



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

INGRID LUNA BAIA VIANA

JAMILE CAROLINE MOREIRA BATISTA

**BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA PARA REGULAÇÃO DA PRESSÃO E
A RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

TUCURUÍ
2022

INGRID LUNA BAIA VIANA

JAMILE CAROLINE MOREIRA BATISTA

**BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA PARA REGULAÇÃO DA PRESSÃO E
A RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Davi Edson Sales e Souza.

Coorientador: Prof. Dr. Raynner Menezes Lopes.

TUCURUÍ
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V614b Viana, Ingrid Luna Baia.
BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA PARA
REGULAÇÃO DA PRESSÃO E A RECUPERAÇÃO DE
ENERGIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA / Ingrid
Luna Baia Viana, Jamile Caroline Moreira Batista . — 2022.
30 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Davi Edson Sales E Souza
Coorientador(a): Prof. Dr. Raynner Menezes Lopes
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Sanitária e Ambiental, Tucuruí, 2022.

1. Setorização de RDAs. 2. Operação BFT off-design. 3.
Controle da pressão. 4. Recuperação de energia. 5.
Sustentabilidade. I. Título.

CDD 620

INGRID LUNA BAIA VIANA

JAMILE CAROLINE MOREIRA BATISTA

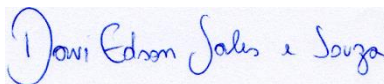
**BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA PARA REGULAÇÃO DA PRESSÃO E
A RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

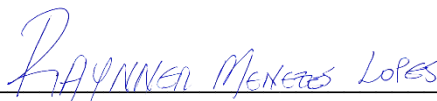
Data da aprovação: 16/12/2022

Conceito: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Davi Edson Sales e Souza
UFPA – CAMTUC (Orientador)



Prof. Dr. Raynner Menezes Lopes
UFPA – CAMTUC (Coorientador)



Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa
UFPA – CAMTUC (Examinador interno)



Prof. Me. Jorge Fernando Hungria Ferreira
UFPA (Examinador externo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço as forças que regem o universo, me sustentam e fizeram possível que chegasse até aqui: Deus e minha família, alicerces do meu ser.

Aos amigos que me acompanham, e aos que se foram. Á cada um que ajudou para o desenvolvimento deste projeto, e todo o percurso da graduação, especialmente, ao companheirismo do trio de Órion.

Ao excelente corpo docente da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará, principalmente, ao nosso orientador que viu possibilidade científica onde se poderia enxergar utopia; agradeço por sua didática singular, paciência e profissionalismo durante o curso.

Agradeço àquela que em vida me chamou de “copinho de leite”; àquela que é meu lar; àquela que me ampara; àquelas que me chamam de filha; àquele que está comigo “na saúde e na doença”.

Obrigada!

Ingrid Luna Baia Viana

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que, com seu infinito amor, me proporcionou forças e sabedoria para concluir mais essa etapa da vida. Agradeço à minha amada família, em especial ao meu saudoso pai, João dos Santos Batista, à minha mãe, Maria Benedita, que com amor e sabedoria sempre me apoiou e nunca me deixou desistir. Nos momentos de angústia, as suas orações me faziam permanecer em paz, sua presença foi sinônimo de fortaleza, chão e segurança.

À minha irmã, Cíntia Maria, que com vasta generosidade sempre cuidou de mim e me incentivou a seguir meus sonhos. Deus certamente foi muito misericordioso comigo ao me permitir ser sua irmã. Agradeço ao meu namorado e parceiro, Lucas Wanzeler, que ao longo desses anos me incentivou e apoiou, seu suporte foi essencial para a conclusão desta etapa.

À Universidade Federal do Pará e ao corpo docente do Campus Universitário de Tucuruí pelo apoio e conhecimentos repassados ao longo da minha formação acadêmica e ao meu orientador, Prof. Dr. Davi Sales, pela oportunidade concedida de, com paciência e dedicação, me orientar neste trabalho e por todo o aprendizado repassado.

À minha dupla de pesquisa, o seu apoio e esforço foram fundamentais. Agradeço, em especial, às nossas colegas de turma, que se tornaram amigas, Juliana Melo e Denize Castro, tenho profunda admiração pelas pessoas e profissionais que são. A amizade de vocês foi fundamental para a conclusão dessa jornada. Finalmente, agradeço aos meus colegas de sala, pelos aprendizados e por todo o apoio e amadurecimento compartilhado ao longo desses cinco anos de graduação.

Jamile Caroline Moreira Batista

“A ciência descobriu não só que o universo tem uma grandeza vertiginosa e extática, não só que ele é acessível à compreensão humana, mas também que somos, num sentido muito real e de grande alcance, parte desse cosmos, nascidos dele, nosso destino está profundamente conectado ao dele” (SAGAN, 1980, p. 21-3).

RESUMO

As redes de distribuição de água (RDAs) possuem energia de pressão que é dissipada com a utilização de válvulas redutoras de pressão (VRPs). Essa energia poder ser recuperada por bombas funcionando como turbinas (BFTs) que possuem baixo custo e alta disponibilidade no mercado. A seleção da bomba adequada deve levar em consideração o seu melhor ponto de eficiência (MPE), e sua operação off-design (para toda a faixa operacional). Neste artigo, uma combinação de métodos (MPE + off-design) foi validada e aplicada para selecionar a bomba adequada para operar em uma RDA real. A substituição de duas VRPs por BFTs operando em velocidade constante foi investigada. A BFT1 foi tecnicamente melhor que BFT2, que apresentou pressão de saída negativa, prejudicando a pressão dos Nós da RDA. A melhor bomba recuperou 4,331 kWh/ano, o equivalente a redução de 1,732,400 gCO₂/ano (um carro ou três motocicletas), sendo capaz de atender, aproximadamente, duas casas categorizadas como baixa renda. A utilização de BFT se mostra uma alternativa viável, uma vez que é capaz de recuperar energia considerável. Contudo, para que a sua operação seja capaz de controlar adequadamente a pressão em uma RDA, deve-se buscar outras estratégias de operação, como a operação em velocidade variável.

Palavras-chave: Setorização de RDAs, operação BFT *off-design*, controle da pressão, recuperação de energia, sustentabilidade.

ABSTRACT

Water distribution networks (RDAs) have pressure energy that is dissipated using pressure reducing valves (PRVs). This energy can be recovered by pumps working as turbines (BFTs) that have low cost and high availability in the market. The selection of the appropriate pump must take into account its best efficiency point (MPE), and its off-design operation (for the entire operating range). In this article, a combination of methods (MPE + off-design) was validated and applied to select the proper pump to operate in a real RDA. The replacement of two VRPs by BFTs operating at constant speed was investigated. BFT1 was technically better than BFT2, which presented negative output pressure, impairing the pressure of the RDA Nodes. The best pump recovered 4,331 kWh/year, equivalent to a reduction of 1,732,400 gCO₂/year (one car or three motorcycles), being able to serve approximately two houses categorized as low income. The use of BFT is a viable alternative, since it is capable of recovering considerable energy. However, for your operation to be able to adequately control the pressure in an RDA, other operating strategies must be sought, such as variable speed operation.

Keywords: WDN sectorization, PAT off-design operation, pressure control, energy recovery, sustainability.

SUMÁRIO

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
2 JUSTIFICATIVA	11
3 OBJETIVOS	12
3.1 OBJETIVO GERAL	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
4 RESULTADOS.....	13
BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA E SUA APLICAÇÃO PARA REGULAÇÃO DA PRESSÃO E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	14
ANEXO A – REVISTA PARA SUBMISSÃO: AIDIS DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AMBIENTALES: INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y PRÁCTICA	30

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O acesso à energia limpa e consistente é um desafio importante enfrentado por vários países em todo o mundo (ADU et al., 2020). Fontes de energia renováveis podem ser usadas como uma resposta à grande demanda de energia no setor de água e esgoto, diminuindo o consumo de combustíveis fósseis e, portanto, reduzindo as emissões de carbono (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2018).

Diante disso, o aproveitamento da energia de pressão incorporada nas redes de abastecimento de água (RDAs) vem sendo estudado por diversos autores (ROSSI et al., 2019; SPEDALETTI et al., 2021). Isso porque, comumente as RDAs, para regular a pressão, utilizam válvulas redutoras de pressão (VRPs) que podem ser substituídas por bombas funcionando como turbinas (BFTs) (PARRA e KRAUSE, 2017; STEFANIZZI et al., 2020).

A utilização de BFTs é capaz de gerar energia renovável. Contudo, um desafio a ser superado é o controle da pressão na rede, pois a BFT deve ser capaz de operar como se fosse a própria VRP, que é o primeiro objetivo em uma RDA, e de quebra, recuperar a energia de pressão que seria desperdiçada pela válvula (EBRAHIMI et al., 2021).

2 JUSTIFICATIVA

Como já observado, as BFTs constituem um maquinário que pode recuperar a energia desperdiçada pelas válvulas. Como estratégia dos gestores de água, as VRPs são dispositivos utilizados em demasia nas RDAs, a partir de um planejamento superficial da distribuição, com o objetivo de manter o comportamento da pressão regulado, beneficiando economicamente as concessionárias. No entanto, as perdas de água na distribuição a nível de Brasil são 40,1% (SNIS, 2021). Essa tática, portanto, não está surtindo efeito e muita água continua sendo desperdiçada, assim como a energia de pressão que é perdida na válvula.

Além disso, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021), há no Brasil 728 mil quilômetros de RDAs nos 5.350 municípios participantes da amostra. Nesse contexto, o emprego de BFTs em substituição às VRPs pode ser convidativo para as empresas de água adotarem essa tecnologia em suas redes, a partir de um planejamento profissional. Por exemplo, essas máquinas podem controlar a pressão na rede e recuperar energia que pode ser utilizada para alimentar o próprio sistema ou ser vendida para a concessionária de energia local. Para isso, este trabalho apresenta uma metodologia que inicia com a divisão de uma rede em setores de distribuição de água, com válvulas estrategicamente distribuídas, as quais podem ser substituídas por BFTs operando em velocidade constante. Para

a seleção adequada das máquinas, é apresentado a associação de dois métodos que prioriza a operação da BFT ligada a variação de consumo na rede, a qual é validada. Uma rede municipal, onde o controle da pressão é negligenciado, é utilizada como estudo de caso. O controle da pressão, a geração de energia e as vantagens ambientais das BFTs também são analisados.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Selecionar bombas funcionando como turbinas (BFTs) em velocidade constante, considerando toda a faixa de operação, para substituir válvulas redutoras de pressão (VRPs) em redes de distribuição de água (RDAs), para o controle efetivo da pressão e recuperar energia desperdiçada por essas válvulas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar um método associado de seleção de BFTs que considera o melhor ponto de eficiência (MPE) e toda faixa de operação no sistema;
- Setorizar uma RDA utilizando *Software* EPANET 2.0 para localização das VRPs e regulação da pressão nos tubos;
- Substituir VRPs por BFTs operando em velocidade constante;
- Analisar o controle da pressão e a recuperação de energia pelas BFTs;
- Analisar as vantagens ambientais de utilização da tecnologia BFT em RDAs.

4 RESULTADOS

BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA E SUA APLICAÇÃO PARA REGULAÇÃO DA PRESSÃO E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

PUMPS AS TURBINE AND THEIR APPLICATION FOR PRESSURE REGULATION AND ENERGY RECOVERY IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS

Ingrid Luna Baia Viana¹

Jamile Caroline Moreira Batista¹

Raynner Menezes Lopes¹

*Davi Edson Sales e Souza¹

Abstract

Water distribution networks (RDAs) have pressure energy that is dissipated using pressure reducing valves (PRVs). This energy can be recovered by pumps working as turbines (BFTs) that have low cost and high availability in the market. The selection of the appropriate pump must take into account its best efficiency point (MPE), and its off-design operation (for the entire operating range). In this article, a combination of methods (MPE + off-design) was validated and applied to select the proper pump to operate in a real RDA. The replacement of two VRPs by BFTs operating at constant speed was investigated. BFT1 was technically better than BFT2, which presented negative output pressure, impairing the pressure of the RDA Nodes. The best pump recovered 4,331 kWh/year, equivalent to a reduction of 1,732,400 gCO₂/year (one car or three motorcycles), being able to serve approximately two houses categorized as low income. The use of BFT is a viable alternative, since it is capable of recovering considerable energy. However, for your operation to be able to adequately control the pressure in an RDA, other operating strategies must be sought, such as variable speed operation.

Keywords: WDN sectorization, PAT off-design operation, pressure control, energy recovery, sustainability.

¹ Universidade Federal do Pará, Brasil.

* *Autor correspondente:* Grupo Amazônico de Pesquisa em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos (SARH), Universidade Federal do Pará (UFPA), Tucuruí-PA. E-mail: davisales@ufpa.br

Resumo

As redes de distribuição de água (RDAs) possuem energia de pressão que é dissipada com a utilização de válvulas redutoras de pressão (VRPs). Essa energia poder ser recuperada por bombas funcionando como turbinas (BFTs) que possuem baixo custo e alta disponibilidade no mercado. A seleção da bomba adequada deve levar em consideração o seu melhor ponto de eficiência (MPE), e sua operação off-design (para toda a faixa operacional). Neste artigo, uma combinação de métodos (MPE + off-design) foi validada e aplicada para selecionar a bomba adequada para operar em uma RDA real. A substituição de duas VRPs por BFTs operando em velocidade constante foi investigada. A BFT1 foi tecnicamente melhor que BFT2, que apresentou pressão de saída negativa, prejudicando a pressão dos Nós da RDA. A melhor bomba recuperou 4,331 kWh/ano, o equivalente a redução de 1,732,400 gCO₂/ano (um carro ou três motocicletas), sendo capaz de atender, aproximadamente, duas casas categorizadas como baixa renda. A utilização de BFT se mostra uma alternativa viável, uma vez que é capaz de recuperar energia considerável. Contudo, para que a sua operação seja capaz de controlar adequadamente a pressão em uma RDA, deve-se buscar outras estratégias de operação, como a operação em velocidade variável.

Palavras-chave: setorização de RDAs, operação BFT *off-design*, controle da pressão, recuperação de energia, sustentabilidade.

Introdução

Nos últimos anos, as discussões globais acerca da sustentabilidade e novas fontes de energias renováveis acessíveis se intensificaram (Bhattacharya *et al.*, 2016). Nesse contexto, os sistemas de abastecimento de água (SAA) tem recebido atenção especial pelo seu potencial energético recuperável. O transporte de água aos usuários finais da rede de distribuição de água (RDA) demanda alta energia de pressão embutida em seus tubos e muitas vezes essa pressão é mais que o suficiente (Spedaletti *et al.*, 2021).

Por essa razão, as autoridades de gestão da água frequentemente segmentam as RDAs em áreas de medição distrital (AMDs), inserindo válvulas de redução de pressão (VRPs), que permitem reduzir uma pressão variável de montante a uma determinada pressão constante a jusante (Covelli *et al.*, 2016). Na verdade, as VRPs reduzem a pressão da rede e, portanto, os vazamentos, mas ao mesmo tempo desperdiçam uma energia hidráulica potencialmente recuperável (Stefanizzi *et al.*, 2020).

Diante disso, diversos estudos apontaram que as VRPs podem ser substituídas por bombas funcionando no modo turbina (BFTs) com intuito de recuperar a energia que seria desperdiçada por essas válvulas (Lima *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2019; Ebrahimi *et al.*, 2021). As BFTs são bombas hidráulicas operando no sentido inverso (Carravetta *et al.*, 2018) que podem desempenhar de forma eficiente o papel das VRPs no controle de pressão e têm a geração de energia como recurso extra (Renzi e Rossi, 2019). Essas máquinas são mais baratas em comparação às turbinas hidráulicas tradicionais (Renzi *et al.*, 2020) e são mais adequadas para recuperação de pequenas potências energéticas ocorrentes nas VRPs (Carravetta *et al.*, 2014). No entanto, sua aplicação generalizada ainda depende dos fabricantes de bombas que raramente fornecem informações sobre o desempenho dessas máquinas no modo turbina (Mitrovic *et al.*, 2021).

Como resultado disso, muitos estudos foram desenvolvidos para prever o desempenho das BFTs. Algumas abordagens utilizaram métodos baseados no Melhor Ponto de Eficiência (MPE) (Alatorre-Frenk, 1994; Yang *et al.*, 2012) e no número de velocidade específica da bomba (Singh e Nestmann, 2010; Tan e Engeda, 2016). Porém, quando instalada em RDAs, uma BFT deve funcionar sob várias condições devido às operações dinâmicas das redes ao longo do dia, forçando a operação da máquina distante do seu MPE (*off-design*), impossibilitando definir um ponto operacional único para a BFT (Polák, 2019). Apenas recentemente estudos científicos foram entendidos e publicados sobre o desempenho de BFTs *off-design*, e novas colaborações teóricas foram propostas (Renzi *et al.*, 2020; Stefanizzi *et al.*, 2018).

As BFTs podem operar em velocidade constante ou em velocidade variável, dependendo do potencial hidráulico disponível em uma rede, pois a eficiência da BFT está diretamente ligada à máquina que opera sob condições variáveis (Alberizzi *et al.*, 2018; Carravetta *et al.*, 2018). Para este estudo, considerou-se a BFT operando em velocidade constante, como se fosse a própria VRP.

Apesar dos resultados animadores dessas investigações, poucos estudos têm dado atenção ao controle da pressão da bomba operando em uma rede como primeira função, buscando sempre a maior recuperação de energia. A novidade deste trabalho está em detalhar o comportamento da BFT operando em velocidade constante, como se fosse a própria válvula substituída, comparando a pressão de saída da bomba e dos nós da rede, com o controle pré-definido da válvula, conforme legislação específica. Como tecnologia extra, avalia-se como a potência e a eficiência da máquina reagem a partir do controle ou não da pressão.

Além disso, é importante quantificar os processos ambientais inerentes a operação da BFT em uma rede (Rossi *et al.*, 2016), demonstrando a sustentabilidade ocorrida. O objetivo deste estudo foi apresentar uma metodologia que possibilite o controle efetivo da pressão em RDAs com a utilização de BFTs em velocidade constante em substituição às VRPs estrategicamente posicionadas em uma rede previamente setorizada em AMDs. Com a seleção e previsão *off-design* das BFTs apresentados neste estudo, é possível analisar o funcionamento das máquinas para regular a pressão de trabalho na rede, como se fosse a própria VRP. Por fim, foram estimadas as vantagens ambientais da utilização dessas máquinas.

Metodologia

Seleção de bombas funcionando como turbinas

Para seleção de uma bomba, foram associados dois modelos tradicionais que consideram o melhor ponto de eficiência (MPE) da bomba para prever o comportamento de BFTs (Yang *et al.*, 2012; Sharma, 1985; Williams, 1995) à um modelo cuja formulação representa o comportamento da BFT em toda faixa operacional (*off-design*) (Rossi *et al.*, 2019). As combinações foram validadas com dados experimentais de BFTs da literatura (Deraksham e Nourbakhsh, 2008). A melhor associação foi definida comparando-se as diferenças relativas entre os dados experimentais e os teóricos dos modelos, a partir do cálculo do coeficiente de determinação (R^2). A **Tabela 1**

apresenta as formulações dos métodos que utilizam o MPE da bomba, enquanto as **Equações (1)-(5)** relatam a operação das BFTs em *off-design*.

Tabela 1. Modelos que consideram o MPE da bomba para prever o comportamento das BFTs.

Método	h (m)	q (m ³ /h)	η
Sharma (1985) e Williams (1995)	$H_{BFT} = H_{MPE}/\eta_{máx}^{1.2}$	$Q_{BFT} = Q_{MPE}/\eta_{máx}^{0.8}$	$\eta_{BFT} = \eta_{máx}$
Yang <i>et al.</i> (2012)	$h = 1.2/\eta_{máx}^{1.1};$ $h = H_{BFT}/H_b$	$q = 1.2/\eta_{máx}^{0.55};$ $q = Q_{BFT}/Q_b$	$\eta_{BFT} = \eta_b$

Onde: Q_{MPE} representa a vazão da bomba no ponto de máxima eficiência; H_{MPE} refere-se a pressão da bomba no ponto de máxima eficiência; $\eta_{máx}$ corresponde ao máximo rendimento como bomba; Q_{BFT} descreve a vazão em modo turbina no ponto de máxima eficiência e η_{BFT} é o máximo rendimento como turbina; h caracteriza a taxa de pressão da BFT; q é a taxa de descarga da BFT (com base na pressão de vazão da bomba) e η_b é a eficiência da bomba.

$$\frac{\psi_{BFT}}{\psi_{BEP,BFT}} = 0.2394R^2 + 0.769R \quad \text{Equação (1)}$$

$$\frac{\eta_{BFT}}{\eta_{BEP,BFT}} = -1.9788R^6 + 9.0636R^5 - 13.148R^4 + 3.8527R^3 + 4.5614R^2 - 1.3769R \quad \text{Equação (2)}$$

$$R = \frac{\phi_{BFT}}{\phi_{BEP,BFT}}, \quad \text{Equação (3)}$$

$$\phi = \frac{Q}{ND^3} \quad \text{Equação (4)}$$

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

Onde: H_{BFT} é a altura da turbina da rotação nominal da bomba em [m]; H é a altura da bomba em rotação nominal [m]; Q_{BFT} é a vazão da turbina em rotação nominal da bomba em [m³/s]; Q é a vazão da bomba em rotação nominal em [m³/s]; ϕ é o coeficiente de vazão; ψ é o coeficiente de altura; N é a rotação em [rps]; D representa o diâmetro da máquina em [m]; e g é a aceleração da gravidade em [m/s²].

Quando instalada em uma rede, a BFT está sujeita as variações de fluxo e pressão ligadas ao consumo dos usuários. Neste caso, a máquina quase sempre opera *off-design*. Por isso, é desejável sua operação conjunta com modelos que predizem o comportamento da BFT fora de projeto, justificando a associação proposta. Além disso, o desempenho do modo turbina de uma bomba inicia com a previsão MPE que é condição inicial, com papel crucial na estimativa do comportamento da BFT. Definida a melhor associação, a seleção de uma bomba considerou os dados de vazão (Q_{VRP}) e pressão dissipada (H_{VRP}) das VRPs em uma RDA. A vazão utilizada para selecionar a máquina foi a média das vazões das horas de operação da bomba. Os procedimentos de seleção de uma bomba são descritos na **Figura 1**.

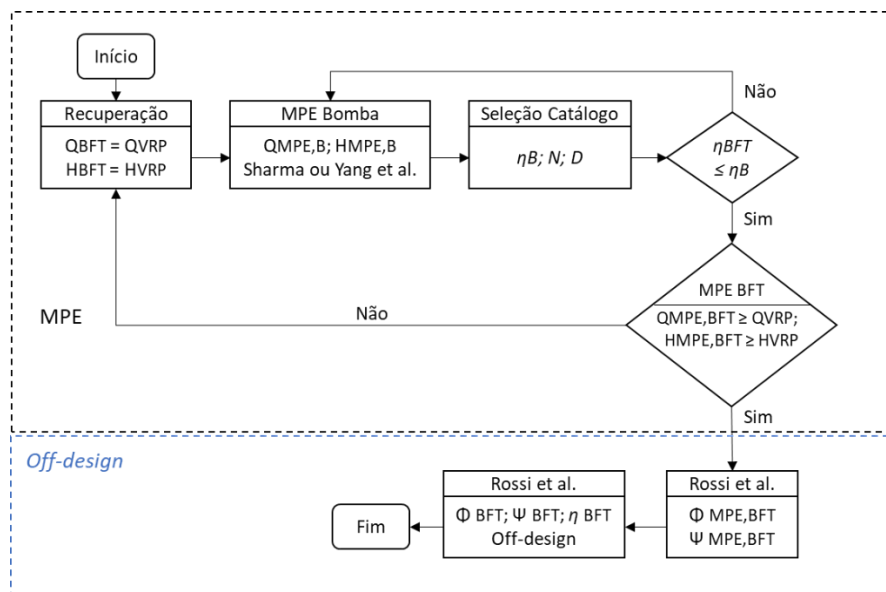


Figura 1. Método de seleção da BFT.

Utilização BFTs em substituição às VRPs

A partir da seleção da BFT, VRPs de uma rede foram substituídas por bombas operando em velocidade constante. O período de operação da máquina foi considerado das 6h às 23h. Nesta análise, foi considerado uma planta com um sistema by-pass, com uma VRP1 e outra operando em paralelo (VRP1.1). Esta última só opera em situações de manutenção da VRP1 (**Figura 2 (a)**). A válvula principal será substituída, conforme ilustrado na **Figura 2 (b)**. Neste caso, a VRP1.1 será acionada pelo by-pass em períodos de redução do consumo na RDA, o que justifica o tempo de operação BFT. A VRP1.1 garante a regulação da pressão quando a altura manométrica é maior do que a queda de carga fornecida pela máquina. À medida que as horas de trabalho começam, uma válvula *on-off* (*VOF1*) permite o fluxo BFT. Com o fim do horário de trabalho, a *VOF1* se fecha e *VOF2* se abre, direcionado o fluxo para a VRP1.1. A *VOF3* é acionada mediante manutenção da BFT.

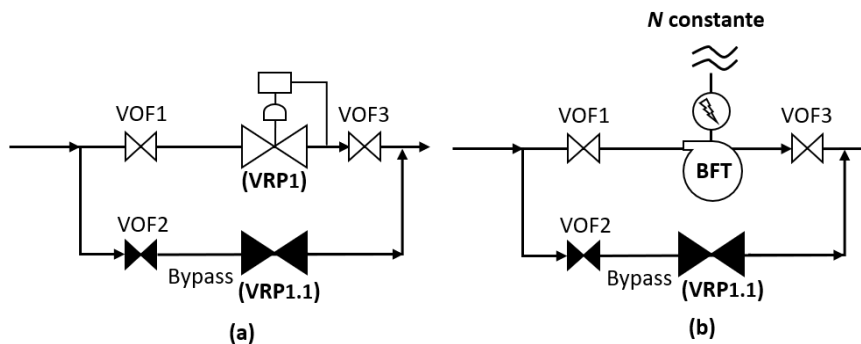


Figura 2. Instalação VRP1 (a) e BFT (b) operando em velocidade constante.

Controle da pressão e recuperação de energia em RDAs

Será avaliado o controle da pressão pela BFT como se fosse a própria VRP. Na verdade, a máquina deve manter as condições operacionais da válvula, ou seja, diferença de pressão (ΔH), pressão de controle ou de saída (P_c) e a pressão regulada a jusante da VRP conforme Norma Brasileira - NBR 12218/2017 (ABNT, 2017). O ΔH é a energia de pressão que pode ser recuperada pela BFT, como ilustrado na **Figura 3**. Como a bomba opera inversamente, esta gera uma potência de saída e um rendimento (η_{BFT}), ligada ao comportamento da vazão e da pressão de uma rede ao longo do dia. Dessa forma, é possível estimar a energia recuperada pela BFT. A **Equação 6** relata o cálculo da potência.

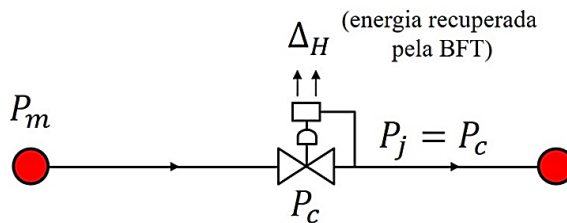


Figura 3. Energia dissipada pela VRP e recuperada pela BFT.

Onde: P_m é a pressão de montante à válvula; P_j é a pressão saída/jusante à válvula; P_c é a potência hidráulica em [kW]; Q_{BFT} é a vazão da BFT em [m³/s]; H_{BFT} é a altura recuperada pela BFT em [m]; ρ é a massa específica em [kg/m³]; η_{BFT} é o rendimento da BFT no período de operação; e g é a aceleração da gravidade em [N/Kg].

$$P[kW] = \frac{Q_{BFT} H_{BFT} \rho g \eta_{BFT}}{1000}$$

Equação (6)

Estudo de caso

A metodologia descrita até aqui, foi aplicada em uma RDA que atende parte de um bairro do município de Tucuruí-PA, norte do Brasil, a qual foi projetada para beneficiar uma área de,

aproximadamente, 300 m², com variação topográfica de 64 m a 128 m, e abastece 743 residências, constituída por 87 tubos, 79 nós e 12 válvulas de gaveta (VG). Possui um reservatório elevado (RE) localizado na parte intermediária da área, que recebe água tratada de um bairro vizinho. A rede opera por gravidade em regime turbulento, com inadequação da pressão aos limites da legislação. As informações da RDA foram cedidas em entrevistas com a prefeitura local.

Para regular as pressões na rede, foram adotados os procedimentos descritos por Souza (2022). O autor utilizou o simulador hidráulico EPANET 2.0 para dividir uma RDA em áreas de medições distritais (AMDs), com o posicionamento estratégico de VRPs nos tubos. A partir disso, a RDA projetada no referido simulador apresentou pressões em conformidade com a legislação, que estabelece pressões mínimas de 10 m e máximas de 50 m (ABNT, 2017). A rede foi dividida em duas AMDs, com uma VRP em cada distrito, como apresentado na **Figura 4**. A VRP1 opera com o Pc de 13.14m e ΔH de 34.64, enquanto a VRP2 tem um Pc de 14.73 e o ΔH de 33.30.

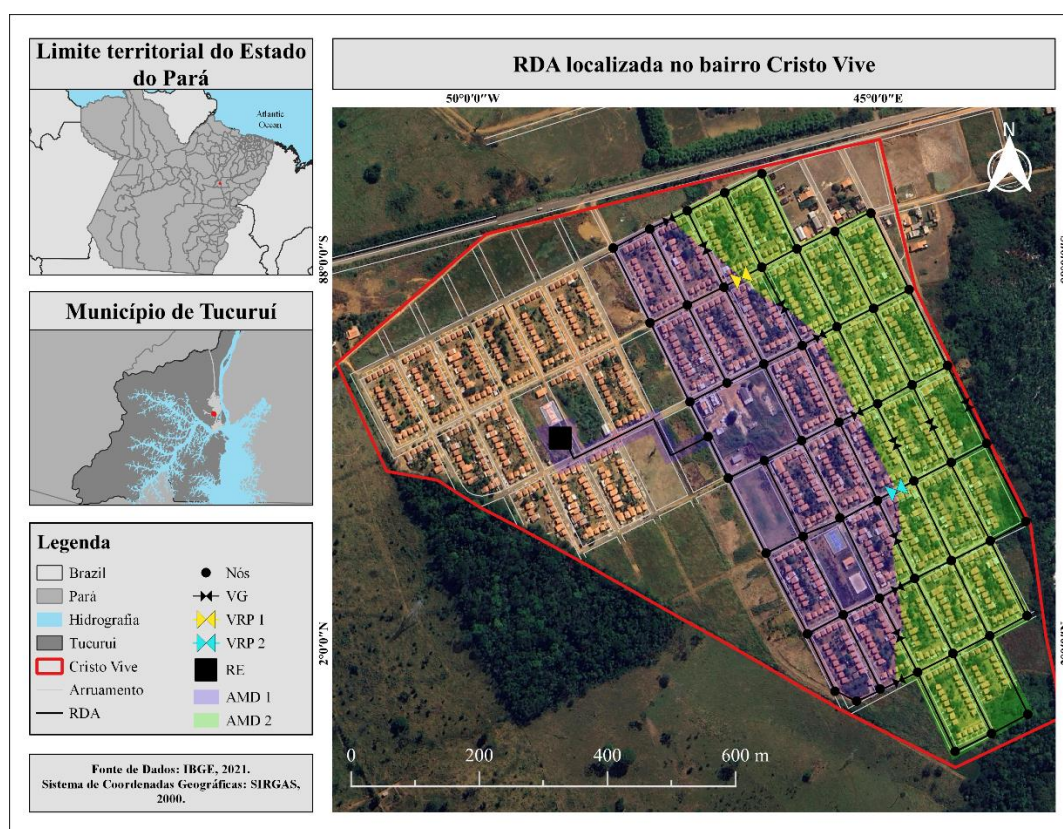


Figura 4. RDA dividida em duas AMDs.

Vantagens ambientais do emprego das BFTs em RDAs

Uma das vantagens seria a redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) associado a recuperação de energia renovável nas RDAs. No entanto, essa comparação é inviabilizada a partir

do momento em que a energia utilizada pelo SAA já é proveniente de uma fonte renovável (Usina hidrelétrica de Tucuruí - PA). Por outro lado, em uma análise ambiental, torna-se necessário comparar um projeto de energia renovável com outras alternativas possíveis (Balacco *et al.*, 2018). Dessa forma, foi conduzida uma análise comparativa do impacto da instalação da BFT em termos de equivalência de redução de emissão de CO₂ produzido pela circulação de automóveis no Brasil. Para estimar o CO₂ equivalente da instalação BFT, adotou-se o fator de conversão médio de 400 gCO₂/kWh (Caputo e Sarti, 2015). O Instituto de Pesquisa Econômicas Aplicadas (Carvalho, 2011) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014) relataram a emissão média de gCO₂/km e a distância média de condução dos automóveis Brasileiros na **Tabela 2**. A partir desses valores, o benefício ambiental que a instalação da BFT poderia evitar em emissões de CO₂ e o número de automóveis circulantes equivalentes à mesma quantidade em emissão foi estimado.

Tabela 2. Emissão de CO₂ e distância média de condução de automóveis Brasileiros.

Veículo	Emissões quilométricas (gCO ₂ /km)*	Distância média de condução (km/ano)**
Carro	190	12,000
Motocicleta	70	10,500

Fonte: Carvalho (2011)* e MMA (2014)**.

Resultados e discussão

Validação e cálculo do coeficiente de determinação (R^2)

A **Figura 5** apresenta as curvas adimensionais (a) ψ - φ e (b) η - φ que representam a tendência das combinações propostas e os dados experimentais das BFTs apresentadas por Derakhshan e Nourbakhsh (2008). A **Tabela 3** apresenta o cálculo do coeficiente R^2 para as duas associações propostas. Nota-se que a combinação do método de Yang-Rossi apresenta os melhores valores de R^2 , principalmente quando se analisa a eficiência da máquina. Diante disso, pode-se generalizar a aplicação deste modelo e prolongá-la para diversas máquinas, pois reproduziu bem as linhas de tendências dos experimentos, independente do MPE da bomba em modo turbina, velocidade específica e eficiência de cada máquina.

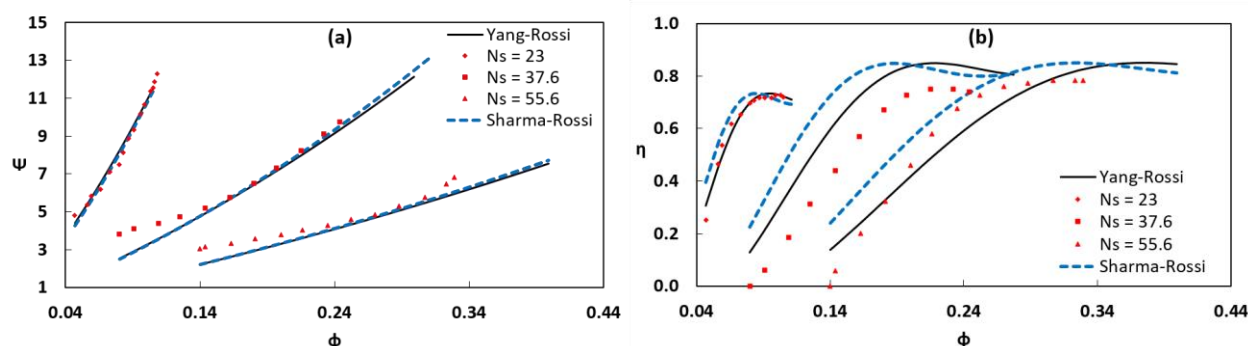


Figura 5. Curvas (a) ψ - ϕ e (b) η - ϕ .

Tabela 3. Coeficientes de determinação R^2 para as duas associações propostas.

BFTs (Derakshan e Nourbakhsh, 2008)	R^2			
	Yang-Rossi		Sharma-Rossi	
	ψ	η	ψ	η
Ns = 23	0.983	0.969	0.981	0.709
Ns = 37.6	0.916	0.710	0.926	-0.067
Ns = 55.6	0.800	0.913	0.824	0.718

Características das bombas selecionadas

As características das bombas selecionadas para a substituição das válvulas VRP1 e VRP2 são apresentadas na **Tabela 4**. Os valores de vazão e altura são maiores no modo turbina, conforme constatado na literatura (Rossi e Renzi, 2018). Na **Tabela 5** estão relacionados os valores obtidos para a BFT1 e BFT2 operando *off-design*, com destaque para os valores do MPE. Este comportamento é interessante para a análise da operação BFT que é altamente dependente das taxas de fluxo dentro de uma RDA (Coelho e Andrade-Campos, 2018). O modelo Yang-Rossi apresentou boa previsão do comportamento das BFTs nas condições de projeto e *off-design*.

Tabela 4. Características operacionais no MPE da bomba ITAP 50 – 330/2 selecionada.

Característica	VRP 1		VRP 2	
	Bomba	Turbina	Bomba	Turbina
Q [m³/h]	10.00	16.03	10.62	16.87
H [m]	19.50	41.81	18.74	39.45
Eficiência [-]	0.59	0.57	0.60	0.58
Rotação específica [rad/s]	0.12	0.09	0.13	0.09
Diâmetro do impulsor [m]	0.24		0.22	
Velocidade de rotação [rpm]	1,130			

Fonte: IMBIL (2022).

Tabela 5. Operação das BFTs 1 e 2 operando *off-design*.

BFT 1					BFT 2				
ϕt	ψt	ηt	Q_t (m ³ /h)	H (m)	ϕt	ψt	ηt	Q_t (m ³ /h)	H (m)
0.015	17.23	0.55	14.06	35.89	0.021	19.93	0.56	15.16	34.88
0.016	18.64	0.56	15.00	38.83	0.022	21.10	0.58	15.88	36.92
0.017	20.08	0.57	16.03	41.81	0.023	22.28	0.58	16.87	39.45
0.018	21.56	0.58	16.87	44.91	0.024	23.49	0.59	17.32	41.11
0.019	23.07	0.57	17.81	48.06	0.025	24.72	0.59	18.04	43.25

Controle da pressão na rede pelas BFTs em velocidade constante

As **Figura 6** apresenta o ΔH das BFT1 e BFT2 operando em velocidade constante. Nota-se que o ΔH da BFT1 se aproxima da VRP1 somente das 6h-9h, de 15h-17h e das 19h-22h (**Figura 6-a**). Por sua vez, o ΔH da BFT2 se aproxima da VRP2 às 9h e às 21h (**Figura 6-b**). Como consequência disso, a pressão de saída das máquinas é prejudicada, conforme apresentado na **Figura 7**, que mostra a pressão de saída das BFT1 (a) e BFT2 (b). A BFT1 (**Figura 7-a**) se afasta da válvula nos horários de 10h-15h e às 18h. Já a BFT2 (**Figura 7-b**) apresenta valores negativos de pressão de saída, de 11h-14h e às 18h. Somente as 9h a pressão acompanha a VRP2. Esses resultados se justificam pela ocorrência de vazões distantes do MPE em determinados horários do dia. Como a máquina está operando em velocidade constante, as melhores eficiências são observadas com a ocorrências de vazões no MPE. Além disso, como as RDAs possuem um comportamento dinâmico ao longo do dia, a BFT não consegue explorar adequadamente altas variações de vazões nesta condição operacional, resultando em pressões abaixo dos níveis recomendados pela NBR 12218/2017 (ABNT, 2017) em todo o distrito, como mostrado na **Figura 8**.

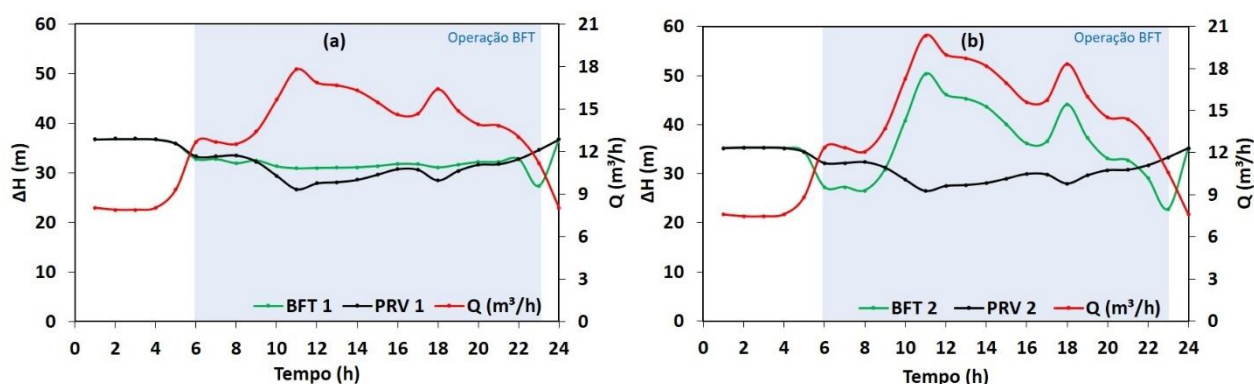


Figura 6. Comparação das perdas de carga com a VRP 1 e com a BFT 1 (a) e com a VRP 2 e BFT 2 (b) operando em velocidade constante.

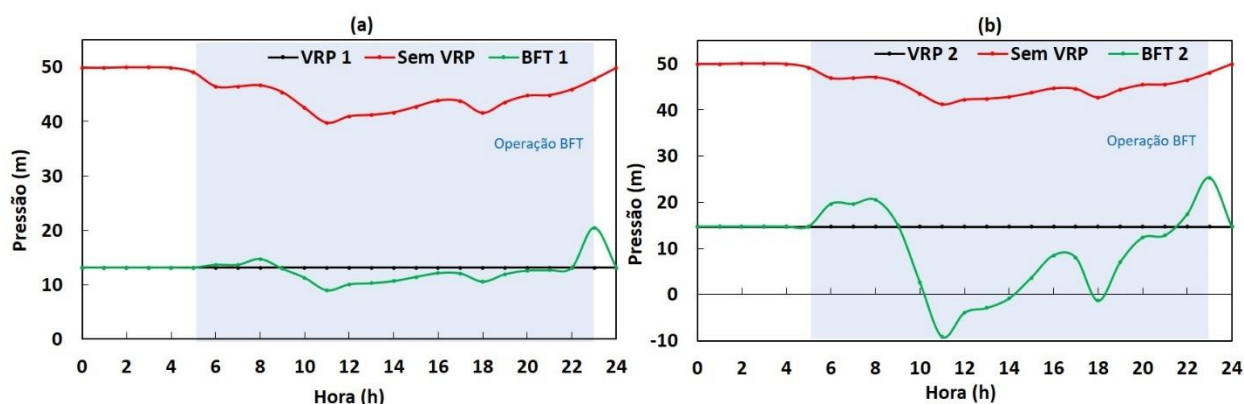


Figura 7. Comparação da pressão de saída com a BFT 1, VRP 1 e sem controle (a) e com a BFT 2, VRP 2 e sem controle (b).

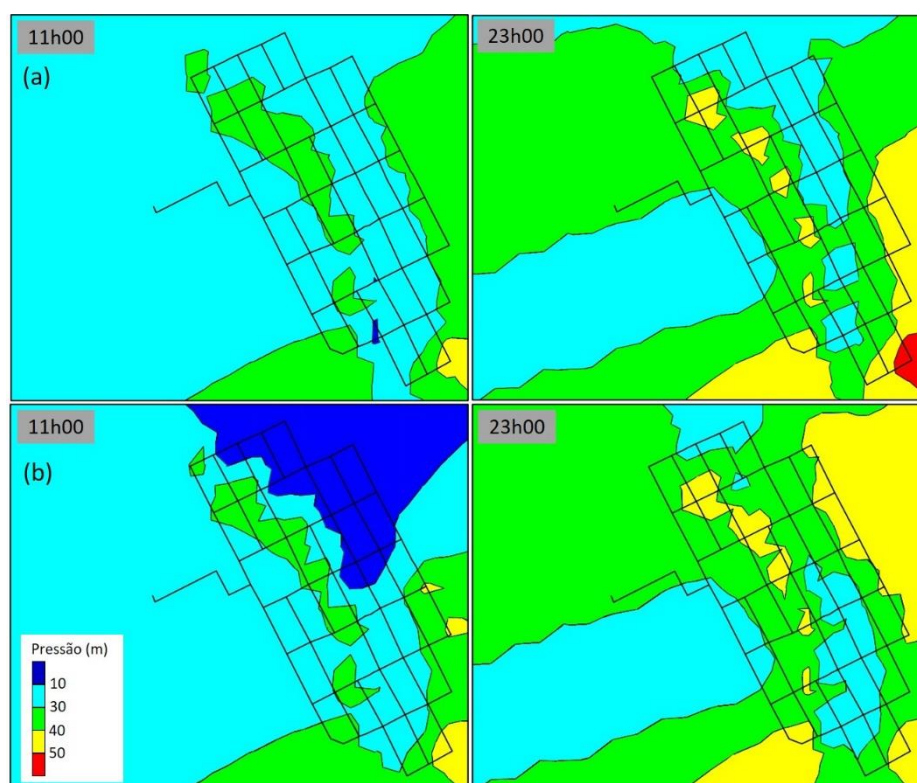


Figura 8. Pressões na RDA com a BFT1 (a) e com a BFT2 (b), nos horários de 11h e 23h.

No período das 23h01 às 5h59, o *by-pass* é acionado e a VRP2 controla a pressão adequadamente. A utilização da válvula operando em paralelo à BFT parece ser uma boa solução para a manutenção da pressão nos distritos, especialmente no período da madrugada quando as máquinas não conseguem explorar adequadamente as taxas de fluxo reduzidas. Isso também foi sugerido no trabalho de Ebrahimi *et al.* (2021). Os autores observaram um aumento indesejado na pressão dos nós na madrugada, e concluíram que as VRPs podem atuar muito bem em

conjunto com as BFTs em períodos de consumo reduzido, controlando a pressão na rede. Essa estratégia também foi utilizada por Crespo Chacón *et al.* (2020) em seu estudo em uma RDA real no sudoeste da Espanha. Os autores sugeriram um sistema de *by-pass* para os meses em que os picos de demanda gerariam pressões reduzidas.

Na realidade, observa-se que nem sempre é financeiramente vantajoso substituir uma válvula por uma bomba operando inversamente (Souza *et al.*, 2021), pois a pouca energia dissipada (ΔH) leva a seleção de uma máquina de tamanho menor para o controle da pressão em certas horas do dia, aumentando, significativamente, as perdas de água por vazamentos e o desperdício de energia elétrica. Nesses casos, a recuperação de energia é prejudicada, resultando em menores eficiências hidráulicas disponíveis em vazões mais elevadas (Alberizzi *et al.*, 2018).

Mesmo com poucas inadequações aos limites de pressão em algumas horas das 18h programadas para sua operação, a BFT1 controlou a pressão na rede de forma satisfatória. Já a BFT2 se afastou significativamente da VRP2, apresentando valores de pressão negativos. Certamente, com pressões acima de 50 m, o volume de vazamentos será elevado, enquanto as horas de pressões reduzidas podem ocasionar desabastecimentos aos consumidores. Isto sugere que se deve considerar o cenário de operação com a BFT1 em conjunto com a VRP2.

Recuperação de energia e análise ambiental

Embora as duas bombas não tenham regulado as pressões como as VRPs, o comportamento da BFT1 foi melhor tecnicamente em comparação a BFT2, se aproximando mais da válvula. Neste sentido, a recuperação de energia será apresentada apenas para a primeira máquina. A **Figura 9** apresenta a potência de saída dessa bomba nas 18h de operação.

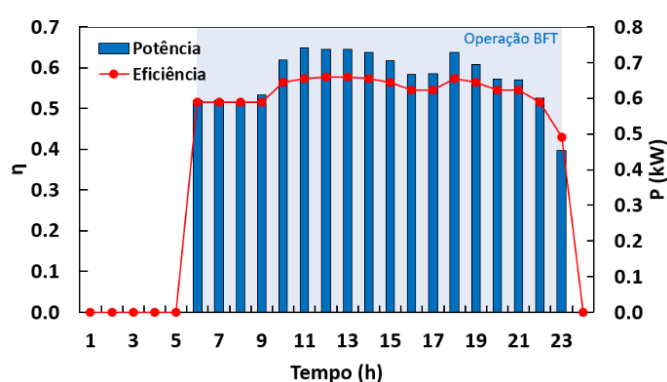


Figura 9. Rendimento e Potência de saída da BFT1.

A potência de saída variou entre 0.45 kW a 0.74 kW, com uma média de 0.66 kW, resultando em um ganho energético de 4,331 kWh/ano. Esse total seria suficiente para abastecer,

aproximadamente, duas residências enquadradas como baixa renda, com consumo de até 220 kWh/mês conforme a concessionária local. Como vantagem ambiental, o ganho energético da máquina é o equivalente a redução de 1,732,400 gCO₂/ano, aproximadamente um carro ou três motocicletas. Esses dados mostram que as BFTs podem trazer benefícios ambientais significativos quando empregadas em uma RDA, considerando se tratar de uma tecnologia emergente de grande potencial econômico e sustentável. A **Tabela 6** apresenta um resumo dos benefícios ambientais na BFT1.

Tabela 6. Número de veículos circulantes no Brasil equivalentes a redução de gCO₂/ano da BFT.

Veículo	gCO ₂ /ano por veículo	Ganho BFTs [kWh/ano]	Conversão BFT [gCO ₂ /ano]	Equivalência [Veículos/ano]
Carro	2,280,000	4,331	1,732,400	≈ 1
Motocicleta	735,000			≈ 3

Conclusão

Neste trabalho, uma combinação de métodos de seleção de BFTs foi validada com base em dados experimentais disponíveis na literatura, sendo posteriormente aplicado em uma RDA real com altas pressões nos tubos. A RDA foi dividida em áreas de medições distritais a fim de regular as pressões, de acordo com legislação vigente. Através de simulações realizadas no *software* Epanet 2.0, duas VRPs foram substituídas por BFTs operando em velocidade constante. As simulações mostraram que as máquinas não conseguiram manter as pressões dentro da faixa esperada em alguns horários do dia. Todavia, BFT1 teve seu comportamento melhor que a da segunda máquina, a qual apresentou pressões de saída negativas em diversas horas do dia. Como consequência disso, a maioria dos Nós da AMD ficou com pressões inconsistente com a legislação. Quando as máquinas estão operando em velocidade constante, só conseguem obter altas eficiências com vazões no MPE.

Das duas máquinas sugeridas neste estudo, a BFT1 teve melhor desempenho técnico, se aproximando mais da VRP1. Desta forma, estimou-se a energia 4,331 kWh/ano para essa bomba, sendo capaz de atender aproximadamente duas residências enquadradas como baixa renda. Considerando se tratar de uma válvula com baixa dissipação, a BFT1 conseguiu recuperar uma quantia considerável de energia, todavia, com a bomba operando em velocidade constante não foi possível obter um aproveitamento máximo em toda faixa operacional. Sendo assim, a análise de BFTs operando em velocidade variável é altamente recomendada em estudos futuros, para se obter melhores resultados de eficiência em vazões do MPE e fora dele.

Referências bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017) *NBR 12218/2017: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público*. Acesso em: 07 de junho de 2022. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=370933>
- Adedeji, K. B., Hamam, Y., Abe, B. T., & Abu-Mahfouz, A. M. (2018). Pressure Management Strategies for Water Loss Reduction in Large-Scale Water Piping Networks: A Review. *Springer Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7218-5_33
- Adu, D., Jianguo, D., Darko, R. O., Boamah, K. B., Boateng, A. E. (2020). Investigating the state of renewable energy and concept of pump as turbine for energy generation development. *Energy Reports*, **6**, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.025>
- Alatorre-Frenk, C. (1994). *Cost minimisation in micro-hydro systems using pumps-as-turbines*.
- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, **162**, 733–741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>
- Alberizzi, J. C., Renzi, M., Nigro, A., Rossi, M. (2018). Study of a Pump-as-Turbine (PaT) speed control for a Water Distribution Network (WDN) in South-Tyrol subjected to high variable water flow rates. *Energy Procedia*, **148**, 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.072>
- Balacco, G., Binetti, M., Caporaletti, V., Gioia, A., Leandro, L., Iacobellis, V., Sanvito, C., Piccinni, A. F. (2018). Innovative mini-hydro device for the recharge of electric vehicles in urban areas. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, **9**(4), 435–445. <http://dx.doi.org/10.1007/s40095-018-0282-8>
- Binama, M., Su, W. T., Li, X. bin, Li, F. C., Wei, X. Z., & An, S. (2017). Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **79**, 148–179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.071>
- Caputo, A., Sarti, C. (2015) *Fattori di emissione atmosferica di CO2 e sviluppo delle fonti rinnovabili nel settore elettrico*, Rapporto ISPRA, 75pp.
- Carvalho, C. H. R. de. (2011) *Emissões relativas de poluentes do transporte urbano*. Acesso em: 12 de julho de 2022. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/5574>.
- Carravetta, A., Fecarotta, O., del Giudic, G., & Ramos, H. (2014). Energy recovery in water systems by PATs: A comparisons among the different installation schemes. *Procedia Engineering*, **70**, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.031>
- Carravetta, A., Fecarotta, O., & Ramos, H. M. (2018). A new low-cost installation scheme of PATs for pico-hydropower to recover energy in residential areas. *Renewable Energy*, **125**, 1003–1014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.132>
- Coelho, B., Andrade-Campos, A. (2018). Energy Recovery in Water Networks: Numerical Decision Support Tool for Optimal Site and Selection of Micro Turbines. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **144**(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000894](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000894)
- Covelli, C., Cimorelli, L., Cozzolino, L., Morte, R. della, & Pianese, D. (2016). Reduction in water losses in water distribution systems using pressure reduction valves. *Water Science and Technology: Water Supply*, **16**(4), 1033–1045. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.020>
- Crespo Chacón, M., Rodríguez Díaz, J. A., García Morillo, J., & McNabola, A. (2020). Hydropower energy recovery in irrigation networks: Validation of a methodology for flow prediction and pump as turbine selection. *Renewable Energy*, **147**, 1728–1738. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.119>
- Derakhshan, S., Nourbakhsh, A. (2008). Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. *Experimental thermal and fluid science*, **32**(3), 800–807. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.10.004>
- Ebrahimi, S., Riasi, A., Kandi, A. (2021). Selection optimization of variable speed pump as turbine (PAT) for energy recovery and pressure management. *Energy Conversion and Management*, **227**. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113586>

- Fecarotta, O., McNabola, A. (2017). Optimal Location of Pump as Turbines (PATs) in Water Distribution Networks to Recover Energy and Reduce Leakage. *Water Resources Management*, **31**(15), 5043–5059. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1795-2>
- IMBIL, Soluções em bombeamento. Linha Esmaltada. Catálogo INI (in portuguese). Acesso em 21 de setembro de 2022. Disponível em: <http://www.imbil.com.br>
- Kandi, A., Moghimi, M., Tahani, M., & Derakhshan, S. (2021). Optimization of pump selection for running as turbine and performance analysis within the regulation schemes. *Energy*, **217**, 119402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119402>
- Lima, G. M., Junior, E. L., Brentan, B. M. (2017). Selection of Pumps as Turbines Substituting Pressure Reducing Valves. *Procedia Engineering*, **186**, 676–683. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.249>
- Liu, M., Tan, L., Cao, S. (2019). Theoretical model of energy performance prediction and BEP determination for centrifugal pump as turbine. *Energy*, **172**, 712–732. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.162>
- Lydon, T., Coughlan, P., McNabola, A. (2017). Pressure management and energy recovery in water distribution networks: Development of design and selection methodologies using three pump-as-turbine case studies. *Renewable Energy*, **114**, 1038–1050. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.120>
- Marchiori, I. N., Lima, G. M., Brentan, B. M., Luvizotto, E. (2019). Effectiveness of methods for selecting pumps as turbines to operate in water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*, **19**(2), 417–423. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.086>
- Mitrovic, D., Morillo, J. G., Rodríguez Díaz, J. A., & Mc Nabola, A. (2021). Optimization-Based Methodology for Selection of Pump-as-Turbine in Water Distribution Networks: Effects of Different Objectives and Machine Operation Limits on Best Efficiency Point. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **147**(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001356](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001356)
- MMA, Ministério do Meio Ambiente (2014). *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Acesso em: 15 de julho de 2022. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviaros_2013.pdf
- Parra, S., Krause, S. (2017). Pressure management by combining pressure reducing valves and pumps as turbines for water loss reduction and energy recovery. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, **12**(1), 89–97. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N1-89-97>
- Polák, M. (2019). The influence of changing hydropower potential on performance parameters of pumps in turbine mode. *Energies*, **12**(11). <https://doi.org/10.3390/en12112103>
- Pugliese, F., de Paola, F., Fontana, N., Giugni, M., Marini, G. (2016). Experimental characterization of two Pumps As Turbines for hydropower generation. *Renewable Energy*, **99**, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.051>
- Renzi, M., Nigro, A., Rossi, M. (2020). A methodology to forecast the main non-dimensional performance parameters of pumps-as-turbines (PaTs) operating at Best Efficiency Point (BEP). *Renewable Energy*, **160**, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.165>
- Renzi, M., Rossi, M. (2019). A generalized theoretical methodology to forecast flow coefficient, head coefficient and efficiency of Pumps-as-Turbines (PaTs). *Energy Procedia*, **158**, 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.057>
- Rossi, M., Nigro, A., Renzi, M. (2019). Experimental and numerical assessment of a methodology for performance prediction of Pumps-as-Turbines (PaTs) operating in off-design conditions. *Applied Energy*, **248**, 555–566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.123>
- Rossi, M., Renzi, M. (2018). A general methodology for performance prediction of pumps-as-turbines using Artificial Neural Networks. *Renewable Energy*, **128**, 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.060>
- Rossi, M., Righetti, M., Renzi, M. (2016). Pump-as-turbine for Energy Recovery Applications: The Case Study of An Aqueduct. *Energy Procedia*, **101**, 1207–1214. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.163>
- Sharma, K. (1985). *Small hydroelectric project-use of centrifugal pumps as turbines*. Kirloskar Electric Co.

- Singh, P., Nestmann, F. (2010). An optimization routine on a prediction and selection model for the turbine operation of centrifugal pumps. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **34**(2), 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.10.004>
- SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2021) *Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto*, Site institucional, 91 pp.
- Souza, D. E. S. e. (2022) *Recuperação de energia em redes de distribuição de água com a utilização de bomba funcionando como turbina em velocidade variável*, Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, 117pp.
- 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. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **43**(11), 489. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03213-z>
- Spedaletti, S., Rossi, M., Comodi, G., Salvi, D., Renzi, M. (2021). Energy recovery in gravity adduction pipelines of a water supply system (WSS) for urban areas using Pumps-as-Turbines (PaTs). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **45**. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101040>
- Stefanizzi, M., Capurso, T., Torresi, M., Pascazio, G., Ranaldo, S., Camporeale, S. M., Fortunato, B., Monteriso, R. (2018). *Development of a 1-D Performance Prediction Model for Pumps as Turbines*. **682**. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110682>
- Stefanizzi, M., Capurso, T., Balacco, G., Binetti, M., Camporeale, S. M., Torresi, M. (2020). Selection, control and techno-economic feasibility of Pumps as Turbines in Water Distribution Networks. *Renewable Energy*, **162**, 1292–1306. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.108>
- Stepanoff, A. (1957) *Centrifugal and axial flow pumps: Theory, Design And Application*, New York, USA.
- Tan, X., Engeda, A. (2016). Performance of centrifugal pumps running in reverse as turbine: Part II -systematic specific speed and specific diameter based performance prediction. *Renewable energy*, **99**, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.052>
- Williams, A. A. (1995) *Pumps as turbines: a user's guide*, IT Publications, London.
- Yang, S. S., Derakhshan, S., Kong, F. Y. (2012). Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance. *Renew able Energy*, **48**, 507–513. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.002>

**ANEXO A – REVISTA PARA SUBMISSÃO: AIDIS DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
AMBIENTALES: INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y PRÁCTICA
QUALIS ENGENHARIAS I: B1**

