 1.3.A continuou em operação.

Embora as BFTs se afastem das VRPs em algumas horas do dia, as pressões no Nó desfavorável acompanharam as recomendações estabelecidas na norma da ABNT (2017). A pressão no Nó 110 variou de 16,9 a 27,81 m. Em média, a redução da pressão provocada pela BFT no Nó foi de 42,80%, respectivamente, se comparada com a rede sem controle. Isso contribuiu para a manutenção da pressão de abastecimento adequada nos AMDs, além de reduzir o volume de vazamentos nos tubos.

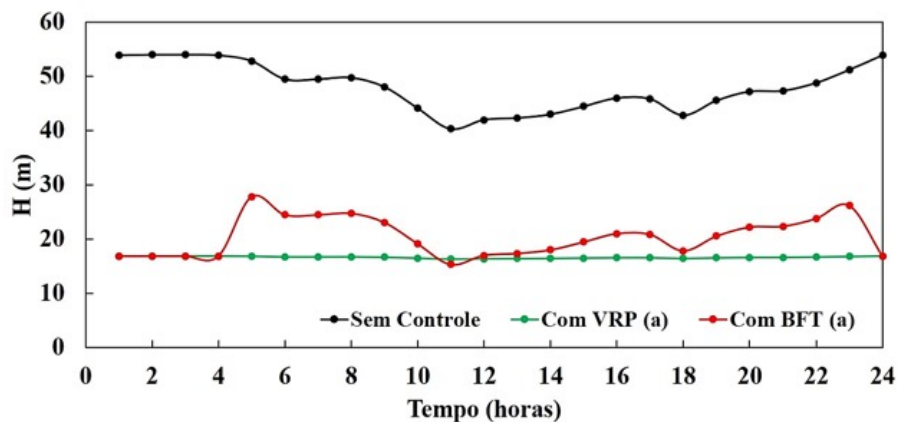


Figura 7 - Curva de pressão para o Nó 110, Simulação 1.

A Fig. 8 mostra a potência de saída da BFT 1.3.A em 24h. Os resultados da simulação mostram que a potência de saída das BFTs entre 23-5 h é próxima de zero, e isso é justificado pela operação da VRP no período. Em 18 h de operação, a potência de saída da BFT 1.3.A variou de 2,27 kW a 3,19 kW e a energia recuperada foi de 52 kWh/dia ou 18,98 MWh/ano, respectivamente. Para comparação, a energia recuperada apenas com uma BFT consegue abastecer, aproximadamente, oito residên-

cias/mês enquadradas na categoria baixa renda (consumo de até 220 kWh/mês) pela companhia elétrica do Pará (EQUATORIAL ENERGIA, 2022). A energia recuperada na simulação 1 é equivalente a 11,35 toneladas de CO₂ evitados por ano, sendo necessárias 81 árvores para absorver essa quantidade de carbono da atmosfera ao longo de 20 anos. Esses valores significativos estão de acordo com os estudos desenvolvidos por Ebrahimi et al. (2021), Lacerda et al. (2009) e Lira et al. (2019).

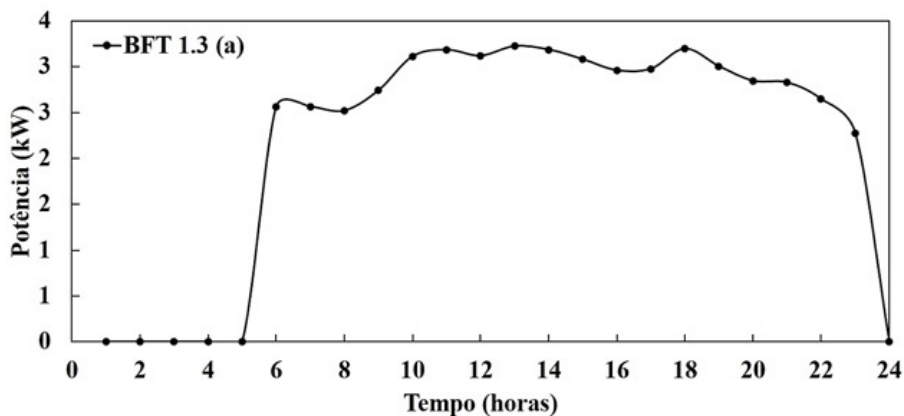


Figura 8 - Potência de saída da BFT 1.3.A, Simulação 1.

3.2 Simulação 2

Na Simulação 2, o objetivo foi investigar o desempenho do sistema com duas BFTs. A Fig. 9

mostra as curvas H-Q (a) e η_t -Q (b) para a BFT 2.3.A e BFT 2.3.B operando fora de projeto.

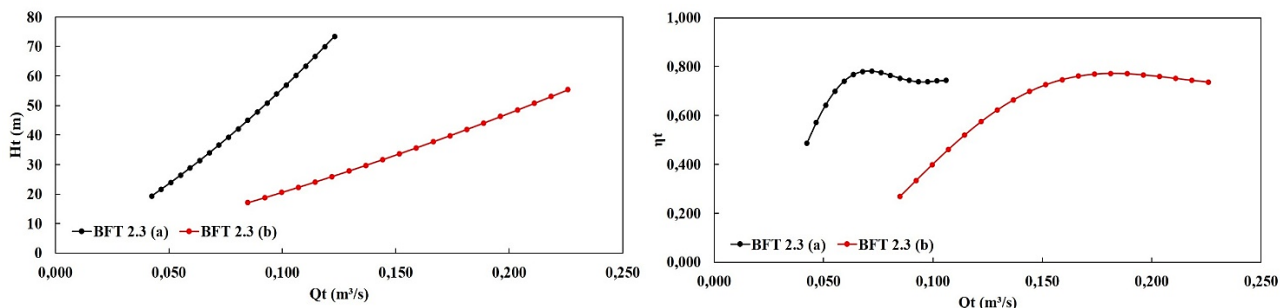


Figura 9 - Curva H(m)-Q(m³/s) (a) e Curva η_t -Q(m³/s) (b) – Simulação 2.

A Fig. 10 apresenta as curvas de pressão para o Nó 110 durante 24 h de operação para três casos: rede sem controle, com VRP e com BFT. Diferentemente da simulação 1, duas VRPs foram inseridas e posteriormente substituídas por BFTs onde a variação de pressão foi 17,34 a 28,25 m, representando uma redução de 45,21% se comparada com a rede sem controle. Observa-se o mesmo comportamento ocorrido na simulação 1 nos horários de 24-5h, um aumento indesejado de pressão e a redução das taxas de fluxos diminuindo a eficiência das BFTs para geração energia elétrica e controle de pressão.

Na simulação 2, a pressão no Nó 110 também acompanhou a legislação ABNT (2017). Além disso, houve um ganho na recuperação de energia, o que já era esperado. A Fig. 11 mostra a potência de saída de cada BFT, bem como a potência total das máquinas. A potência da BFT 2.3.A variou de 7,18 kW a 9,13 kW e recuperou 155 kWh/dia, enquanto a BFT 2.3.B variou de 1,23 kW a 2,41 kW e recuperou 35,71 kWh/dia. As duas máquinas conseguiram recuperar 190,93 kWh/dia ou 5.728,8 kWh/mês. Essa geração representa um aumento de 267% se comparado à simulação 1. A energia total gerada pode alimentar até 26 residências/

mês enquadradas na categoria baixa renda (consumo de até 220 kWh/mês) e representa uma redução de 41,71 toneladas equivalente de CO₂ não

emitidos por ano. Para absorver essa quantidade de CO₂ da atmosfera são necessárias 298 árvores ao longo de 20 anos.

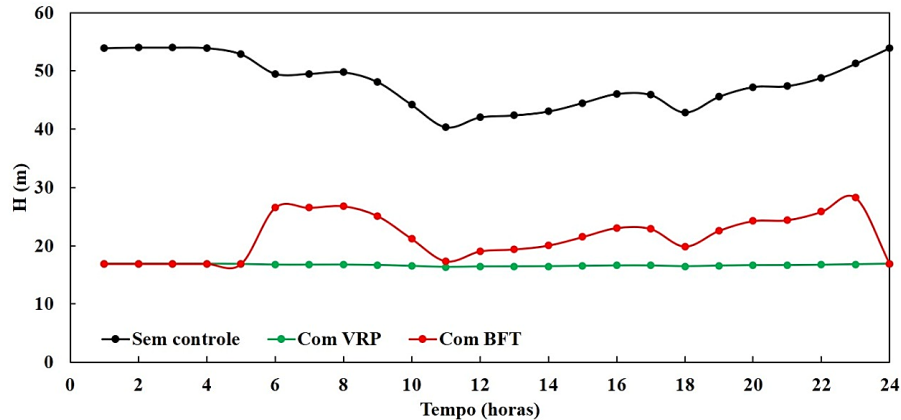


Figura 10 - Curvas de pressão para o Nó 110, na simulação 2.

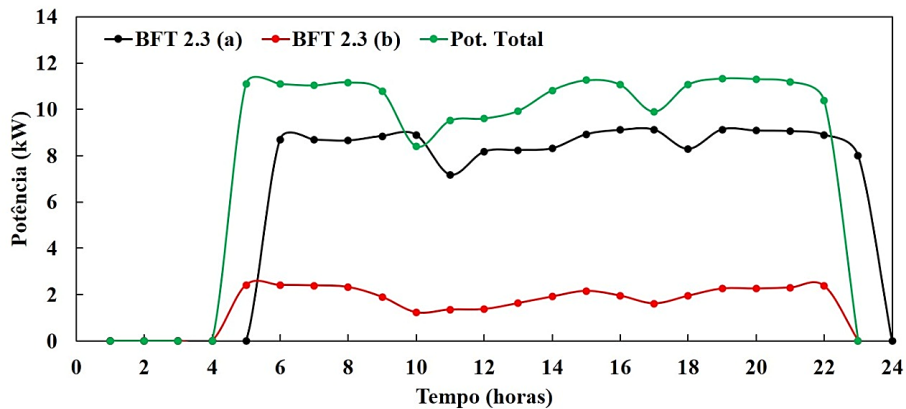


Figura 11 - Potência de saída da BFT 2.3.A, BFT 2.3.B e potência total, simulação 2.

Observa-se que a simulação 2 apresentou melhores resultados para o controle de pressão dentro da AMD 3, o que a torna a configuração mais indicada para otimizar a RDA. A energia recuperada pelas BFTs não deve ser fator determinante para a substituição de VRPs, pois o melhor posicionamento desses dispositivos para o controle de pressão em uma rede é prioridade.

4 CONCLUSÃO

Neste artigo, a combinação dos métodos proposta para selecionar e prever o comportamento de BFTs em toda a faixa de operação apresentou bons resultados, obtendo uma solução viável, com baixo esforço, sem a necessidade programação robusta e hidraulicamente melhorando o controle da pressão e a recuperação de ener-

gia. De acordo com os resultados das simulações, quando o consumo da rede foi alto, as BFTs se aproximaram da VRP e obtiveram um bom controle de pressão, assim como maior recuperação. Nos momentos em que o consumo da rede era baixo, a VRP em paralelo operava para manter a pressão de trabalho na rede.

Ressalta-se que na simulação 2 houve um ganho significativo na recuperação de energia. Os resultados mostraram que duas BFTs funcionando simultaneamente (S_2) recuperaram 267% de energia a mais do que a (S_1), mas o desempenho do sistema em termos de controle de pressão não foi significativamente melhorado, principalmente nas horas de início e fim do dia. A fim de manter a pressão da rede na faixa padrão em todas as horas do dia, a combinação de BFT e VRP pode ser implementada para ajustar a pressão além de gerar energia. Dessa forma, as BFTs funcionam apenas por horas, quando podem ajustar a pressão padrão necessária e, no restante, a VRP regula a pressão. Neste caso, além de controlar a pressão continuamente, energia renovável significativa pode ser recuperada da RDA. Trabalhos futuros podem incluir a implementação de BFTs com velocidade variável em uma RDA real para investigar a recuperação de energia e o controle de pressão nas primeiras e últimas horas do dia.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 12218/2017: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público.**

ALGIERI, Angelo et al. Potential energy exploitation in collective irrigation systems using pumps as turbines: A case study in Calabria (Southern Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120538, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120538>

ALVISI, S. A new procedure for optimal design of district metered areas based on the multilevel balancing and refinement algo-

thm. **Water resources management**, v. 29, p. 4397-4409, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1066-z>

BALACCO, Gabriella et al. Pump as Turbine for the Energy Recovery in a Water Distribution Network: Two Italian (Apulian) Case Studies. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 1, 2020. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2020002001>

CARRAVETTA, Armando et al. Energy saving in a water supply network by coupling a pump and a pump as turbine (PAT) in a turbopump. **Water**, v. 9, n. 1, p. 62, 2017. <https://doi.org/10.3390/w9010062>

CHACÓN, Miguel Crespo et al. Hydropower energy recovery in irrigation networks: Validation of a methodology for flow prediction and pump as turbine selection. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1728-1738, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.119>

DERAKHSHAN, Shahram; NOURBAKHS, Ahmad. Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. **Experimental thermal and fluid science**, v. 32, n. 3, p. 800-807, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.10.004>

DUAN, Xiaolong et al. Research of hydraulic reliability of water supply network based on the simulation of EPANET. In: **IOP Conference series: earth and environmental science**. IOP Publishing, 2019. p. 012042. <https://10.1088/1755-1315/349/1/012042>

EBRAHIMI, S.; RIASI, A.; KANDI, A. Selection optimization of variable speed pump as turbine (PAT) for energy recovery and pressure management. **Energy Conversion and Management**, v. 227, n. July 2020, p. 113586, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113586>

E SOUZA, Davi Edson Sales; MESQUITA, André Luiz Amarante; BLANCO, Claudio José Cavalcante. Pressure Regulation in a Water Distribution Network Using Pumps as Turbines at Variable Speed for Energy Recovery. **Water Resources Management**, p. 1-24, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03421-9>

EQUATORIAL ENERGIA. **Tarifa Social para consumidores baixa renda**. Disponível em: <<https://pa.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/#residencial-baixa-renda>>.

FECAROTTA, O.; MCNABOLA, A. Optimal Location of Pump as Turbines (PATs) in Water Distribution Networks to Recover Energy and Reduce Leakage. **Water Resources Management**, v. 31, n.15, p. 5043-5059, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1795-2>

FECAROTTA, O.; MCNABOLA, A. Optimal Location of Pump as Turbines (PATs) in Water Distribution Networks to Recover Energy and Reduce Leakage. **Water Resources Management**, v. 31, n. 15, p. 5043-5059, 2017.

FERNÁNDEZ GARCÍA, I.; MC NABOLA, A. Maximizing Hydropower Generation in Gravity Water Distribution Networks: Determining

- the Optimal Location and Number of Pumps as Turbines. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 1, p. 04019066, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001152](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001152)
- GAIA, J. G. **Predição de bombas funcionando como turbinas em toda a faixa de operação – estudo de caso de uma rede de distribuição de água**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2021.
- IMBIL, SOLUÇÃO EM BOMBEAMENTO. **Linha Esmaltada. Catálogo INI (em português)**, 2022a.
- IMBIL, SOLUÇÃO EM BOMBEAMENTO. **Linha Esmaltada. Catálogo BMI (em português)**, 2022b.
- JAFARI, R.; KHANJANI, M. J.; ESMAELIAN, H. R. Pressure management and electric power production using pumps as turbines. **Journal - American Water Works Association**, v. 107, n. 7, p. E351–E363, 2015. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2015.107.0083>
- KARADIREK, I. E. et al. Implementation of Hydraulic Modelling for Water-Loss Reduction Through Pressure Management. **Water Resources Management**, v. 26, n. 9, p. 2555–2568, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0032-2>
- LACERDA, J. S. DE et al. Estimativa da Biomassa e Carbono em Áreas Restauradas com Plantio de Essências Nativas. **Metrum**, n. 5, p. 1–23, 2009.
- LIMA, G. M. et al. Leakage Control and Energy Recovery Using Variable Speed Pumps as Turbines. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 1, p. 04017077, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000852](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000852)
- LIRA, M. A. T. et al. Contribution of photovoltaic systems connected to the electrical network for reducing CO₂ in the state of Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p. 389–397, 2019.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, T. E. I. **Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>.
- NAUTIYAL, H. et al. Experimental investigation of centrifugal pump working as turbine for small hydropower systems. **Energy Science and technology**, v. 1, n. 1, p. 79–86, 2011.
- NGUYEN, K. D. et al. A MINLP model for optimal localization of pumps as turbines in water distribution systems considering power generation constraints. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12071979>
- NOVARA, D. et al. Cost Model for Pumps as Turbines in Run-of-River and In-Pipe Microhydropower Applications. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 5, p. 04019012, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001063](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001063)
- NOVARA, D.; MCNABOLA, A. A model for the extrapolation of the characteristic curves of Pumps as Turbines from a datum Best Efficiency Point. **Energy Conversion and Management**, v. 174, n. July, p. 1–7, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.091>
- POLÁK, M. **The Influence of Changing Hydropower Potential on engines**, 2019.
- ROSSI, M.; NIGRO, A.; RENZI, M. Experimental and numerical assessment of a methodology for performance prediction of Pumps-as-Turbines (PaTs) operating in off-design conditions. **Applied Energy**, v. 248, n. May, p. 555–566, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.123>
- ROSSMAN, L. A.; OTHERS. **EPANET 2 users manual**. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OHEPA/600, , 2000.
- SAMBITO, M.; PIAZZA, S.; FRENI, G. Stochastic approach for optimal positioning of pumps as turbines (Pats). **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 21, p. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132112318>
- SOLÓRZANO, J. S. D. P. **Ejercicios básicos de mecánica de fluidos e hidráulica aplicados a través del software de distribución gratuita EPANET 2.0**. [s.l: s.n.].
- SOUZA, D. E. S. E.; MESQUITA, A. L. A.; BLANCO, C. J. C. Pump-as-turbine for energy recovery in municipal water supply networks. A review. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 11, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03213-z>
- WILLIAMS, A. A. 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**, v. 208, n. 1, p. 59–66, 1995. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1994_208_009