



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

JULIANA MELO DE SOUSA

DENIZE MENDES DE CASTRO

**REGULAÇÃO DA PRESSÃO EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
USANDO BOMBAS COMO TURBINAS EM VELOCIDADES VARIÁVEIS COM
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**

TUCURUÍ
2022

JULIANA MELO DE SOUSA

DENIZE MENDES DE CASTRO

**REGULAÇÃO DA PRESSÃO EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
USANDO BOMBAS COMO TURBINAS EM VELOCIDADES VARIÁVEIS COM
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**

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.

**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)**

S725r Sousa, Juliana Melo de.
Regulação da pressão em uma rede de distribuição de água usando bombas como turbinas em velocidades variáveis com aproveitamento energético / Juliana Melo de Sousa, Denize Mendes de Castro . — 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. RDA. 2. BFT. 3. Setorização. 4. Operação fora de projeto. 5. Vazamentos. I. Título.

CDD 621.042

JULIANA MELO DE SOUSA

DENIZE MENDES DE CASTRO

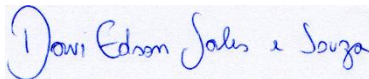
**REGULAÇÃO DA PRESSÃO EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
USANDO BOMBAS COMO TURBINAS EM VELOCIDADES VARIÁVEIS PARA
RECUPERAÇÃO DE ENERGIA**

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.

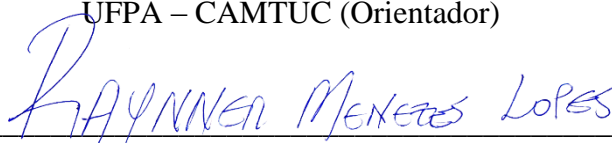
Data da aprovação: 16/12/2022

Conceito: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA



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



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

Documento assinado digitalmente



Junior Hiroyuki Ishihara
Data: 27/12/2022 14:33:02-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Junior Hiroyuki Ishihara
UFPA – CAMTUC (Examinador interno)

Documento assinado digitalmente



João Henrique Macedo Sá
Data: 27/12/2022 14:33:02-0300
CPF: ***.596.412-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. João Henrique Macedo Sá
UFSC (Examinador externo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida.

Agradeço aos meus pais Joaquina dos Santos Melo e Raimundo Sousa, que só foi possível chegar aonde estou graças aos seus ensinamentos, apoio e incentivo que sempre recebi durante toda a minha vida.

Agradeço aos meus irmãos Ramon Sousa, Nayury Sousa, Naonny Sousa, Nayara Sousa, Elienai Viana e Emerson Santos. Todos foram meus motivadores e me acompanharam nessa jornada. Agradeço especialmente a Nayara Sousa, que foi minha conselheira, sempre se fez presente e cuidou de mim. A minha família é o meu alicerce e é por eles que estou aqui.

Agradeço a minha dupla Denize Castro, que me incentivou e se dedicou inteiramente para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos, especialmente a Ingrid Luna, Jamile Caroline e Denize Castro, que ao longo da graduação foram minhas companheiras e me ajudaram a superar os desafios.

Agradeço ao meu namorado Jhonatan Oliveira pela sua prestatividade, paciência, apoio e dedicação.

Agradeço a Universidade Federal do Pará pelo suporte no decorrer do curso com excelentes professores, projetos e infraestrutura que proporcionaram o meu desenvolvimento profissional. Agradeço ao meu orientador pelos ensinamentos que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu coorientador e aos examinadores participantes da banca pelas contribuições que proporcionaram melhorias no desenvolvimento deste trabalho.

Juliana Melo de Sousa

AGRADECIMENTOS

Ao Autor da Vida, aquele que me permitiu chegar até aqui. Sem Deus nada seria. À minha família que nunca me deixou faltar nada, em especial à minha mãe, Maria Mendes, que representa força e garra, sou imensamente grata e espero honrá-la por cada suor derramado.

Ao meu amigo e namorado, Wallace Matos, por sempre ser um abrigo. Obrigada por tornar meus dias mais leves e me ensinar a dar valor ao que realmente importa nessa viagem passageira. Aos meus amigos e irmãos Abimael e Venilce, suas orações e conselhos me deram forças para continuar lutando as batalhas da vida.

À minha dupla de trabalho, Juliana Sousa, que é exemplo de determinação. Às amigadas que construí no decorrer da graduação, em especial à Juliana Sousa, Jamile Caroline e Ingrid Luna. Admiro vocês dentro e fora do ambiente acadêmico e torço pelo sucesso de cada uma.

Ao nosso orientador, por toda paciência e conhecimento compartilhados. Ao nosso coorientador e demais membros da banca, pelas contribuições para melhoria deste trabalho. Aos professores do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFPA Campus Tucuruí. A todos os profissionais da educação que exercem sua função com nobreza e prazer. Minhas sinceras homenagens.

Denize Mendes de Castro

“Além da ciência, é preciso a ‘sapiência’, ciência saborosa, que tem a ver com a arte de viver. Porque toda ciência seria inútil se, por detrás de tudo aquilo que faz os homens conhecer, eles não se tornassem mais sábios, mais tolerantes, mais mansos, mais felizes, mais bonitos”

(Rubem Alves).

RESUMO

Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) podem ser consideradas uma solução técnica e econômica para controlar as pressões nas Redes de Distribuição de Água (RDAs) em substituição às Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs). Seu uso requer uma compreensão precisa da operação sob várias condições hidráulicas em uma RDA (*off-design*). Caso contrário, a eficiência da máquina é reduzida, impossibilitando a regulação da pressão e recuperando pouca energia. Este estudo apresenta uma metodologia que detalha a regulação de pressão em uma rede municipal com o emprego de BFTs. A avaliação das pressões na RDA é feita para três cenários (C1 – VRPs operando 24h; C2 – BFT operando 18h e VRP operando 6h; e C3 – BFTs operando 24h). A seleção e a operação *off-design* da bomba é realizada a partir da utilização de dois modelos da literatura. As máquinas são simuladas em velocidades variáveis para substituir as válvulas. A redução de vazamentos nos três cenários é estimada. Em todos os cenários, houve o controle efetivo da pressão; em C2 e C3, as BFTs regulam a pressão da RDA como se fosse uma VRP e segundo a legislação Brasileira vigente. No C2, as melhores eficiências (0,674 a 0,675) e potência (4,27 kW) ocorrem quando as vazões são altas e as velocidades são reduzidas (2.500 rpm às 11h e 3.000 rpm às 18h). O C3 se comportou da mesma maneira, produzindo uma potência média de 3,70 kW. Assim, a pressão de saída da bomba e em toda a rede são reguladas, reduzindo quantidade significativa de vazamentos. Com isso, no C2 a BFT recupera 28.038,00 kWh/ano e no C3 32.392,00 kWh/ano. Portanto, o C3 apresentou os melhores resultados, primeiro do ponto de vista hidráulico, em seguida, do energético.

Palavras-chave: RDA; BFT; setorização; operação fora de projeto; vazamentos.

ABSTRACT

Pumps as Turbines (BFTs) can be considered a technical and economical solution to control pressures in Water Distribution Networks (WDNs) as a replacement for Pressure Reducing Valves (PRVs). Their use requires an accurate understanding of the operation under various hydraulic conditions in an RDA (off-design). Otherwise, machine efficiency is reduced, making it impossible to regulate pressure and recover little energy. This study presents a methodology that details pressure regulation in a municipal network using BFTs. The evaluation of pressures in the RDA is done for three scenarios (C1 - PRVs operating 24h; C2 - PAT operating 18h and PRV operating 6h; and C3 - PATs operating 24h). Pump selection and off-design operation is performed using two models from the literature. The machines are simulated at varying speeds to replace the valves. The leakage reduction in the three scenarios is estimated. In all scenarios, there was effective pressure control; in C2 and C3, the PATs regulate the WDN pressure as if it were a PRV and according to current Brazilian legislation. In C2, the best efficiencies (0.674 to 0.675) and power (4.27 kW) occur when flow rates are high and speeds are low (2,500 rpm at 11am and 3,000 rpm at 6pm). The C3 behaved similarly, producing an average power output of 3.70 kW. Thus, the outlet pressure of the pump and throughout the network are regulated, reducing a significant amount of leakage. With this, in C2 the BFT recovers 28,038.00 kWh/year and in C3 32,392.00 kWh/year. Therefore, C3 presented the best results, first from the hydraulic point of view, then from the energy point of view.

Keywords: WDN; PAT; sectorization; off-design operation; leaks.

SUMÁRIO

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	7
2 JUSTIFICATIVA	8
3 OBJETIVOS	9
3.1 OBJETIVO GERAL	9
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
4 RESULTADOS	9

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As Redes de Distribuição de Água (RDAs) tendem a apresentar pressões excessivas às normas legislativas, sejam elas operando por gravidade ou pressurizadas (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2020). Nos casos de pressões excessivas, esses sistemas apresentam potencial recuperação energética que podem contribuir para a geração de energia renovável (FECAROTTA *et al.*, 2018). Isso porque, comumente, Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) são instaladas em RDAs para o controle das pressões. Ao serem usadas, esses dispositivos fazem com que a energia disponível nas redes seja perdida (EBRAHIMI *et al.*, 2021a).

A energia de pressão perdida pelas VRPs pode ser aproveitada para geração de energia elétrica (CARRAVETTA *et al.*, 2014); e é considerada um recurso confiável (FATHI-MOGHADAM *et al.*, 2013). Sendo assim, diversos pesquisadores observaram a possibilidade de recuperar a energia desperdiçada pelas VRPs substituindo-as por Bombas Funcionando como Turbina (BFTs) (LYDON; COUGHLAN; MCNABOLA, 2017).

As BFTs são bombas hidráulicas operando no sentido inverso (CARRAVETTA; FECAROTTA; RAMOS, 2018), que podem desempenhar de forma eficiente o papel de VRPs no controle de pressão e têm a geração de energia como recurso extra (RENZI; ROSSI, 2019). Essas máquinas são mais baratas em comparação às turbinas hidráulicas tradicionais (RENZI; NIGRO; ROSSI, 2020) e são mais adequadas para recuperação de pequenas potências energéticas das válvulas (CARRAVETTA *et al.*, 2013; MCNABOLA *et al.*, 2014).

A literatura está repleta de estudos promissores que objetivaram o controle da pressão e a recuperação de energia em RDAs com o uso de BFTs, que controlam a pressão de maneira semelhante a uma VRP, com a vantagem extra de geração de energia (KRAMER; TERHEIDEN; WIEPRECHT, 2018). Alberizzi *et al.* (2018) estudaram a possibilidade de substituir VRPs por BFTs em uma RDA para controlar a pressão e recuperar energia. Kandi *et al.* (2021) estudaram a seleção de BFTs e mostraram que o controle de pressão na RDA foi significativamente melhorado gerando energia quando o consumo da rede é alto. García *et al.* (2019) combinaram a redução de vazamento com a recuperação de energia em RDAs na Irlanda, considerando substituir o dispositivo de regulação de pressão por BFTs.

Apesar dos resultados animadores destas pesquisas, uma questão ainda está em aberto. As BFTs, conforme apontado por Kandi *et al.* (2021a), devem ser capazes de operar sob diferentes vazões devido às variações de uma RDA ao longo de um dia, o que pode dificultar a seleção da bomba adequada para uma situação específica, além de forçar a máquina a operar fora de projeto (*off-design*).

Na verdade, a variabilidade do fluxo é um dos fatores cruciais na seleção de uma BFT, afetando o ponto de design e a eficiência operacional da máquina selecionada (LYDON; COUGHLAN; MCNABOLA, 2017). E mesmo com os esforços dos pesquisadores, o impacto do uso de BFT em toda a faixa operacional para controle de pressão e recuperação de energia foi menos investigado. Para otimizar o funcionamento dessas máquinas, estudos mais recentes sugerem o uso de BFTs funcionando em velocidade variável (EBRAHIMI *et al.*, 2021b).

Assim, este trabalho consiste em apresentar uma metodologia que considera o funcionamento de BFTs em velocidade variável para recuperação de energia, controle da pressão em uma RDA real e a redução de vazamentos, substituindo uma VRP por BFTs e garantindo pressões adequadas sem interferir no abastecimento de água.

2 JUSTIFICATIVA

Quando se trata de redes de distribuição de água, a quantidade de estudos científicos relacionados à implantação de BFTs nessas unidades mostram-se, até o momento, pouco expressivas (EBRAHIMI *et al.*, 2021c). Uma das causas justifica-se por se tratar de uma tecnologia recente que apresenta vários desafios no processo de aplicação dos métodos. Além disso, Stefanizzi *et al.* (2020) afirmam que a baixa atuação das BFTs no mercado ocorre por falta de conhecimento das concessionárias de água e energia hidrelétrica quanto as suas vantagens, além de desafios e incertezas relacionados a operação dessas máquinas.

Nesse sentido, novas propostas para minimizar os desperdícios de água e otimizar a recuperação de energia são necessários. Há países, incluindo o Brasil, onde os índices de vazamentos representam mais de 40% com relação a água produzida, em contraste aos sistemas de referência onde esses índices representam em média 3% (LIMA *et al.*, 2018). Os vazamentos podem acarretar desperdícios de recursos hídricos e energéticos, podendo reduzir a capacidade do SAA em operar normalmente e contribuir para que haja possíveis cenários de escassez de água (BERARDI *et al.*, 2017). Dessa forma, a proposta da BFT se revela promissora para contribuir na melhoria das dificuldades apresentadas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Selecionar bombas funcionando como turbina para operar em velocidade variável em substituição às válvulas redutoras de pressão em uma rede real, para regular a pressão de funcionamento, reduzir vazamentos e recuperar energia antes desperdiçada pelas VRPs.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar um método de seleção de BFT que considere a operação *off-design*;
- Substituir VRPs por BFTs operando em velocidade variável em uma RDA;
- Analisar três cenários de controle de pressão na RDA;
- Analisar o controle efetivo da pressão na rede, a redução de vazamentos e a recuperação de energia das BFTs.

4 RESULTADOS

Regulação de Pressão em uma Rede de Distribuição de Água Usando Bombas como Turbinas em Velocidades Variáveis para Recuperação de Energia

Juliana Melo de Sousa, Denize Mendes de Castro, Davi Edson Sales e Souza e Raynner Menezes Lopes

INTRODUÇÃO

As economias mundiais são dependentes de fontes confiáveis e acessíveis de eletricidade. Em virtude das agressões ambientais provocadas nos últimos anos, modificações dramáticas dos sistemas de energia em todo o mundo estão ocorrendo. A melhoria contínua dessas fontes garante energia renovável e desenvolvimento sustentável em muitos países do planeta (ALBERIZZI *et al.*, 2020), contribuindo com a prática de alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) na Agenda 2030 (UNITED NATIONS ORGANIZATION - UNO, 2022).

É importante ressaltar que a implantação de energias renováveis como um todo ainda precisa se expandir significativamente para atender as reduções de emissões de Dióxido de Carbono (CO₂), inerentes aos diversos processos de geração (FECAROTTA *et al.*, 2018). Nesse contexto, a busca por caminhos para o aprimoramento do planejamento da expansão de matriz energética renovável é fundamental e urgente, propondo novas abordagens e ferramentas para enfrentar os desafios.

Muitos recursos dispersos na natureza não eram aproveitados no passado devido aos seus custos de desenvolvimento e integração. No entanto, com a inovação tecnológica, alguns desses recursos passaram a ser exploráveis. Deste ponto de vista, os sistemas de abastecimento de água (SAA), em particular a potencial recuperação de energia das redes de distribuição de água (RDAs), beneficiam a geração de energia renovável.

A economia de água e energia é uma das principais dificuldades enfrentadas na gestão dos SAAs. As concessionárias de água estão cada vez mais empenhadas em reduzir o

desperdício de água e energia (XU *et al.*, 2014). Estudos mostraram que cerca de 30 a 40% dos vazamentos em muitos países estão relacionados ao envelhecimento e deterioração dos componentes do sistema e da gestão ineficiente (MUHAMMETOGLU *et al.*, 2017), e 40 a 60% da energia é perdida somente para distribuir água (CABRERA *et al.*, 2010). Os vazamentos estão relacionados com a pressão, que se for excessiva, favorece sua ocorrência (ADEDEJI *et al.*, 2018). O controle da pressão é uma abordagem muito eficaz para a reduzir as perdas em RDAs (VICENTE *et al.*, 2016), e um dos quesitos para promover um abastecimento de água sustentável (KARADIREK *et al.*, 2016).

Via de regra, as Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) são instaladas em Áreas de Medição Distritais (AMDs), resultante do particionamento da RDA em áreas menores para controlar a pressão. As VRPs são dissipadoras de energia e reduzem a perda de água e o risco de interrupções, economizando custos de manutenção (CARRAVETTA *et al.*, 2017). Entretanto, quando utilizadas, a energia disponível em excesso é dissipada e perdida. Por outro lado, para compensar o consumo intensivo de energia nos SAAs, recentemente estudos mostraram que é possível recuperar a energia desperdiçada substituindo as VRPs (CREACO *et al.*, 2020). As turbinas convencionais podem ser uma solução adequada (BORGE-DIEZ *et al.*, 2021; SINAGRA *et al.*, 2017). No entanto, sua aplicação generalizada em redes é custosa, geralmente pelo tamanho reduzido da saída de energia dos locais das VRPs dentro das RDAs (DELGADO *et al.*, 2019a).

As Bombas Funcionando como Turbinas (BFT) constituem outro maquinário que também pode substituir as VRPs. As BFTs são bombas operando no modo reverso, capazes de controlar efetivamente a pressão e recuperar

energia em RDAs (MESCHÉDE, 2019). Estão facilmente disponíveis no mercado, com tamanhos variados, são de fácil instalação e manutenção (SARI *et al.*, 2018). Elas conseguem operar em diversas faixas, com custo de retorno de investimentos menores que as turbinas tradicionais e possibilitam a operação em áreas remotas (MALEKI *et al.*, 2020). A principal dificuldade para sua ampla utilização é a dificuldade em obter as curvas de desempenho no modo reverso, que se detêm aos fabricantes que dificilmente as fornecem (NOVARA; MCNABOLA, 2018).

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; DERAKHSHAN; KONG, 2012); e no número de velocidade específica da bomba (SINGH; NESTMANN, 2010; TAN; 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 PME (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; NIGRO; ROSSI, 2020; STEFANIZZI *et al.*, 2018).

Na literatura, o estudo das BFTs em RDAs segue três grupos (MITROVIC *et al.*, 2021): (i) que consideram um grupo operacional fixo, como fluxo constante e queda por meio de uma BFT; (ii) com foco na seleção de número e/ou localização ótimas de BFTs dentro das RDAs; (iii) consideram pontos de operação variáveis na BFT, com uma faixa de fluxo passando pela máquina, e uma queda de carga ligada a curva de perda de carga da BFT e do tipo de esquema de regulação implementado. Apesar desses estudos, o uso de BFTs de velocidade variável como VRPs para controle de pressão e recuperação de energia tem sido menos investigado (KANDI *et al.*, 2021b).

Estudos anteriores previram que uma maior adaptabilidade operacional poderia ser alcançada controlando a velocidade das BFTs

(CARRAVETTA *et al.*, 2012). Carravetta *et al.* (2013) apontaram a operação de velocidade variável com uma estratégia de controle para aumentar a eficiência e o rendimento energético sob vazão variável em uma RDA, permitindo maior controle de vazão na entrada da máquina. Jain *et al.* (2015) experimentaram BFTs para otimizar parâmetros geométricos e operacionais, como diâmetro do rotor e velocidade de rotação. O ajuste do rotor melhorou a eficiência em condições de operação com carga parcial, enquanto o melhor desempenho das BFTs foi encontrado em velocidades inferiores à nominal. Fecarotta *et al.* (2016a) analisaram a confiabilidade da lei de afinidade na previsão do comportamento de BFTs em velocidades variáveis e utilizaram dados experimentais da literatura. Os resultados mostraram uma discrepância significativa, e um novo modelo foi proposto para minimizar os erros entre as curvas características previstas e medidas.

Kramer, Terheiden e Wieprecht (2018) estudaram uma BFT em laboratório e em campo para melhorar a rentabilidade econômica das usinas de recuperação de energia em aproximadamente 15 kW. As características de vazão e pressão da turbina em diferentes velocidades de rotação foram semelhantes e, portanto, não ofereceram benefícios para aplicações práticas. Ebrahimi; Riasi; Kandi (2021) estudaram a seleção de BFTs na substituição de VRPs em três cenários, considerando bombas de velocidade constante e variável. Os resultados mostraram que a mudança de velocidade produziu uma quantidade de energia um pouco menor, mas com melhor desempenho no controle da pressão da rede

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

eficiência da máquina são afetadas pelo controle de velocidade.

Portanto, o objetivo deste estudo foi apresentar uma metodologia que possibilite o controle efetivo da pressão em RDAs com a utilização de BFTs em velocidade variável em substituição as VRPs estrategicamente posicionadas em uma rede previamente setorizada em AMDs. Com a seleção e a previsão off-design das BFTs apresentadas neste estudo, é possível analisar o funcionamento das máquinas em velocidades variáveis para regular a pressão de trabalho na rede, como se fosse a própria VRP. Como vantagens, foi estimado a redução de vazamentos e a recuperação de energia a partir da operação das BFTs.

METODOLOGIA

Seleção de bombas como turbinas

Para seleção de uma bomba, foi avaliada a associação de modelos para prever o comportamento de BFTs. O primeiro, proposto por Yang *et al.* (2012), considera o Ponto de Melhor Eficiência (PME) da bomba para prever o desempenho da BFT e é descrito pelas Eq. (1) e Eq. (2), onde h é o coeficiente de altura, q é o coeficiente de vazão, η é a eficiência inicial da bomba, H_{BFT} é a altura da turbina da rotação nominal da bomba em [m], H_B é a altura da bomba na rotação nominal [m], Q_{BFT} é a vazão da turbina na rotação nominal da bomba em [m³/s] e Q_B é a vazão da bomba na rotação nominal em [m³/s].

$$h = \frac{1,2}{\eta_B^{1,1}} = \frac{H_{BFT}}{H_B} \quad (1)$$

$$q = \frac{1,2}{\eta_B^{0,55}} = \frac{Q_{BFT}}{Q_B} \quad (2)$$

O segundo modelo foi apresentado por Rossi *et al.* (2019) e leva em consideração a operação da BFT em off-design; o modelo possibilita a reconstrução das curvas de desempenho da BFT apenas com um número limitado de dados de operação no PME. É representado pelas Eqs. (3)-(7), onde ϕ é o coeficiente de vazão, ψ é o coeficiente de altura, η_t é a eficiência da turbina, N é a rotação

em [rps], D é o diâmetro da máquina em [m], e g é a aceleração da gravidade em [m/s²].

$$\frac{\psi_{BFT}}{\psi_{PME,BFT}} = 0.2394R^2 + 0.769R \quad (3)$$

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

$$R = \frac{\phi_{BFT}}{\phi_{PME,BFT}} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{Q}{ND^3} \quad (6)$$

$$\psi = \frac{gH}{(ND)^2} \quad (7)$$

Como já relatado, quando instalada em uma rede, a BFT está sujeita às variações de fluxo e pressão ligadas ao consumo dos usuários. Neste caso, a máquina é quase sempre obrigada a operar em *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 do PME que é condição inicial e tem papel crucial na estimativa do comportamento da BFT.

O modelo foi validado com dados experimentais de BFTs da literatura, que utilizaram 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 (ABU *et al.*, 2019). Além disso, para analisar a confiabilidade do modelo, foi conduzida uma comparação das diferenças relativas entre os dados experimentais e os teóricos, a partir do cálculo do coeficiente de determinação (R^2).

Etapas de seleção BFT

A Fig. 1 ilustra os procedimentos de seleção da bomba utilizada na RDA. A seleção da BFT depende das condições hidráulicas da VRP ($H_{BFT} = H_{VRP}$; $Q_{BFT} = Q_{VRP}$) (etapa 1). A vazão usada para selecionar a bomba é a média das horas de operação da BFT. Um valor inicial de eficiência da bomba (η_i) deve ser

assumido, que segundo Pugliese *et al.* (2016), o valor médio deve ser de 70%; para calcular o corretivo h e q na Eq. 1 e Eq. 2 e identificar os dados da bomba no BEP ($H_{PME,B}$ e $Q_{PME,B}$) (etapa 2). Observa-se que foi considerado que a eficiência da BFT deve ser menor ou igual ao da bomba ($\eta = \eta_B \geq \eta_{BFT}$). No catálogo do fabricante, seleciona-se a família de bombas e, nas curvas características, a velocidade (N), o diâmetro (D) e o rendimento (η_{i+1}) (etapa 3).

Os cálculos das Eq. 1 e Eq. 2 e todo o processo descrito anteriormente devem ser repetidos para identificar o ponto de operação da bomba e da BFT no PME a partir do valor η_{i+1} (etapa 4). Isso é necessário para evitar a arbitrariedade de assumir um valor constante

para várias máquinas e evitar imprecisão e inconfiabilidade nos resultados do modelo. Nesta etapa, deve-se verificar se a condição $H_{PME,BFT} \geq H_{VRP}$ e $Q_{PME,BFT} \geq Q_{VRP}$ é satisfeita. Caso contrário, deve-se escolher outra bomba do catálogo do fabricante. Os coeficientes adimensionais de vazão ($\phi_{PME,BFT}$) e pressão ($\psi_{PME,BFT}$) da BFT no PME são determinados pela aplicação das Eq. 6 e Eq. 7, respectivamente (etapa 5). Finalmente, é atribuído um intervalo para ϕ_{BFT} , considerando o valor de $\phi_{PME,BFT}$. Com Eq. 3 e Eq. 4, o coeficiente de pressão adimensional (ψ_{BFT}) e a eficiência (η_{BFT}) da BFT a partir do intervalo arbitrado de ϕ_{BFT} são determinados (etapa 6).

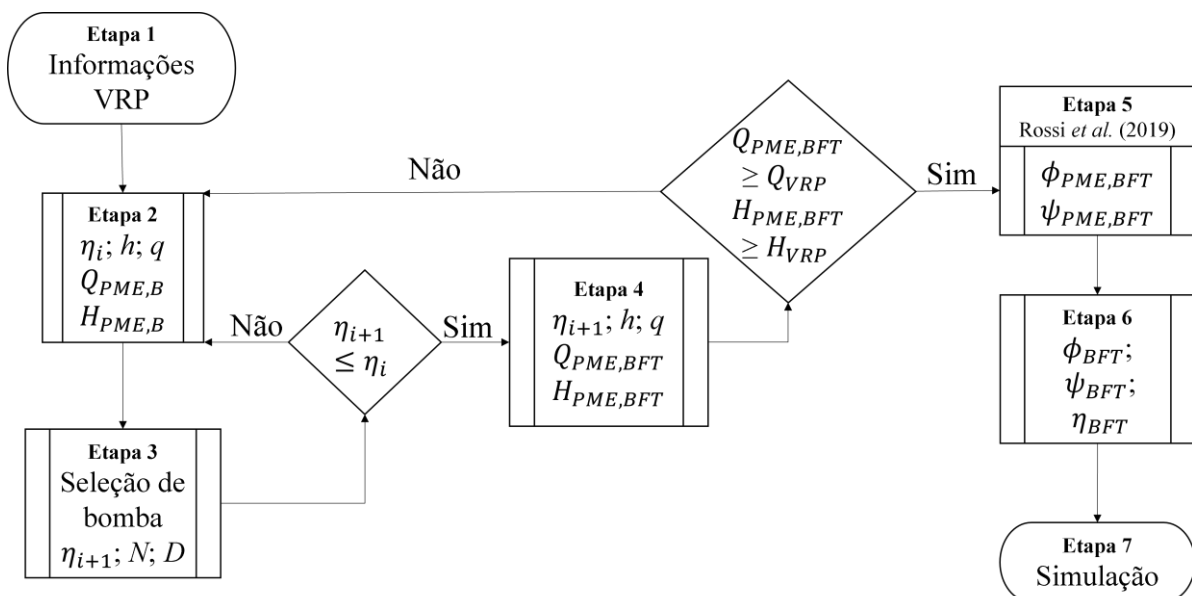


Figura 1 – Procedimento para aplicação dos métodos de seleção de BFT.
Fonte: Autores (2022).

Utilização de BFTs em substituição às VRPs

Cenários da operação da BFT

A Fig. 2 (a) mostra a instalação da VRP_1 composta por um sistema de *bypass* com o funcionamento da VRP_2 em paralelo (Cenário 1 - C1). Este esquema possui duas válvulas on-off (V_{of1} e V_{of2}) para controlar a direção do fluxo e outra (V_{of3}) para manutenção emergencial da VRP_1 . No cenário 2 (C2), a BFT_1 substitui a VRP_1 . A bomba está programada para funcionar das 6h00 às 23h00. Das 23h01 às 5h59, o *bypass* é acionado e

garante o funcionamento da VRP_2 , que dissipa o excesso de pressão. Ao iniciar o expediente, V_{of1} abre permitindo o fluxo da BFT. Ao final do expediente, V_{of1} fecha e V_{of2} abre, direcionando o fluxo para a VRP_2 , conforme a Fig. 2 (b). De forma análoga, no terceiro cenário (C3) a BFT_1 funcionará das 6h às 23h. Porém, das 23h01 às 5h59, a VRP_2 será substituída pela BFT_2 , como apresentado na Fig. 2 (c). Em C2 e C3, a operação das bombas ocorrerá em velocidade variável. Será analisado em primeiro lugar a regulação da pressão e a redução de vazamentos e, como tecnologia extra, a recuperação de energia.

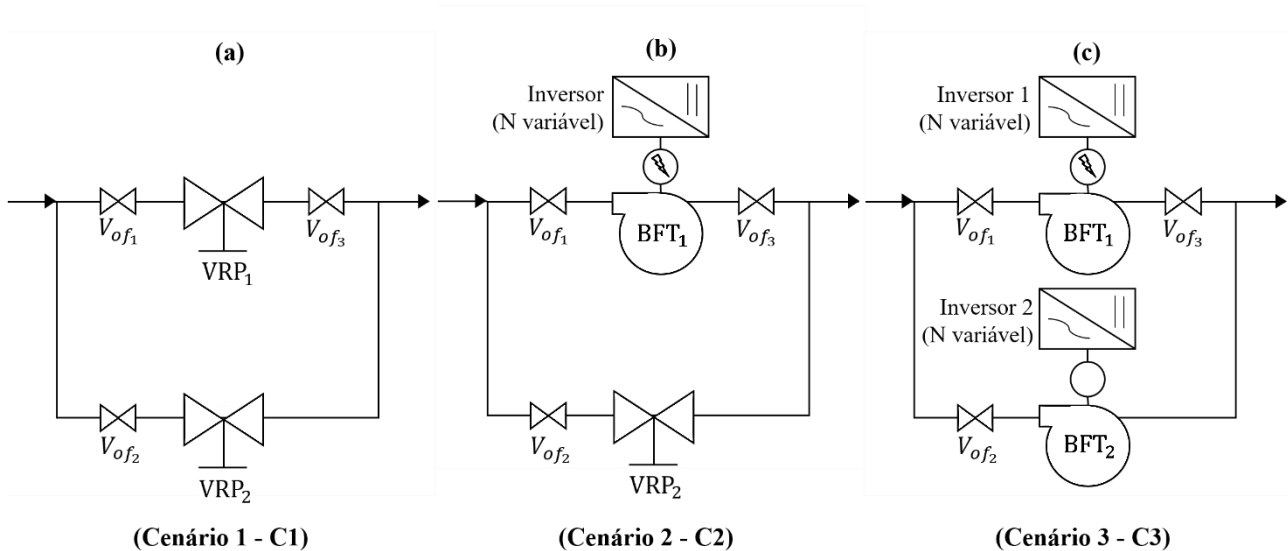


Figura 2 – Cenários de operação: (a) duas VRPs em paralelo, (b) uma BFT em paralelo a uma VRP e (c) duas BFTs em paralelo.

Fonte: Autores (2022).

Controle da velocidade de BFTs

A variação de velocidade é modificada para adaptar a BFT às novas condições operacionais de uma rede, impostas pelas vazões e perdas de carga dependentes do consumo do usuário. A curva BFT é deslocada para garantir a mudança no ponto de operação e a maior eficiência ao invés de alterar a curva do sistema inserindo perdas de pressão (MORABITO; HENDRICK, 2019). Resumidamente, a uma determinada vazão, o valor da altura manométrica de saída da BFT aumenta com o aumento da velocidade.

Para isso, foram consideradas as informações referentes à máquina selecionada em seu PME, que são inseridas nas Eq. (3) e Eq. (5) para determinar a pressão (H) na velocidade de rotação selecionada. Em seguida, as leis de afinidade das turbomáquinas são utilizadas para determinar novas velocidades de acordo com as características impostas pela RDA. Essas leis reportam o desempenho de um protótipo conhecido ao de uma máquina semelhante, permitindo a previsão das curvas de desempenho de bombas semelhantes (MORANI *et al.*, 2018). Em particular, eles consideram que para bombas iguais com diferentes velocidades de rotação, o diâmetro da máquina é igual ao do protótipo ($D_1 = D_2$). As Eq. (8-10) mostram as leis de afinidade que

governam as relações entre a velocidade de rotação, N , vazão, Q , pressão, H , e potência hidráulica, P .

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}; \quad (8)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (10)$$

Controle da pressão e redução de vazamentos

Nesta etapa será avaliado a regulação da pressão da RDA pelas bombas ao substituir as válvulas. Na verdade, a operação da BFT deve manter as mesmas condições operacionais da VRP substituída, ou seja, o controle na pressão de saída, a diferença de pressão ou perda de carga (ΔH) provocada em determinado tubo e a manutenção da pressão à jusante à máquina.

No Brasil, a pressão recomendada é de 10 mca para a pressão dinâmica mínima e 40 mca para a pressão estática máxima, com limite de até 50 mca em regiões de topografia extrema (ABNT, 2017). Será feita a comparação entre os três cenários propostos com o controle da pressão realizado com as VRPs e as BFTs. Além disso, a redução do volume de vazamentos será quantificada com a aplicação

do método de descargas de área fixa e variável (FAVAD), a partir do emprego de BFTs na rede. O FAVAD consiste em calcular o aumento ou a diminuição do vazamento devido a uma alteração de pressão (SAMIR *et al.*, 2017). A equação Eq. (11) apresenta o método, onde L_0 e L_1 são a quantidade de vazamento em [L/s], antes e após o controle da pressão, respectivamente; P_0 é a pressão inicial e P_1 é a pressão final, em [m] e N_1 representa o expoente de vazamento (0,5 para vazamentos de área fixa e 1,5 para vazamentos de área variável) (MAY, 1994).

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N_1} \quad (11)$$

Recuperação de energia pelas BFTs

Conforme relatado, a BFT deve manter a mesma operação da VRP. Nesse caso, a energia que seria desperdiçada na válvula (ΔH) é recuperada pela bomba, conforme explicado na Eq. 12. O ΔH é a energia recuperável pela BFT, P_m é a pressão à montante da válvula e P_c é o parâmetro de controle da VRP. Quanto maior o valor de ΔH , maior será o aproveitamento energético da BFT. Em sua operação, a bomba absorve a energia e gera uma potência mecânica que pode ser calculada com a Eq. 13. Onde Q_{BFT} é a vazão da turbina, H_{BFT} é a pressão recuperada pela BFT; ρ é a massa específica do fluido; g é a aceleração da gravidade e η_{BFT} é a eficiência da máquina no período de operação.

$$\Delta H = P_m - P_c \quad (12)$$

$$P[kW] = \frac{Q_{BFT} H_{BFT} \rho g \eta_{BFT}}{1000} \quad (13)$$

Estudo de caso

A metodologia descrita anteriormente foi aplicada em uma rede utilizada no trabalho de Souza, Mesquita e Blanco (2021). Ela abastece um bairro do município de Tucuruí, Estado do Pará, região Norte do Brasil (Figura 3). Os autores sugeriram a divisão da RDA em seis áreas de medições distritais, com 14 VRPs para regularizar a pressão nos tubos, visto que a rede apresentava sérios problemas de controle de pressão. Os resultados da presente pesquisa serão apresentados somente para a VRP 3.3 do distrito 3, o maior entre os seis. Como as BFTs devem manter as mesmas condições operacionais das VRPs, a pressão de controle ou de saída da válvula deve ser 10 m e o ΔH de 39,89 (VRP1) e 39,98 (VRP2).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seleção de bombas como turbinas

A Fig. 4 apresenta as curvas adimensionais (a) $\psi-\phi$ e (b) $\eta-\phi$ que representam a tendência da associação proposta (Yang+Rossi). A Tabela 1 relata o resultado do R^2 dos dados do modelo e os dados experimentais da literatura. É possível notar que as curvas obtidas estão em concordância aceitável com os dados experimentais. Além disso, de modo geral, o R^2 se apresentou bem para diferentes máquinas com velocidades específicas distintas. Na comparação com os resultados experimentais de Frosina *et al.* (2017), os coeficientes reduziram, o que não inviabiliza a aplicação do modelo. A validação, portanto, permite generalizar o estudo e prolongar sua aplicação para diversas máquinas, pois reproduziu bem as linhas de tendência dos experimentos, independente do PME da bomba em modo turbina, velocidade específica e eficiência de cada máquina.

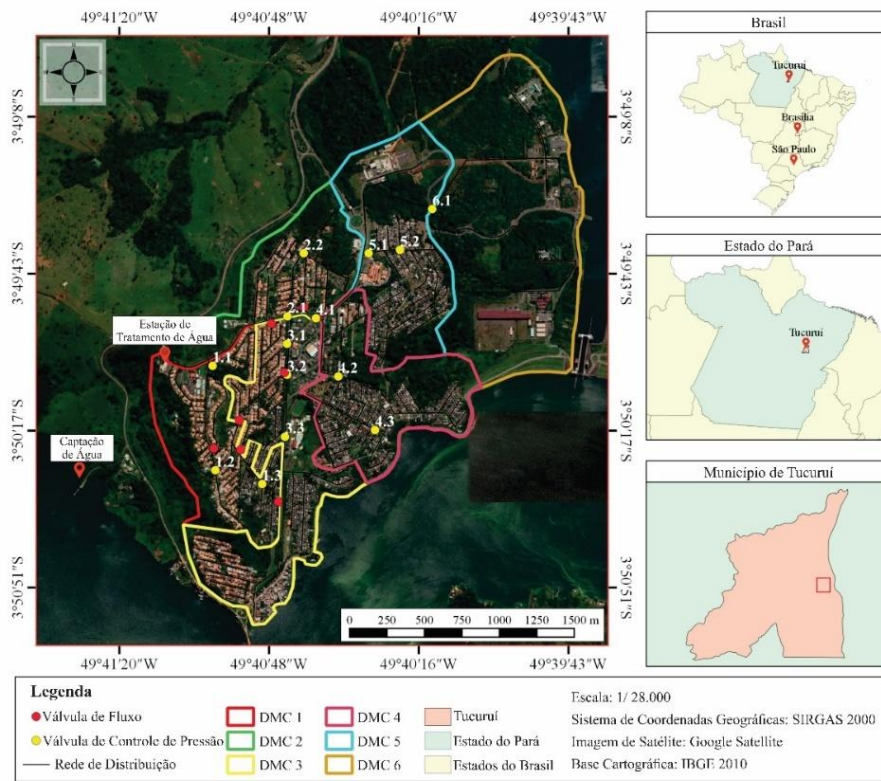
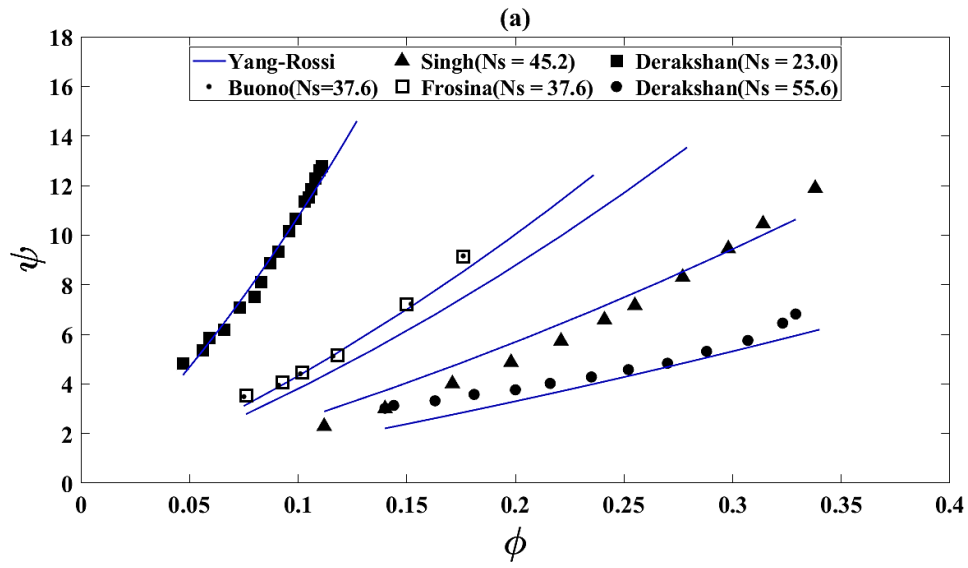


Figura 3 – RDA analisada no estudo de caso.
 Fonte: Souza, Mesquita e Blanco (2021).



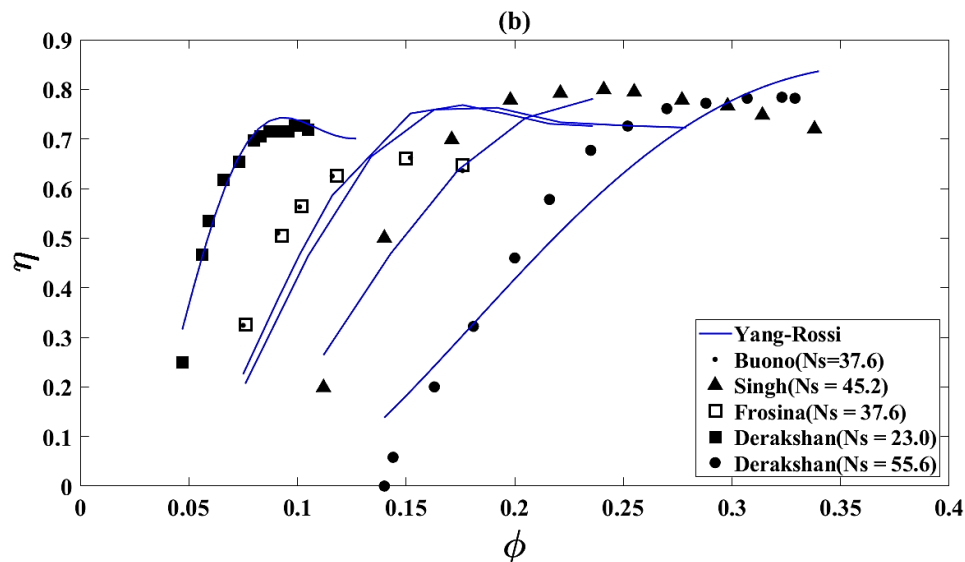


Figura 4 - Validação dos métodos: curvas ψ - ϕ (a) e η - ϕ (b).
Fonte: Autores (2022).

Tabela 1 – Coeficientes de determinação (R^2) resultantes da validação

Método / Autor		Buono (Ns=37.6)	Singh (Ns=45.2)	Frosina (Ns=37.6)	Derakshan (Ns=23.0)	Derakshan (Ns=55.6)
Yang-Rossi	ψ	0.974	0.941	0.645	0.982	0.800
	η	0.722	0.938	0.690	0.963	0.913

Fonte: Autores (2022).

Características das bombas selecionadas

Para C2 e C3, duas bombas com características distintas foram selecionadas, permitindo identificar a operação da BFT em seu PME. As características da máquina no modo bomba e turbina no PME são apresentadas na Tabela 2. Os valores de vazão

e altura são maiores no modo turbina e estão de acordo com a literatura (ROSSI; RENZI, 2018). Os valores obtidos para as BFT₁ e BFT₂ com operação *off-design* são relatados na Tabela 3. Os dados em destaque representam o PME. O modelo produz boas previsões para o comportamento da BFT em condições de projeto e fora de projeto.

Tabela 2 - Características operacionais no PME das máquinas selecionadas.

Características	6h às 23h59min (C2 e C3)		24h às 5h59min (C3)	
	Bomba	Turbina	Bomba	Turbina
Modelo	BFT1 - INI 50-125		BFT2 - INI 32-125.1	
Q [m ³ /h]	48,43	75,48	22,00	36,23
H [m]	22,10	43,45	19,52	42,98
Eficiência [-]	0,685	0,675	0,610	0,596
Velocidade de rotação [rpm]	3500		3500	
Rotação específica [rad/s]	0,75	0,58	0,56	0,41
Diâmetro do impulsor [m]	0,114		0,122	

Fonte: Autores (2022).

Tabela 3 - Valores obtidos para as BFT's operando off-design.

BFT1 - INI 50-125					BFT2 - INI 32-125.1				
φt	ψt	ηt	Q_t (m ³ /h)	H (m)	φt	ψt	ηt	Q_t (m ³ /h)	H (m)
0.196	8.080	0.671	71.12	40.36	0.079	6.637	0.560	30.12	34.26
0.199	8.233	0.673	72.21	41.13	0.083	7.048	0.577	31.65	36.39
0.202	8.388	0.674	73.30	41.90	0.087	7.466	0.588	33.18	38.55
0.205	8.543	0.674	74.39	42.67	0.091	7.892	0.594	34.70	40.75
0.208	8.699	0.675	75.48	43.45	0.095	8.325	0.596	36.23	42.98
0.211	8.855	0.674	76.57	44.23	0.099	8.765	0.595	37.75	45.25
0.214	9.013	0.674	77.66	45.02	0.103	9.213	0.591	39.28	47.56
0.217	9.172	0.672	78.74	45.81	0.107	9.668	0.585	40.80	49.91
0.220	9.331	0.671	79.83	46.61	0.111	10.130	0.579	42.33	52.30

Fonte: Autores (2022).

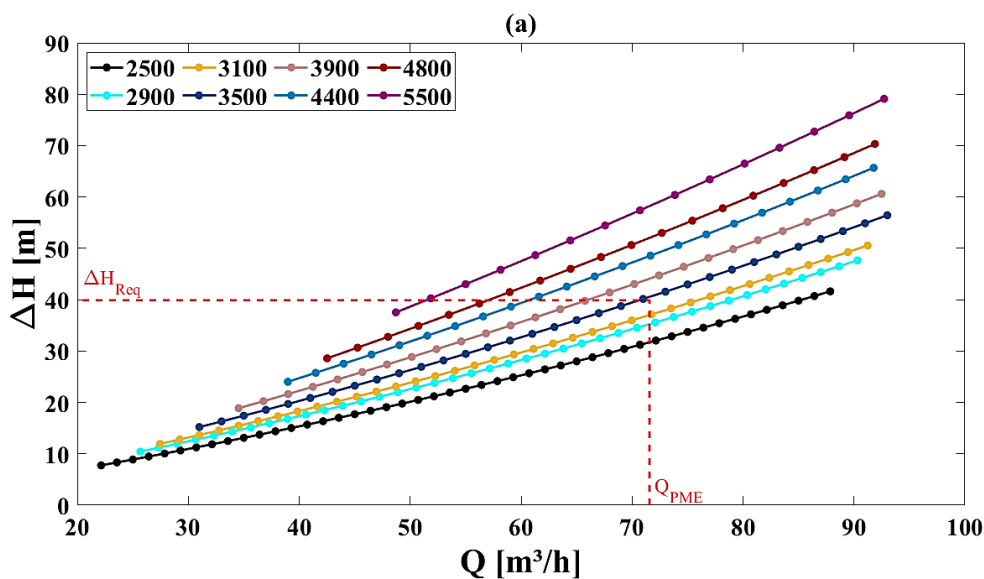
Características da BFT em velocidade variável

Controle da pressão C2 e C3

A Fig. 5 mostra as curvas (a) ΔH - Q e (b) η - Q da BFT₁ operando fora do projeto em velocidade variável para as 18h00 de operação no C2 e C3. Nota-se que a máquina consegue aproximar-se aos valores de ΔH requerido pela VRP1, no caso 39,89 m. Além disso, os melhores pontos de eficiência da BFT ocorrem em uma faixa de vazão mais ampla, não apenas no PME. Da mesma forma, nas 6h00 de operação da BFT2 para o C3, a máquina consegue aproximar-se dos valores de ΔH requerido pela VRP2, no caso 39,98 m, como é relatado da Fig. 5.

No período de 23h10 às 5h59, o *bypass* é acionado e a VRP2 controla a pressão adequadamente (C2). A utilização da válvula operando em paralelo à BFT parece ser uma boa solução para a manutenção da pressão na AMD, principalmente nas primeiras horas do dia, quando as máquinas não conseguem lidar adequadamente com as vazões reduzidas.

Devido aos problemas enfrentados pelas VRPs, como a ocorrência de transitórios hidráulicos em sua operação (ABDEL MEGUID *et al.* 2011). Esses dispositivos são preferidos para atender as mudanças na demanda do usuário em uma RDA, pois podem regular efetivamente uma pressão alta e variável a uma pressão baixa e constante quando a BFT não está operando (COVELLI *et al.*, 2016).



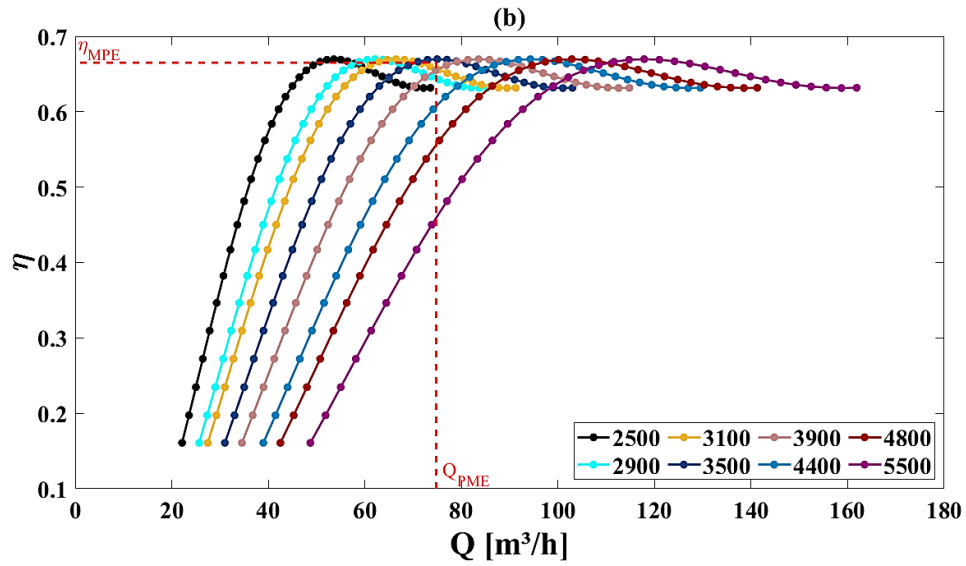


Figura 5 - Curvas (a) ΔH -Q e (b) η - Q do funcionamento da BFT₁ em velocidade variável (18h00 de operação).
 Fonte: Autores (2022).

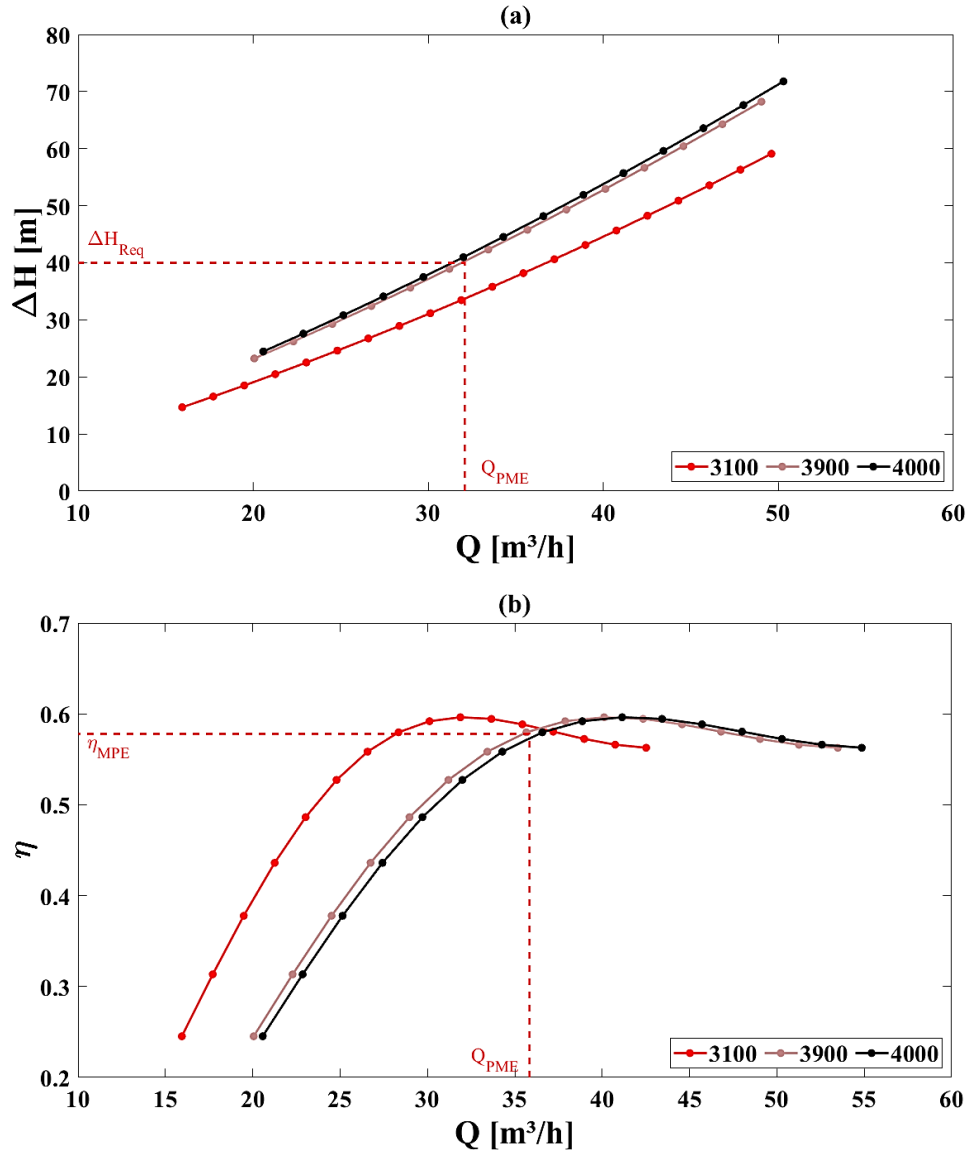


Figura 6 - Curvas (a) ΔH -Q e (b) η - Q do funcionamento da BFT₂ em velocidade variável (6h00 de operação).
 Autores (2022).

Além disso, em ambos os cenários, a pressão de saída é muito próxima de 10 m, conforme relatado na Fig. 7, que compara C1, C2 e C3. A Fig. 8 apresenta os valores de ΔH requeridos pelas BFTs e VRPs. Nota-se que em velocidade variável, as BFTs conseguem

aproximar-se das VRPs, e a pressão na AMD 3 foi devidamente regulada durante as horas de operação em C2 e C3. Para ilustrar, a Fig. 9 compara o comportamento das pressões nodais na AMD 3 em velocidades variáveis em determinados períodos do dia.

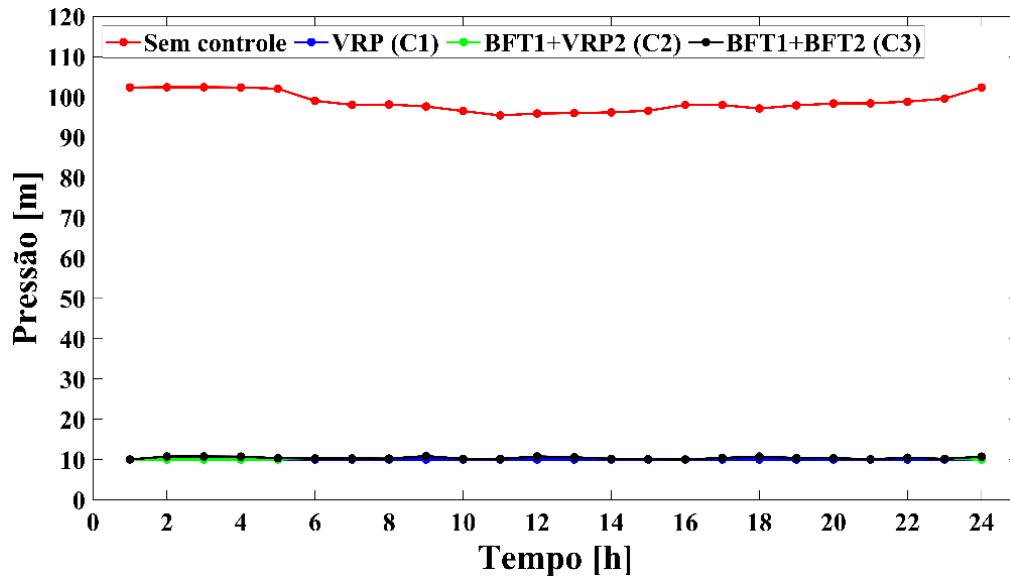


Figura 7 - Pressões de saída nos três cenários de operação. Autores (2022).

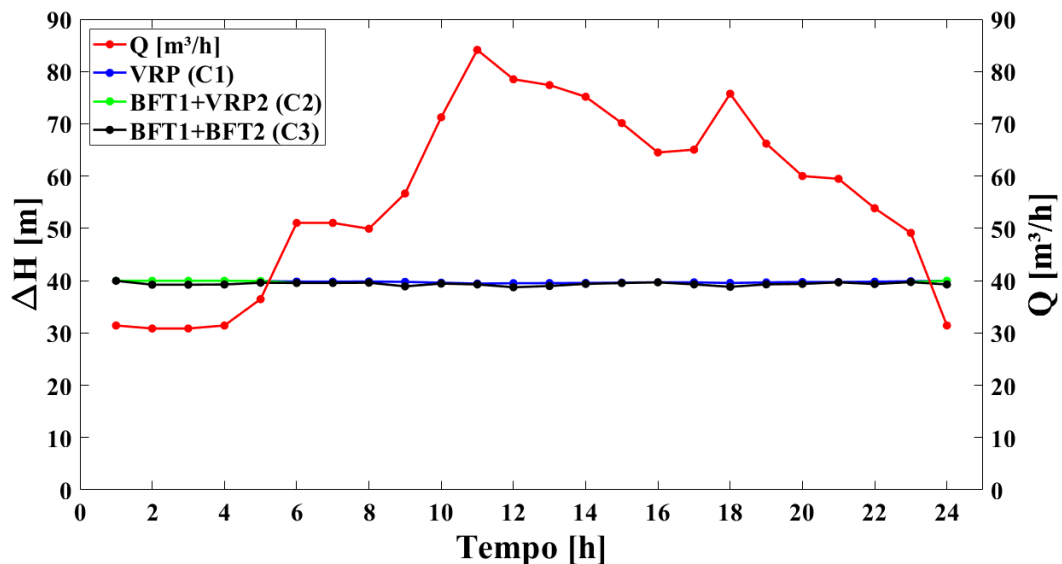


Figura 8 - Perda de carga nos três cenários de operação. Fonte: Autores (2022).

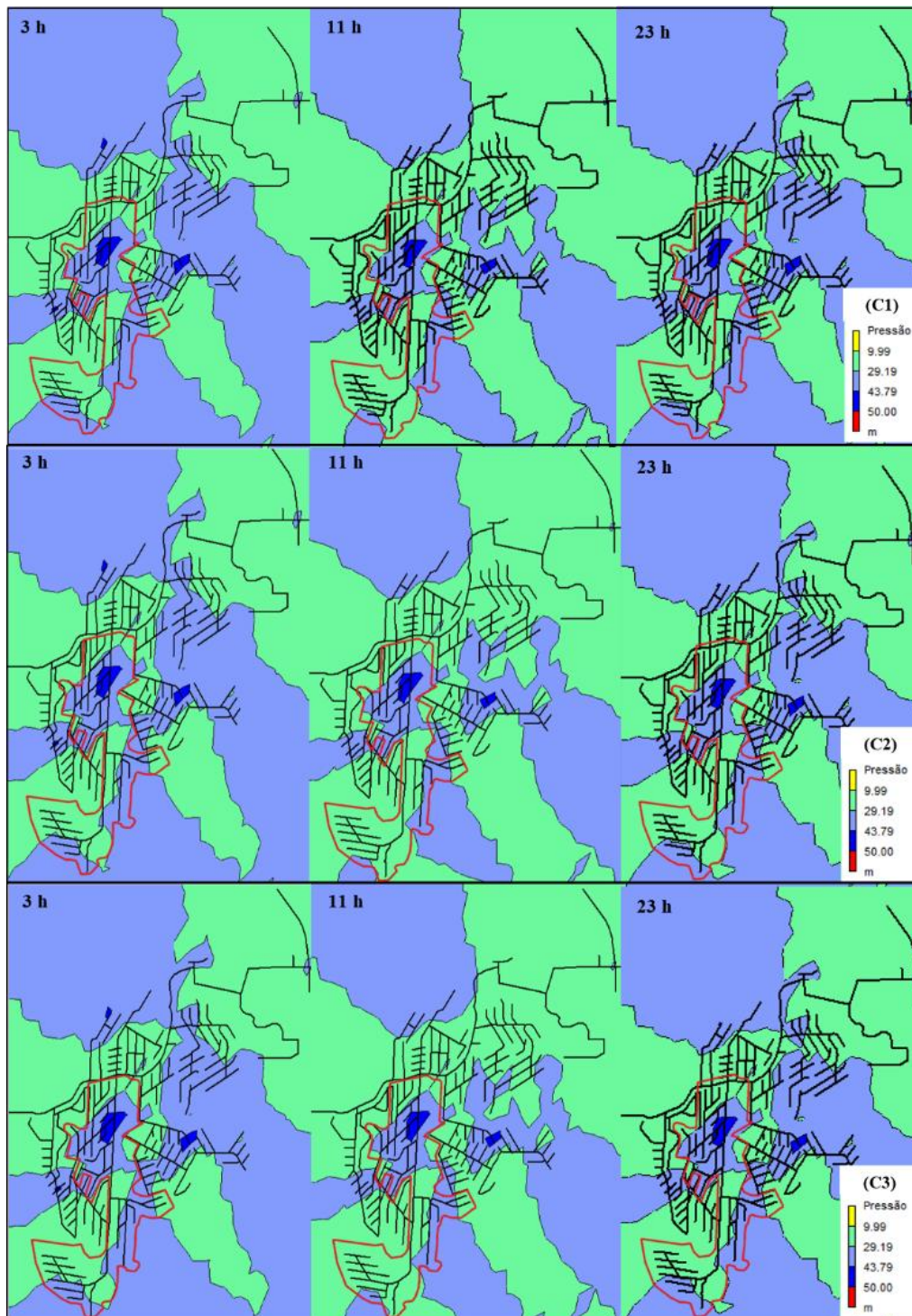


Figura 9 - Pressões nodais na AMD 3 em velocidades variáveis.
Fonte: Autores (2022).

Como observado, em RDAs o controle de velocidade é capaz de aumentar a eficiência e o rendimento de potência da BFT sob condições operacionais de carga parcial e plena (DELGADO *et al.*, 2019). Essa melhoria é particularmente importante se a BFT for usada para regular dinamicamente a pressão ou o fluxo. Neste trabalho, para satisfazer esta condição, à medida que o consumo de RDA aumentava, a velocidade de rotação diminuía,

e vice-versa, conforme relatado na Fig. 10, que mostra a variação da velocidade de rotação de 2.400 a 6.700 rpm atrelada à demanda do consumidor (C2 e C3). Isso foi confirmado nos estudos de Alberizzi *et al.* (2018), que utilizaram BFTs em RDAs com velocidade variável e obtiveram bons resultados de controle de pressão com a ocorrência de vazões maiores. Além disso, a opção de redução da pressão a jusante pode levar à

redução das perdas de água ao longo das tubulações e maior redução da pressão pelas BFTs. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2021), as redes no Brasil perdem 40,10% na distribuição de água devido o estado das tubulações e pela pressão excessiva. Por esse

motivo, o uso de BFTs em velocidades variáveis substituindo as VRPs pode ser uma solução viável para reduzir as perdas persistentes de água e manter um abastecimento adequado.

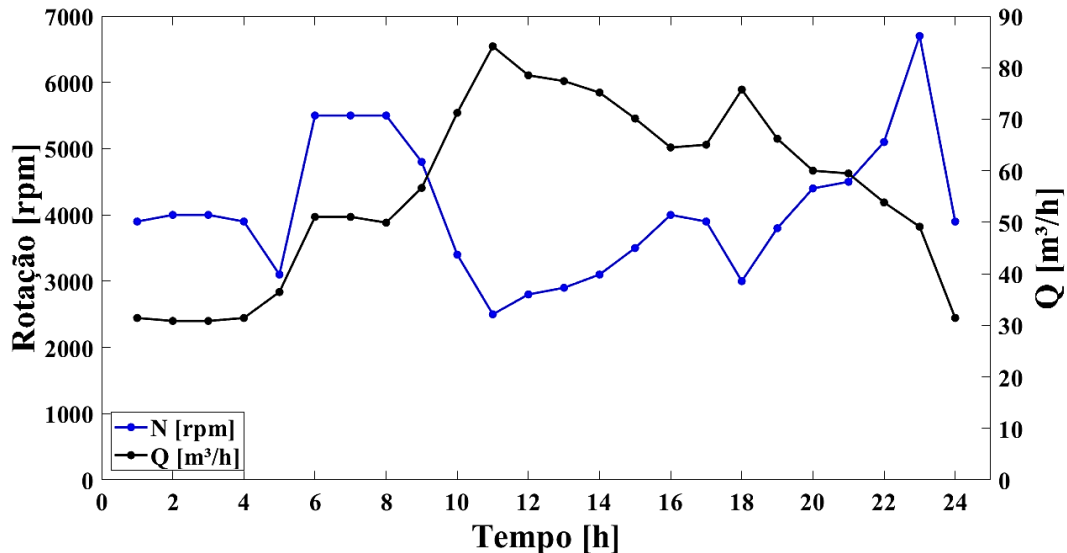


Figura 10 - Relação (Q-N) ao longo das 24h de operação
Autores (2022).

Controle de vazamentos

A partir do emprego de BFTs, os índices de redução de vazamentos são apresentados nos 3 cenários ao longo das 24h00 de operação. Garcia e Nabola (2019) afirmam que a substituição de VRPs por BFTs apresenta-se como uma estratégia eficaz para otimizar a sustentabilidade de uma RDA para redução

de vazamentos. Nesse caso, o C2 demonstrou-se mais atraente do ponto de vista hidráulico. Do ponto de vista hidráulico e energético, o C3 demonstrou maior viabilidade, pois conseguiu controlar a pressão efetivamente, reduzindo quantidade significativa de vazamentos e mantendo o abastecimento aos usuários, e recuperou mais energia.

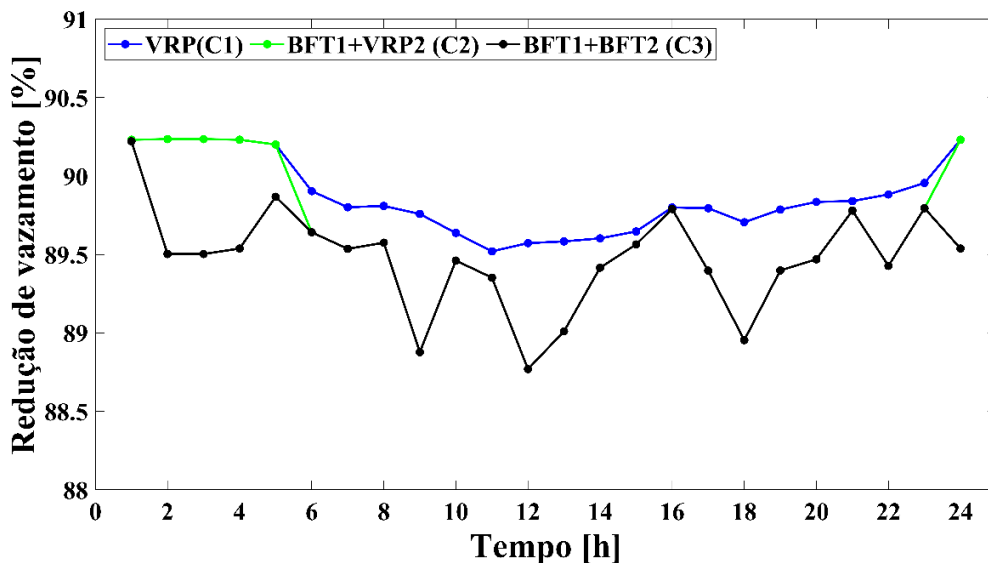


Figura 11 - Relação (Q-N) ao longo das 24h de operação
Fonte: Autores (2022).

Recuperação de energia

A Fig. 12 relata a potência de saída e a tendência de eficiência alcançada por ambas as BFTs em velocidades variáveis em C2 e C3. C2, a potência média da BFT1 é de 4,27 kW (18h00 de operação BFT), enquanto em C3 foi 3,70 kW (24h00 de operação da BFT1+BFT2). As melhores potências e eficiências ocorrem quando o consumo da rede é alto. Por isso, a média da potência no C2 é maior que a do C3, pois, em C2 analisa-se, também, o período da madrugada, quando o consumo na rede é baixo.

Além disso, as velocidades de rotação são reduzidas nas horas de maior consumo, 2.500 rpm às 11h00 e 3.000 rpm às 18h (C2), isto é, a eficiência máxima diminui com o aumento da velocidade de rotação. Por exemplo, em C2 às 11h00, horário de maior consumo na rede, a eficiência foi de 0,685; enquanto às 23h, quando o consumo era praticamente metade das 11h00, a eficiência diminuiu significativamente, chegando a 0,500. Isso vale para o período da madrugada (C3). Os resultados dos estudos de Jain *et al.* (2015) e Lima *et al.* (2018) confirmaram que com o aumento da velocidade de rotação, a eficiência máxima diminui.

Apesar disso, o trabalho de Kramer *et al.* (2018) concluiu que o controle de velocidade

não resultou em benefícios substanciais baseados apenas na proximidade das curvas de descarga características. Além disso, Pérez-Sánchez *et al.* (2018) afirmaram que quando as mudanças na velocidade de rotação da BFT são determinadas usando as leis da afinidade, os erros podem ser significativos. No entanto, os resultados desta pesquisa relataram que a variação de velocidade das BFTs fez com que estas máquinas controlassem a pressão da rede como se fossem as VRPs, favorecendo, assim, a recuperação de 28.038,00 kWh/ano para o C2 e 32.392,00 kWh/ano para o C3. Esses valores seriam suficientes para abastecer aproximadamente 138 e 159 residências brasileiras por um ano, respectivamente, com consumo médio de 200 kWh/mês.

A geração poderia apoiar a segurança do fornecimento de energia no futuro (KYLE *et al.*, 2021) se a concessionária utilizasse o ganho de energia para autoconsumo do sistema. Neste caso, com abastecimento contínuo, garantido pela demanda dos usuários ao longo do dia, sempre haverá recuperação de energia; adaptar, portanto, o SAA para produção com o sistema de BFT tem a vantagem de alavancar os componentes existentes (SAMORA *et al.*, 2016), como tubos, estruturas civis e sistemas de bombeamento pré-existent.

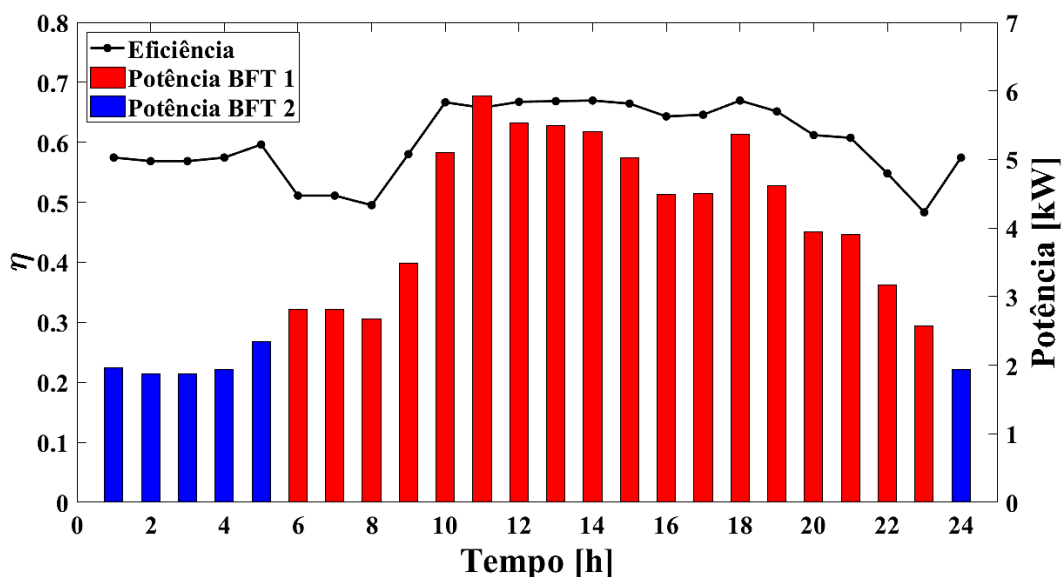


Figura 12 - Potência ao longo das 24h de funcionamento das BFT1 e BFT2.

Fonte: Autores (2022).

CONCLUSÃO

Neste artigo foi analisado o uso de BFTs de velocidade variável em substituição aos VRPs para controle de pressão e recuperação de energia em uma rede, dividida em 6 AMDs com 14 VRPs mantendo a pressão conforme a legislação. A seleção das bombas foi clara e fácil de realizar com base nos dados anteriores das válvulas resultantes da setorização da rede. A validação da associação do modelo proposto mostrou-se confiável e eficiente na construção de curvas BFT *off-design*.

No C1, o controle da pressão foi efetivo, pois nesse cenário, a simulação foi realizada somente com a implantação de VRPs. No C2, com variação de velocidade de 2.500 a 6.700 rpm, a BFT controlou adequadamente a pressão como a própria VRP durante as 18h00 de operação, resultando em um controle efetivo da pressão nodal (10 m a 50 m) em todo o distrito. As melhores eficiências foram observadas em velocidades mais baixas (2.500 a 3.500 rpm) e com o maior consumo na RDA, variando de 0,674 a 0,675 das 10h às 15h e 18h. Na madrugada, a VRP consegue manter a pressão de trabalho na rede, como esperado. Isso resultou em uma potência média de 4,27 kW (BFT₁) e um ganho de energia de 28.038 kWh/ano, suficiente para abastecer 138 residências. Da mesma forma, no C3, com variação de velocidade de 2.500 a 6.700 rpm, a máquina controla adequadamente a pressão como as próprias VRPs durante as 24h de operação, resultando em um controle efetivo

da pressão nodal (10 m a 50 m) em todo o distrito. As melhores eficiências foram observadas em velocidades mais baixas (3100 a 3.900 rpm) e com o maior consumo no RDA, variando de 0,595 a 0,596 das 10h às 15h e 18h. Isso resultou em uma potência média de 3,70 kW (BFT₂) e um ganho de energia de 32.392 kWh/ano, suficiente para abastecer 159 residências.

Como o controle de velocidade das BFTs apresentou bons resultados, o C3 pode ser considerado o melhor cenário, pois regulou a pressão de trabalho adequadamente, reduzindo substancialmente o volume de vazamentos, e recuperou mais energia em comparação ao C2. No entanto, antes de escolher o melhor cenário, é importante avaliar economicamente cada cenário. Para uma companhia de saneamento, o cálculo do retorno de investimento confirma a utilização dessa tecnologia.

A metodologia proposta neste estudo mostrou-se uma boa ferramenta para controle de pressão por BFTs e recuperação de energia renovável em RDAs. O controle de velocidade facilita a adaptação da BFT às condições impostas pela RDA de forma eficiente, operando bem fora do projeto e com vazões mais altas, não apenas no PME. A partir dos resultados obtidos, outras configurações operacionais em velocidade variável podem ser avaliadas em estudos futuros, além da análise econômica das BFTs.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017) NBR 12218/2017: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Acesso em: 07 de novembro de 2022. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=370933>.

ABU-MAHFOUZ, Adnan; HAMAM, Yskandar; PAGE, Philip; ADEDEJI, Kazeem B. Real-time dynamic hydraulic model of water distribution networks. **Water**, v. 11, n. 3, p. 470, mar. 2019.

ADEDEJI, Kazeem B.; HAMAM, Yskandar; ABE, BT; ABU-MAHFOUZ, Adnan. M. Pressure Management Strategies for Water Loss Reduction in Large-Scale Water Piping Networks: A Review. **Springer Singapore**. p. 460-480, jan. 2018.

ADU, Daniel; JIANGUO Du; DARKO, Ransford. O; BOAMAH, Kofi Baah; BOATENG, Emmanuel A. (2020). Investigating the state of renewable energy and concept of pump as turbine for energy generation development. **Energy Reports**. v. 6, p. 60–66, nov. 2020.

ALBERIZZI, Jacopo C.; RENZI, Massimiliano; NIGRO, Alessandra; ROSSI, Mosé. 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**. v. 148, p. 226-233, ago. 2018

BERARDI, Luigi; SIMONE, Antonietta; LAUCELLI, Daniele; GIUSTOLISI. Feasibility of mass balance approach to Water Distribution Network model calibration. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 551-558. 2017.

BORGE-DIEZ, David; GODOY-DÉNIZ, Juan Manuel; LÓPEZ-REY, África; SANTOS, Antonio Colmenar. Pico turbines, the solution to self-supply energy to the water supply network. A case study in Las Palmas de Gran Canaria. **Energy**, v. 229. ago. 2021.

CABRERA, Enrique; PARDO, Miguel A.; COBACHO, Ricardo; CABRERA JR., Enrique. Energy Audit of Water Networks. Journal of Water Resources Planning and Management. **Journal of water resources planning and management**. v. 136, n. 6, p. 669–677, nov. 2010.

CARRAVETTA, A., FECAROTTA, O., DEL GIUDIC, G., & RAMOS, H. Energy recovery in water systems by PATs: A comparisons among the different installation schemes. **Procedia Engineering** v. 70, p. 275–284, 2014.

CARRAVETTA, A., FECAROTTA, O., & RAMOS, H. M. A new low-cost installation scheme of PATs for pico-hydropower to recover energy in residential areas. **Renewable Energy**, v. 125, p. 1003–1014. set, 2018.

CREACO, Enrico; CAMPISANO, Alberto; GALUPPINI, Giacomo; CIAPONI, Carlo. A Bi-objective approach for optimizing the installation of PATs in systems of transmission mains. **Water** (Switzerland), v. 12, n. 2. jan, 2020.

DELGADO, J.; FERREIRA, J. P.; COVAS, D. I. C.; AVELLAN, F. Variable speed operation of centrifugal pumps running as turbines. Experimental investigation. **Renewable Energy**, v. 142, p. 437–450, nov. 2019.

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, jan. 2008.

EBRAHIMI, Shahin; RIASI, Alireza; KANDI, Ali. Selection optimization of variable speed pump as turbine (PAT) for energy recovery and pressure management. **Energy Conversion and Management**, v. 227, jan. 2021.

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, Ali; MOGHIMI, Mahdi; TAHANI, Mojtaba; DERAKHSHAN, Shahram. (2021). Optimization of pump selection for running as turbine and performance analysis within the regulation schemes. **Energy**, v. 217, fev. 2021.
- KARADIREK, İ. Ethem; OZEN, Ozge; KARA, Selami; GULAYDIN, Oguzhan. Energy recovery potential from excess pressure in water supply and distribution systems. **Mugla Journal of Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 70–76, jun. 2016.
- KRAMER, M.; TERHEIDEN, K.; WIEPRECHT, S. Pumps as turbines for efficient energy recovery in water supply networks. **Renewable Energy**, v. 122, p. 17–25, jul. 2018.
- LIMA, Gustavo Meirelles; JUNIOR, Edevar Luvizotto; BRENTAN, Bruno Melo. Selection of Pumps as Turbines Substituting Pressure Reducing Valves. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 676-683, 2017.
- LIU, Ming; TAN, Lei; CAO, Shuliang. Theoretical model of energy performance prediction and BEP determination for centrifugal pump as turbine. **Energy**, v. 172, p. 712–732, abr. 2019.
- LYDON, Tracey; COUGHLAN, Paul; MCNABOLA, Aonghus. Pressure management and energy recovery in water distribution networks: Development of design and selection methodologies using three pump-as-turbine case studies. **Renewable Energy**, v. 114, p. 1038–1050, dez. 2017.
- MALEKI, Ali; GHORANI, Mohammad Mahdi; HAGHIGHI, Mohammad Hadi Sotoude; RIASI, Alireza. Numerical study on the effect of viscosity on a multistage pump running in reverse mode. **Renewable Energy**, v. 150, p. 234–254, mai. 2020.
- MCNABOLA, Aonghus; CORCORAN, Lucy; COUGHLAN, Paul; POWER, Christine. Energy recovery in the water industry using micro-hydropower: An opportunity to improve sustainability. **Water Policy**, v. 16, n. 1, p. 168–183, fev. 2014.
- MESCHEDE, Henning. Increased utilisation of renewable energies through demand response in the water supply sector – A case study. **Energy**, v. 175, p. 810–817, mai. 2019.
- MITROVIC, Djordje; MORILLO, Jorge. García; RODRÍGUEZ DÍAZ, Juan Antonio; MC NABOLA, Aonghus. 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**, v. 147, n. 5, mai. 2021.
- MUHAMMETOGLU, Ayse; KARADIREK, I. Ethem; OZEN, Ozge; MUHAMMETOGLU, Habib. Full-scale PAT application for energy production and pressure reduction in a water distribution network. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 8, p. 401-704, 2017.
- POLÁK, Martin. The influence of changing hydropower potential on performance parameters of pumps in turbine mode. **Energies**, v. 12, n. 11, mai. 2019.
- PUGLIESE, Francesco; PAOLA, Francesco; FONTANA, Nicola; GIUGNI, Maurizio; MARINI, Gustavo. Experimental characterization of two Pumps As Turbines for hydropower generation. **Renewable Energy**, v. 99, p. 180-187, dez. 2016.
- RENZI, Massimiliano; NIGRO, Alessandra; ROSSI, Mosè. A methodology to forecast the main non-dimensional performance parameters of pumps-as-turbines (PaTs) operating at Best Efficiency Point (BEP). **Renewable Energy**, v. 160, p. 16–25, nov. 2020.

RENZI, Massimiliano; ROSSI, Mosè. A generalized theoretical methodology to forecast flow coefficient, head coefficient and efficiency of Pumps-as-Turbines (PaTs). **Energy Procedia**, v. 158, p. 129–134, 2019.

ROSSI, Mosè; NIGRO, Alessandra; RENZI, Massimiliano. Experimental and numerical assessment of a methodology for performance prediction of Pumps-as-Turbines (PaTs) operating in off-design conditions. **Applied Energy**, v. 248, p. 555–566, 2019.

ROSSI, Mosè; RENZI, Massimiliano. A general methodology for performance prediction of pumps-as-turbines using Artificial Neural Networks. **Renewable Energy**, v. 128, p. 265–274, 2018.

ROSSI, Mosè; RIGHETTI, Maurizi; RENZI, Massimiliano. Pump-as-turbine for Energy Recovery Applications: The Case Study of An Aqueduct. **Energy Procedia**, v. 101, p. 1207–1214, nov. 2016.

SARI, Mutiara Ayu; BADRUZZAMAN, Mohammad; CHERCHI, Carla; SWINDLE, Matthew; AJAMI, Newsha; JACANGELO, Joseph G. Recent innovations and trends in in-conduit hydropower technologies and their applications in water distribution systems. **Journal of Environmental Management**, v. 228, p. 416–428, set. 2018.

SINAGRA, Marco; SAMMARTANO, Vincenzo; MORREALE, Gabriele; TUCCIARELLI, Tullio. A new device for pressure control and energy recovery in water distribution networks. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 5, p. 1–14, abr. 2014.

SINGH, Punit; NESTMANN, Franz. An optimization routine on a prediction and selection model for the turbine operation of centrifugal pumps. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 34 n. 2, p. 152–164, fev. 2010.

SOUZA, Davi Edson Sales Souza; MESQUITA, André Luiz Amarante; BLANCO, Claudio José Cavalcante. Pump-as-turbine for energy recovery in municipal water supply networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 11, p. 489, out. 2021.

STEFANIZZI, Michele; CAPURSO, Tommaso; BALACCO, Gabriella; BINETTI, Mario; CAMPOREALE, Sergio Mario; TORRESI, Marco (2020). Selection, control and techno-economic feasibility of Pumps as Turbines in Water Distribution Networks. **Renewable Energy**, v. 162, p. 1292–1305.

TAN, Xu; ENGEDA, Abraham. Performance of centrifugal pumps running in reverse as turbine: Part II -systematic specific speed and specific diameter based performance prediction. **Renewable energy**, v. 99, p. 188–197, dez. 2016

VICENTE, D. J. GARROTE, L; SÁNCHEZ, R.; SANTILLÁN, D. Pressure Management in Water Distribution Systems: Current Status, Proposals, and Future Trends. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 2, p. 04015061, fev. 2016.

XU, Qiang; CHEN, Qiuwen; MA, Jinfeng; BLANCKAERT, Koen; WAN, Zhonghua. Water saving and energy reduction through pressure management in urban water distribution networks. **Water Resources Management**, v. 28, n. 11, p. 3715–3726, 2014.

YANG, Sun Sheng; DERAKHSHAN, Shahram; KONG, Fan Yu. Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance. **Renewable Energy**, v. 48, p. 507–513, dez. 2012.