



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

VICTOR RENAN BARBOSA DA SILVA

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO DE BOMBAS
COMO TURBINA (BFT)**

Tucuruí - PA

2022

VICTOR RENAN BARBOSA DA SILVA

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO DE BOMBAS
COMO TURBINA (BFT)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara.

Tucuruí - PA

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)

S586a Silva, Victor.
ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO
DE BOMBAS COMO TÚRBINA (BFT) / Victor Silva. — 2022.
51 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Júnior Ishihara
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2022.

1. Bomba como turbina BFT. 2. Rede de distribuição
de água RDA. 3. Energia renovável. 4. Recuperação de
energia. I. Título.

CDD 621.042

VICTOR RENAN BARBOSA DA SILVA

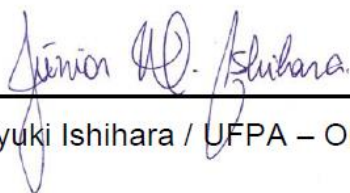
**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO DE BOMBAS
COMO TURBINA (BFT).**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Energias Renováveis.

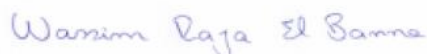
Orientador: Prof. D.Sc. Júnior Hiroyuki Ishihara.

Aprovada em 31 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara / UFPA – Orientador



Prof. Dr. Wassim Raja El Banna - PPGINDE/UFPA – Interno



Documento assinado digitalmente
João Henrique Macedo Sá
Data: 19/04/2022 12:18:15-0300
CPF: 002.596.412-78

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

Dr. João Henrique Macedo Sá - PPGA/ UFSC – Externo

Dedicatória

A minha família, esposa e meus pais, aos quais sou muito grato pelo carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Danielle Fernandes, minha companheira que sempre me encorajou a seguir em frente, me apoiou e foi muito paciente.

Ao meu amigo e professor Davi Sales, que não me deixou desistir e foi fundamental nessa etapa da minha vida.

Ao professor D.Sc. Júnior Ishihara, que compartilha conhecimento, tem paciência e que se dedicou a este trabalho.

Ao programa PPGINDE e a toda sua equipe de professores e técnicos, por tornar viável um mestrado no sudeste do Pará.

A CAPES, que favorece e estimula a pesquisa no Brasil.

Aos amigos que a vida me deu, Bruno Wallacy, Ezequiel Belo, Davi Sales, Miriam Bastos, Antônio Junior, Dandara Fraga, Ariadny Gonçalves dos quais levarei lembranças de união e contribuição de todos.

A Ex-Secretária de Administração do município de Tucuruí, Nerice Chaves que me deu a oportunidade de estudar.

Ao Secretário de Administração do município de Tucuruí, Antonio Reginaldo pelo apoio a Universidade Federal no município de Tucuruí.

Ao meu amigo Jhoanyn Fantin pelo apoio e colaboração neste projeto.

A empresa Tesla Soluções em Energia por fomentar a pesquisa na área de energias renováveis.

A todos que colaboraram para que mais este sonho se transformasse em realidade.

Epígrafe

“Se a educação sozinha não
transforma a sociedade, sem ela
tampouco a sociedade muda”

Paulo Freire

RESUMO

As mudanças climáticas têm intensificado as pesquisas relacionadas à produção de energias renováveis em todo o mundo. Neste sentido, o presente estudo dispõe-se a contribuir com a análise do uso de Bombas Funcionando como Turbina (BFT) em substituição às Válvulas Redutoras de Pressão (VRP), visando tanto o controle da pressão em redes de distribuição de água, assim como, conseqüentemente, o seu aproveitamento para geração energética. A BFT instalada deve ser capaz de operar sob diferentes vazões devido a flutuações na taxa de consumo de água, o que dificulta a seleção da bomba adequada, para tanto, o processo de seleção de BFTs para substituição de VRPs foi otimizado combinando dois métodos de seleção e predição de BFT, Williams (1995) o primeiro método, foi utilizado para selecionar a BFT adequada de acordo com dados de altura e vazão disponíveis na rede, em seguida, o método de Rossi et al. (2019) foi usado para avaliar as curvas características da bomba como turbina, com atenção particular às condições operacionais fora de projeto. Duas Simulações foram realizadas para o processo de otimização, considerando a BFT com velocidade constante, aplicada a uma rede real que foi dividida em 3 áreas de medições distritais (AMD). Na primeira simulação uma BFT foi acrescentada a rede para substituir uma VRP localizada na (AMD 3), na segunda simulação duas BFTs foram acrescentadas a mesma (AMD 3) em substituição a VRPs. Os resultados mostram, na simulação 2, que o controle de pressão foi melhor, além da recuperação de energia elétrica que foi 190,96 kWh/dia ou 69,70 MWh/ano, correspondendo a uma redução de 41,74 toneladas CO₂ não emitidos. Dessa forma, a recuperação de energia foi 267% maior em comparação a simulação 1. Além disso, o controle da pressão também apresentou resultados satisfatórios, ficando dentro dos padrões estabelecidos. Portanto, a combinação dos métodos de Williams (1995) e Rossi et al. (2019), simplificou o trabalho de seleção e predição de BFT com resultados significativos e foi possível concluir que as BFTs funcionando nas horas de maior consumo podem ajustar a pressão padrão necessária e, no restante, as VRPs podem regular a pressão. Neste caso, além de controlar a pressão continuamente, energia renovável significativa pode ser recuperada da RDA

Palavra Chave: Bomba como turbina BFT. Rede de distribuição de água RDA. Energia renovável. Recuperação de energia.

ABSTRACT

Climate change has intensified research related to the production of renewable energies around the world. In this sense, the present study intends to contribute to the analysis of the use of Pumps Functioning as Turbine (PAT) to replace Pressure Reducing Valves (PRV), aiming both at the control of pressure in water distribution networks, as well as , consequently, its use for energy generation. The installed PAT must be able to operate under different flow rates due to fluctuations in the water consumption rate, which makes it difficult to select the appropriate pump, therefore, the selection process of PATs to replace PRVs was optimized by combining two selection methods and PAT prediction, Williams (1995) the first method was used to select the appropriate PAT according to height and flow data available in the network, then the method of Rossi et al. (2019) was used to evaluate the characteristic curves of the pump as a turbine, with particular attention to out-of-design operating conditions. Two simulations were performed for the optimization process, considering the PAT with constant speed, applied to a real network that was divided into 3 district measurement areas (DMA). In the first simulation a PAT was added to the network to replace a PRV located at (DMA 3), in the second simulation two PATs were added to the network (DMA 3) to replace the PRVs. The results show, in simulation 2, that the pressure control was better, in addition to the recovery of electrical energy, which was 190.96 kWh/day or 69.70 MWh/year, corresponding to a reduction of 41.74 tons of CO₂ not emitted. . Thus, the energy recovery was 267% higher compared to simulation 1. In addition, the pressure control also presented satisfactory results, staying within the established standards. Therefore, the combination of Williams' (1995) and Rossi et al. (2019), simplified the work of BFT selection and prediction with significant results and it was possible to conclude that BFTs working at peak consumption hours can adjust the required standard pressure and, in the rest, PRVs can regulate the pressure. In this case, in addition to controlling the pressure continuously, significant renewable energy can be recovered from the WDN.

Keyword: Pump as turbine PAT. Water distribution network WDN. Renewable energy. Energy recovery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 4.1 - Sistemas de abastecimento de água (SAA)(ALFA, 2019).	17
Figura 4.2 - Válvula redutora de pressão BERMAD (BERMAD, 2019).	22
Figura 4.3 - Simulação Hidráulica do Setor II do D. de Irrigação Canal del Zujar.	28
Fig. 1a - Curvas de potência adimensionais da BFT medidas e estimadas.	32
Fig. 1b - Curvas de eficiência da BFT medidas e estimadas.	32
Fig. 2 - SAA dividido em (AMD) com VRPs a montante.	32
Fig. 3 - Rede que abastece o bairro Cristo Vive do município de Tucuruí.	33
Fig. 4 - Variação horária do padrão de consumo da rede.	34
Fig. 5 - Pressões nos Nós, divisão da rede em AMD e o posicionamento das VRP.	34
Fig. 6 - Cenário proposto.	35
Fig. 7 - Curva H(m)-Q(m ³ /s) (a) e Curva η -Q(m ³ /s) (b) – Simulação 1.	36
Fig. 8 - Curva de pressão para o Nó 110, Simulação 1.	36
Fig. 9 - Potência de saída da BFT 1.3.A, Simulação 1.	37
Fig. 10 Curva H(m)- Q(m ³ /s) (a) e Curva η -Q(m ³ /s) (b) – Simulação 2.	37
Fig. 11 - Curvas de pressão para o Nó 110, na simulação 2.	38
Fig. 12 - Potência de saída da BFT 2.3.A, BFT 2.3.B e potência total, simulação 2.	38
Tabela 1 - Informações sobre a divisão de AMDs do estudo de caso.	34
Tabela 2 - Características operacionais no BEP das máquinas selecionadas.	35
Tabela 3 - Comparação entre simulação 1 e 2.	39

LISTA DE SIGLAS

SAA – Sistema de Abastecimento de Água

BFT – Bomba Funcionando Como Turbina

RDA – Rede de Distribuição de Água

AMD – Área de Medição Distrital

VRP – Válvula Redutora de Pressão

DMC – Distritos de Medição e Controle

CFD – Dinâmica de Fluidos Computacional

ETA – Estação de Tratamento de Água

EE – Estações Elevatórias

TH – Turbinas Hidráulicas

MPE – Melhor Ponto de Eficiência

RE – Reservatório Elevado

COP26 – 26ª Conferência das Nações Unidas Sobre as Mudanças Climáticas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 Sistema de Abastecimento de Água	17
4.1.1 Unidades do Sistema	18
4.1.1.1 Manancial	18
4.1.1.2 Captação	18
4.1.1.3 Adução	18
4.1.1.4 Estações Elevatórias (EE).....	19
4.1.1.5 Estação de Tratamento de Água.....	19
4.1.1.6 Reservação	19
4.1.1.7 Rede de Distribuição de Água (RDA).....	20
4.1.2 Avanços na cobertura de abastecimento de água no Brasil e no Mundo.....	21
4.2 Recuperação de energia em redes de distribuição de água (RDA)	22
4.2.1 Pressão Excessiva na Rede de Distribuição de Água.....	22
4.2.3 Válvula Redutora de Pressão (VRP)	23
4.2.4 Divisão da RDA em áreas de medição e controle (AMC).....	25
4.2.5 Turbinas Hidráulicas (TH's).....	26
4.2.6 Bombas funcionando como turbinas (BFT)	27
4.2.7 Localização Ótima das BFT's em Redes de Abastecimento de Água.....	28
4.2.9 Simulações Hidráulicas	29
5 ARTIGO I	31
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

As questões climáticas têm despertado grandes discursões na sociedade, a 26ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP-26) debateu e aprovou o documento que prevê a redução gradativa dos subsídios aos combustíveis fósseis e criou um fundo para financiar medidas para evitar o aumento da temperatura até 2025, uma das preocupações globais é atender às demandas por energia de maneira ambientalmente sustentável. Uma iniciativa promissora são as formas de geração de energia renovável, que constitui em uma alternativa de transição para um sistema menos intensivo em carbono e ambientalmente adequado, além de ser inesgotável ou pode ser reabastecida, proveniente de processos naturais como, energia solar, eólica, geotérmica, hidrelétrica, bioenergética e oceânica (BHATTACHARYA et al., 2016; EIA, 2021).

Até o ano de 2050, a participação de fontes renováveis no atendimento da demanda global de energia deve crescer 50%, tornando-se a principal fonte de geração de eletricidade, fornecendo quase 30% da demanda de energia em 2050, diferente dos 15% ocorridos em 2021 (EIA, 2021).

Grande parte desse crescimento está ligado ao aumento, justamente, da produção de energia hidrelétrica, com pequenas ações de otimização realizadas em grande escala em Sistema de Abastecimento de Água (SAA), especialmente, com a recuperação de energia de pressão disponível nas redes municipais de distribuição de água, reduzindo, portanto, a demanda por novas fontes de energia (LIMA; JUNIOR; BRENTAN, 2017; PÉREZ-SÁNCHEZ et al., 2017).

Os SAAs são responsáveis por fornecerem água potável para as comunidades. A Rede de Distribuição de Água (RDA) é responsável por transportar água aos usuários, e para isso, necessita de energia hidráulica suficiente nas tubulações (ADEDEJI et al., 2018). No transporte da água, as RDAs apresentam muita energia de pressão incorporada nas tubulações, muitas vezes, mais que o suficiente, especialmente em redes que operam por gravidade.

Gupta (2016) afirmou que controlar a pressão em excesso é uma tarefa primordial para uma boa gestão do SAA. A criação de distritos de medição e controle (DMC) (KORKANA et al., 2016) e/ou acrescentar válvulas redutoras de pressão (VRPs) em pontos estratégicos da distribuição (PAOLA et al., 2014), são soluções viáveis para essa finalidade. As VRPs operam como dissipadores de energia de

pressão existente e possibilitam a redução de perdas físicas de água, reduzindo gastos com energia e manutenção (LIMA; JUNIOR; BRENTAN, 2017). Em vez de dissipar o excesso de energia, alguns autores propuseram recuperar a energia incorporada nas RDAs utilizando turbinas (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2018) ou bombas como turbina (BFT) (CARRAVETTA et al., 2017; POLÁK, 2019), que são bombas centrífugas operando inversamente como turbinas para gerar energia. Essas máquinas, além de produzir energia, controlam, de maneira eficaz, o nível de pressão nas tubulações de abastecimento de água (MARCHIORI et al., 2019).

Coelho e Andrade-Campos (2018) indicam que a utilização de algumas turbinas em micro instalações, como a turbina Francis, apresenta eficiência entre 30 e 60%, porém, a fabricação e o projeto são custosos. Outros tipos de turbinas não se adequam ao uso em RDAs, por serem geralmente empregadas em ambientes abertos, onde o canal não está submerso em água (PAISH, 2002; DU et al., 2017).

Por outro lado, as BFTs têm disponibilidade imediata e apresentam o preço de mercado reduzido em relação às turbinas convencionais (NOVARA; MCNABOLA, 2018). Além disso, essas máquinas têm grande disponibilidade em termos de tamanho e peças de reposição e maior faixa operacional de vazão e pressão (ALBERIZZI et al., 2018). Quando utilizadas, entre as várias aplicações das BFTs, provaram ser muito mais eficazes para recuperar energia em tubulações com potência de saída menor que 100 kW (GARCÍA; NABOLA, 2020; LIMA; JUNIOR; BRENTAN, 2017).

O potencial das BFTs no controle da pressão e dos vazamentos e na recuperação de energia, em conjunto com a dificuldade de prever o comportamento em modo turbina, estimularam a criação de modelos para estimar seu desempenho (PUGLIESE et al., 2018). Nos métodos utilizados, o objetivo é aumentar a eficiência e reduzir o impacto energético nas RDAs, relacionados a redução dos vazamentos e dissipação de energia. Porém, a maioria desses estudos são aplicados em redes teóricas e/ou sintéticas, como em Simão et al. (2019) e García e Nabola (2020), respectivamente. As RDAs municipais de médio e grande porte podem apresentar resultados interessantes para a recuperação de energia com o emprego de BFTs (SATISHA; DOSHIB; BADEC, 2021; CHACÓN et al; 2019).

Além disso, muitas pesquisas estão estritamente focadas na substituição de VRPs por turbinas ou BFTs, avaliando, geralmente, a instalação, regulação, operação e eficiência e período de retorno de investimento. No entanto, são poucos

os estudos que analisam problemas relacionados a localização ótima das BFT's e o comportamento em condições fora de projeto (FECAROTTA; MCNABOLA, 2017).

Neste contexto, novas tecnologias devem ter atenção especial dos pesquisadores, pois, parte da geração de energia hidrelétrica deve ser feita através da recuperação de energia potencial incorporada nas RDAs (PÉREZ-SÁNCHEZ et al., 2017). O estudo da viabilidade de implantação de BFTs para a recuperação de energia em SAAs municipais mais robustas, parece ser uma iniciativa promissora de geração de energia renovável, em conjunto com soluções estratégicas que permitam a alocação ótima dessas máquinas em uma RDA, bem como análise da operação em condições fora de projeto.

Vários autores estão investigando e desenvolvendo métodos para predição de BFT. No entanto, poucos métodos conseguem prever o comportamento em condições fora de projeto, outros utilizam Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para obter as curvas características da BFT, tornando o modelo complexo e robusto do ponto de vista computacional. O modelo proposto simplifica o processo de escolha e predição além de combinar dois métodos consolidados na literatura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento de BFTs em RDA no controle de pressão e recuperação energética com a utilização de combinação de métodos de seleção e predição de bombas como turbinas.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar em qual simulação ocorre o maior controle da pressão;
- Analisar a recuperação de energia incorporada na RDA, a partir da melhor configuração de alocação de BFTs em RDAs;

3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esse trabalho está estruturado em modo de artigo, de acordo com as normas do Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético – PPGINDE. Nesse modo de defesa o discente apresenta o artigo submetido em revista na íntegra, precedido dos elementos textuais: introdução, objetivos, revisão bibliográfica. Após a exposição do artigo é apresentada as considerações finais e referências bibliográficas.

A Introdução expõe a problemática do trabalho justificando a relevância do tema, em seguida, apresenta brevemente alguns trabalhos realizados na mesma linha de estudo, demonstrando o estado da arte. Por fim, são apresentados os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2 são apresentados de forma resumida o objetivo geral e específico.

No capítulo 3 tem por objetivo orientar o leitor, apresentando a estrutura do trabalho junto com as particularidades de cada capítulo.

O capítulo 4 apresenta a revisão bibliográfica com todos os conceitos fundamentais relacionadas ao sistema de abastecimento de água e recuperação de energia em rede de distribuição de água por meio de BFT's.

O artigo é exposto no capítulo 5 nos moldes da revista escolhida. Nele estão contidos a metodologia e os resultados/discussões gerados na pesquisa. Revista DAE link: <http://www.revistadae.com.br/site/home>

Finalizando o trabalho são apresentadas as considerações finais e as referências bibliográficas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Sistema de Abastecimento de Água

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) são um conjunto de equipamentos, obras e serviços essenciais para o fornecimento de água em quantidade e qualidade suficientes para atender às demandas dos mais diversos usos das populações. Um SAA convencional no Brasil apresenta algumas unidades típicas como: manancial, captação, estação de tratamento de água (ETA), estação elevatória, adutora, reservatórios e a rede de distribuição, conforme mostrado na Figura 4.1 (GOMES, 2019).



Figura 4.1 – Sistemas de abastecimento de água (SAA) (ALFA, 2019).

Os SAAs possuem fundamental importância para o desenvolvimento e sustentabilidade de uma comunidade, visto que proporcionam melhorias na saúde pública por meio da prevenção e controle de doenças de veiculação hídrica, melhoria nos hábitos de higiene, facilita a limpeza pública e colabora para o conforto e bem-estar da população (TSUTIYA, 2006). Além disso, auxilia no desenvolvimento social de uma sociedade, aumentando média de vida e a produtividade da população, facilitando a implantação de indústrias, turismo e lazer.

4.1.1 Unidades do Sistema

4.1.1.1 Manancial

Consiste em um corpo hídrico, superficial ou subterrâneo, responsável pelo fornecimento da água para o abastecimento. Deve possuir vazão suficiente para suprir a demanda de água da população e a qualidade de sua água deve ser satisfatória em termos sanitários (TSUTIYA, 2006). Os mananciais superficiais são os rios, barragens e lagos, enquanto os subterrâneos são os aquíferos existentes, onde os poços são as principais formas de retirada da água.

4.1.1.2 Captação

São estruturas construídas junto aos mananciais visando a retirada da água, por meio de um conduto, a fim de torná-la pronta para ser transportada às demais unidades do SAA. A categoria do manancial será determinante para sua forma de instalação, por exemplo, para um manancial superficial, as particularidades físicas do corpo hídrico e de suas margens, além das variações sazonais de vazão, pois podem interferir diretamente na captação de água (HELLER; PADUA, 2006).

4.1.1.3 Adução

Canalização destinada ao transporte da água por meio de adutoras de água bruta e adutoras de água tratada, que fazem a comunicação entre as unidades de captação, tratamento, estações elevatórias, reservação e distribuição. Hidraulicamente, as adutoras podem ser em forma de condutos livres, condutos forçados por gravidade ou em recalque (HELLER; PADUA, 2006).

4.1.1.4 Estações Elevatórias (EE)

São um conjunto de obras e equipamentos responsáveis pelo recalque da água até as unidades que possuem níveis menos elevados. Para Lima (2013), as estações elevatórias são constituídas por um ou mais conjuntos motobomba, visando o fornecimento de energia à água, para assim, atingir pressão suficiente para vencer os desníveis topográficos e a perda de carga. Também é comum haver estações elevatórias do tipo “*booster*”, que se destina a aumentar a pressão e/ou vazão em adutoras ou redes de distribuição de água. Do ponto de vista econômico, deve-se evitar a utilização de EE em SAA, pois, sua implantação demanda quantidades excessivas de energia elétrica, impactando nos custos de operação do sistema (GOMES, 2019).

4.1.1.5 Estação de Tratamento de Água

A Estação de Tratamento de Água – ETA, é o conjunto de unidades em que a água bruta se torna adequada ao consumo humano, de forma que suas características se adequem aos padrões de potabilidade (TSUTIYA, 2006) estabelecidos pela resolução no 5, tais como, microrganismos patogênicos, cor, turbidez, odor, sabor, corrosividade, ferro, manganês e sais minerais. O grau do tratamento a ser empregado está sujeito à qualidade da água bruta captada. Lima (2013) afirma que no Brasil, para o tratamento de água proveniente de mananciais superficiais, é comum a realização das etapas de clarificação, que objetiva remover os sólidos presentes na água, desinfecção, que atua na remoção de microrganismos patogênicos, e a fluoretação, que atua na prevenção da cárie dentária dos usuários.

4.1.1.6 Reservação

É o componente do sistema de distribuição de água destinado ao armazenamento de água para atender às demandas de consumo, regularizar as diferenças entre a vazão captada e consumida, condicionar as pressões na rede de

distribuição, além de armazenar água para o combate à incêndios e interrupções no sistema (GOMES, 2019).

4.1.1.7 Rede de Distribuição de Água (RDA)

As RDA's compõem a última unidade de um SAA. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da NBR 12.218 de 2017, que trata dos projetos de redes de distribuição de água, elas são componente dos SAA e são compostas por tubulações e demais acessórios, responsáveis pelo fornecimento contínuo de água potável em quantidade, qualidade e pressão adequadas aos diversos tipos de usuários (NBR12.218, 2017). Para distribuir a água adequadamente, a RDA apresenta muita energia de pressão incorporada nas tubulações. Marchis et al. (2016) e Tricarico et al. (2018) afirmaram que a economia de água e energia é uma das principais dificuldades encontradas no gerenciamento de SAA, pois, de fato, nessas unidades ocorrem perdas de água que refletem no desperdício de energia. De acordo com Venturini et al. (2017), as perdas estão diretamente ligadas a pressões excessivas na rede que, dependendo do tipo, podem ocasionar desabastecimento.

Segundo Nascimento (2009), independentemente do tipo de RDA, esta é constituída por condutos classificados em condutos principais e secundários. Onde os principais possuem maior diâmetro e têm a finalidade de abastecer os condutos secundários, estes de menor diâmetro, que por sua vez, abastecem a região de consumo do sistema. De acordo com o sentido do fluxo de escoamento secundário e desenho, a RDA pode ser classificada em:

- RDA Ramificada;
- RDA Malhada;
- RDA Mista.

A RDA ramificada é abastecida por uma tubulação tronco e alimentada por um reservatório a montante ou por um sistema de pressão por bombeamento direto para os condutos secundários. Dessa forma, em qualquer trecho da RDA é possível identificar o sentido da vazão. Esse tipo de rede é indicado para pequenas

comunidades por conta do baixo investimento para implementação. Em contrapartida, se houver problema em qualquer parte da rede, toda a área a jusante é prejudicada (NASCIMENTO, 2009).

A RDA malhada, por sua vez, é constituída por anéis ou malhas que permitem sentido bilateral de vazão em função da demanda. Dessa forma, é possível alimentar o sistema por vários caminhos diferentes proporcionando maior flexibilidade para atender a demanda e minimizando as interrupções de fornecimento de água em caso de manutenção da rede (NASCIMENTO, 2009).

A RDA mista, apresenta características tanto da rede ramificada quanto da rede malhada. Os projetos de RDA mista são desenvolvidos de forma a minimizar os custos de implementação. Assim, nos casos em que não for possível interligar as extremidades dos condutos, esses são deixados separados (NASCIMENTO, 2009).

4.1.2 Avanços na cobertura de abastecimento de água no Brasil e no Mundo

A água potável é acessível a menos da metade da população mundial e as diferenças entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento é grande. Nos países africanos, a situação de falta de água atinge índices críticos, pois a média de consumo diário é de 10 a 15 litros por pessoa, entretanto, nos EUA, o consumo de água potável para um único cidadão chega a ser de dois mil litros por dia (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2020).

No início dos anos 2000, cerca de trinta países que conviviam com os problemas decorrentes da escassez de água, dentre os quais Kuwait, Emirados Árabes Unidos e as Ilhas Bahamas apresentaram situação crítica (TUNDISI, 2003). O Brasil tem o privilégio de possuir cerca de 12% de toda a água doce do mundo, mas a distribuição deste recurso não é uniforme. Quase 80% de toda a água doce do país estão concentradas na Região Hidrográfica da Amazônia, enquanto que a maior parte da população está na região Sudeste (REGO et al., 2020).

Dentre os principais usuários de recursos hídricos está o saneamento, que no Brasil é amparado pela Constituição Federal de 1988 e a Lei do Saneamento Nº 14.026, de 15 de julho de 2020, a qual tem como princípio fundamental a universalização dos serviços, que nada mais é que a “ampliação progressiva do acesso de todos os domicílios ocupados ao saneamento básico” (REGO et al., 2020). Entre os serviços de saneamento mencionados está o abastecimento de

água para fins potáveis, que faz parte das metas de desenvolvimento da ONU, pois tem impacto direto nos indicadores relacionados à mortalidade infantil, à saúde da população, à erradicação de doenças vinculadas a água (como Cólera, Febre Tifoide, Giardíase, Amebíase, Hepatite infecciosa, Diarreia Aguda entre outras) e à sustentabilidade ambiental como um todo (ALENCAR et al., 2019).

O custo previsto para fomentar o acesso aos serviços de saneamento básico de 2014 a 2033 é na ordem de R\$ 508 bilhões e o custo para universalizar o abastecimento de água e a coleta de esgoto sanitário é de R\$303 bilhões em 20 anos. O Governo Federal Brasileiro, por meio do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), já destinou mais de R\$70 bilhões em obras ligadas ao saneamento básico e a cobertura dos serviços de água tratada ainda é de aproximadamente 83,5% dos brasileiros. Em 2016, ainda havia quase 35 milhões de brasileiros sem o acesso ao saneamento básico e uma em cada sete mulheres não tinham acesso à água tratada no País (TRATA BRASIL, 2019).

Dos atuais problemas do SAA Brasileiro destacam-se, as perdas por vazamento em adutoras, ligações clandestinas, fraldes em hidrômetros, ausência de cadastramentos de clientes (TRATA BRASIL, 2019). As perdas de água são um problema social, econômico e ambiental e no Brasil elas têm aumentado e segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento no ano de 2017 foram de 38,3% (BRASIL, 2018). Entretanto, esse valor pode ser maior, uma vez que as perdas de água são contabilizadas apenas nas RDAs.

4.2 Recuperação de energia em redes de distribuição de água (RDA)

4.2.1 Pressão Excessiva na Rede de Distribuição de Água

As pressões hidráulicas em uma RDA possuem grande importância para funcionamento adequado de um SAA, com influência nos custos de implantação e operação do sistema e na qualidade do serviço. Segundo TSUTIYA (2006), dois tipos de pressões exercem fundamental importância em uma RDA: a pressão dinâmica mínima e a pressão estática máxima.

Para Heller e PADUA (2006), a pressão dinâmica mínima permite que a água consiga vencer os desníveis topográficos e chegar aos usuários, nos dias e horas de maiores consumos e quando o nível de água no reservatório de distribuição seja

mínimo. Enquanto a pressão estática máxima tem a função de garantir que os tubos, conexões e válvulas componentes da RDA não sofram avarias, reduzindo as perdas de água na rede de distribuição e nos ramais prediais, quando não há consumo na rede e o nível de água no reservatório for máximo (HELLER; PADUA, 2006).

No Brasil, a NBR 12.218 da ABNT (2017), estabelece que a pressão dinâmica mínima, em qualquer ponto das canalizações de distribuição, deve ser de 100 kPa (10 mca) e a pressão estática máxima deve ser de 400 kPa (40 mca), podendo chegar a 500 kPa (50 mca) em localidades topograficamente acidentadas.

A ocorrência de pressões em desconformidade com os limites normatizados pode comprometer o bom funcionamento da RDA. O não atendimento das condições de pressão dinâmica mínima pode ocasionar intermitência no abastecimento. Por outro lado, quando as pressões se encontram acima da pressão estática máxima, apresentam inconvenientes como perdas de água provocadas por vazamentos, maiores custos com eletricidade na distribuição, devido a maior incidência de perda de carga na rede, desgaste dos equipamentos, etc. (NBR12.218, 2017).

4.2.3 Válvula Redutora de Pressão (VRP)

Para que as pressões em uma RDA sejam regularizadas, alguns dispositivos são utilizados para dissipar a energia, uniformizando e controlando as pressões nas tubulações. Sosnoski (2015) afirma que as válvulas redutoras de pressão (VRP) são as mais conhecidas destas ferramentas. Seu acionamento é feito hidráulicamente e possibilitam a regulação das pressões em determinadas áreas. A atuação das VRPs se baseia na geração de perda de carga localizada por meio do acionamento de um dispositivo de controle para o fechamento da válvula, a fim de reduzir as pressões a jusante (Figura 4.2). Quando a situação é inversa, ou seja, a pressão a jusante estiver muito baixa, o dispositivo de controle abre a válvula para que ocorra a redução da perda de carga localizada, até que as pressões se normalizem (LIMA, 2013).

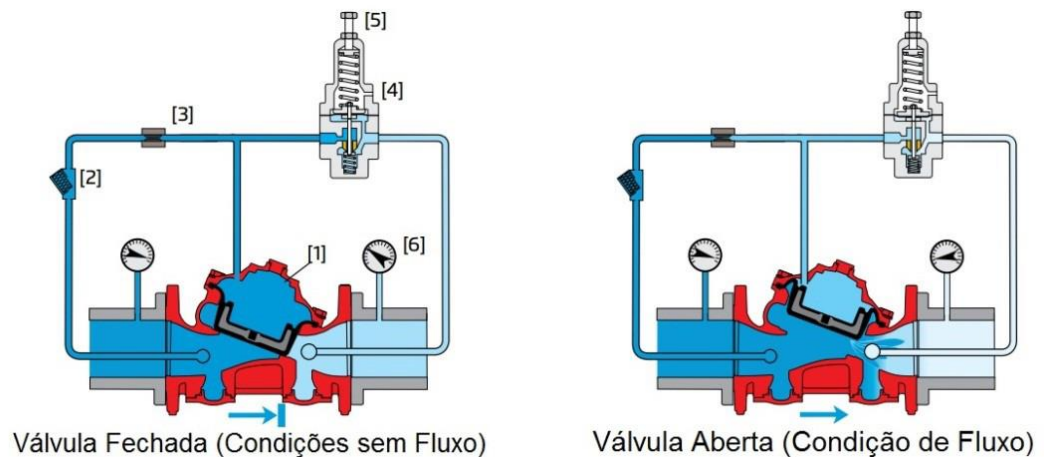


Figura 4.2 – Válvula redutora de pressão BERMAD (BERMAD, 2019).

A válvula de controle de pressão BERMAD Modelo 42T reduz a pressão da água automaticamente de uma alta pressão de entrada para uma pressão de saída predefinida mais baixa. A pressão de ajuste da saída pode ser calibrada através do parafuso de ajuste piloto [5]. A válvula opera em condições estáticas e de fluxo. A válvula piloto de redução de pressão [4] detecta alterações na pressão de saída [6] e modula a válvula de controle para manter a pressão de saída predefinida. Quando a pressão de saída aumenta acima da pressão predefinida, a válvula piloto acelera, permitindo que a pressão se acumule na câmara de controle [1], isso faz com que a válvula de controle se feche ainda mais e reduza a pressão de saída. Quando a pressão de saída cai, a válvula piloto se abre mais, liberando a pressão da câmara de controle. O que faz com que a válvula de controle se abra mais e aumente a pressão de saída. Um restritor integral [3] controla a velocidade de fechamento da válvula. Para os tamanhos de válvula 12", 14" e 16", é fornecida uma válvula de agulha ajustável.

Para Lima, Junior e Brentan (2017), independente da forma de controle, esses dispositivos acabam desperdiçando a energia de pressão existente. García e Nabola (2020), Carravetta et al. (2017) e Ferreira (2017) citaram que essa energia dissipada pode ser recuperada por meio da substituição de uma VRP por um BFT.

Simão et al. (2019) citaram que essas turbinas pertencem a uma classe específica de microturbinas. Consistem em bombas que trabalham no modo reverso, denominadas de bombas como turbinas (bomba funcionando como turbina - BFT). Lydon, Coughlan e McNabola (2017) afirmaram que 40% do potencial bruto de

energia disponível em uma VRP poderia ser recuperado com a substituição de uma válvula por uma BFT. No entanto, a maioria das capacidades de saída de energia em VRP's, instaladas em RDA's, fica na faixa de 1 a 15 kW (BRADY et al., 2017). Neste caso, Power, Coughlan e McNabola (2017) ressaltam que o custo-efetividade de produção de energia é pequeno. Esse é um dos motivos para o emprego da tecnologia BFT na recuperação de energia em RDA, pois, de fato, não é muito atrativo a utilização de turbinas convencionais para essa finalidade, sabendo que pouca energia será recuperada.

4.2.4 Divisão da RDA em áreas de medição e controle (AMC)

O controle de perdas no SAA pode ser realizado por meio da criação de áreas de medição e controle (AMC) que consistem na divisão da RDA em subsetores visando maximizar o controle e qualidade do serviço. Barreto et al. (2006), citam que o aumento indiscriminado da RDA é prejudicial para o controle operacional do sistema, porque além de ultrapassar a área original, reduz a eficiência hidráulica da RDA. Para Pereira et al. (2010), a setorização ou divisão em (AMC) é a principal ação para melhorar a qualidade do serviço prestado, influenciando diretamente nos aspectos sanitário, ambiental, econômico e social do abastecimento. Barreto et al. (2006) destacam que, apesar dos resultados significativos de controle de pressão realizados com a setorização, alguns gestores resistem em adotar a estratégia de controle por demandar estudos e aquisição de novos equipamentos (Válvulas Redutoras de Pressão, etc.).

Covelli et al. (2016) citaram que, tradicionalmente, para o controle da pressão nas RDA's são instaladas válvulas redutoras de pressão (VRP), que funcionam como dissipadores de energia e possibilitam a redução de perdas físicas de água e dos riscos de interrupções, diminuindo gastos com energia e manutenção. É interessante, no entanto, buscar resultados de otimização da pressão em RDA's, mantendo-a baixa e homogênea, com o atendimento do limite inferior. Se a pressão for muito alta, o sistema sofrerá vazamentos mais sérios, aumento na taxa de danos em tubulações e maior consumo de energia, não atendendo a demanda dos usuários (ZHANG et al., 2020).

Simuladores hidráulicos, acompanhados ou não de outras ferramentas, são frequentemente utilizados para otimizar a distribuição em RDA's. Por exemplo, o *software* EPANET 2.0, utilizado no design da RDA, simulando a distribuição de água com restrições escolhidas pelo operador, como pressão e velocidade, objetivando, portanto, a redução dos custos de energia utilizada na operação desse sistema (GAJGHATE; MIRAJKAR, 2020); (KHATAVKAR; MAYS, 2019).

4.2.5 Turbinas Hidráulicas (TH's)

Carravetta et al. (2017) afirmaram que a utilização de turbinas hidráulicas (TH) para a recuperação de energia em RDA's têm se mostrado uma solução viável para combater essa crescente dependência energética nos dias atuais. Além do aproveitamento energético, as TH's também reduzem a pressão nas tubulações (SAMMARTANO et al., 2017), quando utilizadas na distribuição de água.

Porém, Power, Coughlan e McNabola (2017) citaram que com a miniaturização de turbinas, em função das VRP's geralmente necessitarem de máquinas com capacidade de produção de energia pequena, os custos dos requisitos de capital se tornam pouco atraente para utilização das TH's na recuperação de energia em RDA's. Barbarelli et al. (2017) disseram que, em alguns casos, os custos com o emprego de turbinas chegam a ser 25% de toda a planta projetada. Além do mais, essas máquinas têm componentes dificilmente disponíveis no mercado, o que acaba dificultando sua manutenção.

Binama et al. (2017) reforçaram que o preço mais alto das micro turbinas, devido ao custo de fabricação, é o problema que mais se destaca na sua utilização, quando se considera todo o orçamento do projeto. Instalações micro-hidrelétricas e de pequena escala exigem menos recursos financeiros para operar, porém, são caras para se construir. Nwosu e Madueme (2013) afirmaram que isso está mudando, com turbinas de alta velocidades, menores e mais leves, com maior eficiência.

No entanto, Jain e Patel (2014) disseram que é dispendioso, difícil e demorado desenvolver essas turbinas apropriadas para cada local. Segundo Brady et al. (2017), para uma turbina operar com capacidade na faixa de alguns quilowatts, o custo de fabricação pode chegar a 70% do investimento total. Kaunda, Kimambo e

Nielsen (2014) afirmaram que esse fato caracteriza a turbina em um dos componentes mais críticos de projetos micro-hidrelétricos.

4.2.6 Bombas funcionando como turbinas (BFT)

A disponibilidade imediata de bombas hidráulicas e o preço de mercado reduzido em relação às TH's tradicionais, acabam as tornando uma tecnologia viável e ideal para explorar o potencial energético na distribuição de água (NOVARA; MCNABOLA, 2018); (NOVARA et al., 2019). Por exemplo, Muhammetoglu et al. (2018) estudou as BFT's e concluiu que as bombas operando em sentido inverso, apresentaram resultados significativos para a recuperação de energia em RDA's.

Fecarotta e McNabola (2017) afirmaram que essa tecnologia consiste em dispositivos que podem ser instalados ao longo das tubulações para recuperar energia, além de reduzir a pressão nos nós. São bombas comuns, axiais ou centrífugas, utilizadas como turbinas. Binama et al. (2017) afirmam que as BFT's apresentam menor custo quando comparadas as turbinas tradicionais. As BFTs provaram, que as são muito mais eficazes para recuperar energia em tubulações com potência de saída menores que 100 kW (LAHIMER et al., 2012); (CARRAVETTA et al., 2013); (LIMA; JUNIOR; BRENTAN, 2017).

Além disso, Simão et al. (2019) e Alberizzi et al. (2018) indicam que têm grande disponibilidade no mercado em termos de tamanho e peças de reposição e maior faixa operacional de vazão e pressão. Segundo Barbarelli et al. (2017), a eficiência dessas máquinas será menor que a turbina, porém, como elas são utilizadas para explorar fontes de energia desperdiçadas, isso não será uma desvantagem. Lydon, Coughlan e McNabola (2017) demonstraram que, em locais com pequena capacidade de produção energética, o uso de BFT's para a recuperação de energia se mostrou econômico.

Apesar dos benefícios, as BFT's apresentam desvantagens de eficiência relativamente baixa, quando comparada com turbinas projetadas. Chacón et al. (2019) afirmaram que a ausência do dispositivo de controle de fluxo magnético, ocasiona problemas na geração, onde as condições de entrada se modificam de acordo com a variação de vazão. Isto foi demonstrado por Lydon, Coughlan e McNabola (2017), indicando que a eficiência da BFT pode reduzir 70%,

aproximadamente, da eficiência máxima quando o fluxo estiver em torno de 20% abaixo da vazão do melhor ponto de eficiência (MPE).

4.2.7 Localização Ótima das BFT's em Redes de Abastecimento de Água

Uma tarefa importante para a instalação econômica e viável de BFT's em RDA é a identificação da máquina hidráulica mais adequada e as condições operacionais correspondentes em um local específico, baseando-se tanto na condição de projeto como fora dele (LYDON; COUGHLAN; MCNABOLA, 2017). O potencial das BFT's no controle da pressão, dos vazamentos e na recuperação de energia, em conjunto com a escassez de dados de desempenho de BFT's, estimularam a criação de modelos para estimar seu desempenho (BARBARELLI et al., 2017); (PUGLIESE et al., 2018).

Nos métodos disponíveis na literatura o objetivo é aumentar a eficiência e reduzir o impacto energético nas RDA's, que estão relacionados a redução dos vazamentos e dissipação de energia. Muitas pesquisas estão estritamente relacionadas na substituição de VRP's por turbinas ou BFT's, avaliando, geralmente, à instalação, regulação, operação e eficiência. No entanto, são poucos os estudos que analisam problemas relacionados a predição em condições fora de projeto de BFT's em uma RDA (FECAROTTA; MCNABOLA, 2017).

Neste sentido, foram desenvolvidas estratégias para determinar a melhor localização desses elementos, otimizando o uso de turbinas e BFT's como dispositivo para reduzir vazamentos e gerar energia. Giugni, Fontana e Ranucci (2014) propuseram uma metodologia que otimiza a localização e configuração de BFT's, como um dispositivo para gerar energia em RDA's.

Da mesma forma, Corcoran (2015) compararam abordagens não lineares de programação e algoritmo genético para a localização ideal em uma RDA de dispositivos BFT. Fecarotta et al. (2015) desenvolveram um método dividido em duas etapas, onde os autores identificam a localização ideal de VRP's e, em seguida, algumas dessas VRP's foram substituídas por BFT's, apresentando boa viabilidade econômica.

4.2.9 Simulações Hidráulicas

A Agência de Proteção Ambiental dos EUA desenvolveu um *software* livre chamado 'EPANET 2.0'. Essa ferramenta é utilizada para modelar sistemas hidráulicos e simular a qualidade da água em redes de pressão por um período prolongado, durante todo o período de simulação, o EPANET monitora o fluxo de água, a pressão, a altura da água e a concentração de espécies químicas em cada componente da rede. Um sistema de abastecimento contém diversos elementos como: tubos, nós de tubos, bombas, válvulas e reservatórios ou reservatórios de armazenamento. Através do programa é possível modelar os aspectos físicos da rede e a estrutura é representada por ramos e elementos conectados por nós. Conforme (Fig. 4.3), que apresenta a simulação de uma rede hidráulica do setor II do Distrito de Irrigação do Canal del Zujar, sudoeste da Espanha, utilizada para recuperação de energia e controle de pressão por meio de BFT's. (SATISHA; DOSHIB; BADEC, 2021; CHACÓN et al; 2019).

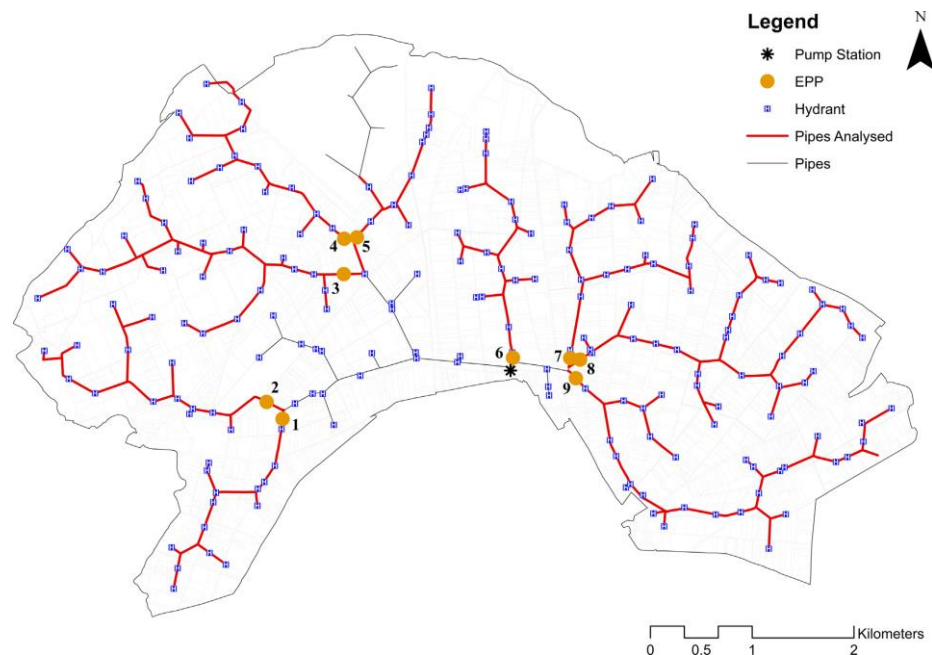


Figura 4.3 – Simulação Hidráulica do Setor II do Distrito de Irrigação Canal del Zujar. (CHACÓN et al; 2019).

O usuário fornece os dados de demanda, limitações etc. em cada nó. O EPANET 2.0 simula e fornece as propriedades de fluxo do SAA, que são úteis na seleção e localização das BFT's para efetuar o controle de pressão e recuperação

de energia. (SAMBITO; PIAZZA, 2021; SATISHA; DOSHIB; BADEC, 2021; CHACÓN et al; 2019).

O EPANET é uma ferramenta muito utilizada pelos pesquisadores para modelar sistemas hidráulicos e simular a qualidade da água em redes de pressão. Por exemplo, Chacón et al. (2020) analisaram cinco distritos de irrigação localizados em Córdoba e Sevilha, sul da Espanha, usando o EPANET, e obtiveram resultados relevantes na recuperação de energia. Sambito et al. (2021) utilizaram o EPANET para simular uma rede teórica numa abordagem estocástica para a solução do problema de otimização multiobjetivo com BFT em SAA. O EPANET otimiza a localização das VRPs, que podem ser substituídas por BFTs (NOVARA et al., 2019; NOVARA; MCNABOLA, 2018). Nesse caso, a otimização prévia prevê a localização ideal de VRPs na rede. Se substituída por uma BFT, pode ser considerado a posição ideal para a operação controlando a pressão e, inclusive, para a máxima recuperação de energia (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021).

5 ARTIGO I

ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO DE BOMBAS COMO TURBINA (BFT)

Victor Renan Barbosa da Silva^{a*}, Junior Hiroyuki Ishihara^b

RESUMO

As redes de distribuição de água (RDAs) necessitam de pressão adequada para entregar água aos usuários. Em alguns casos, a pressão é excessiva e geralmente é dissipada por válvulas redutoras de pressão (VRP), que acabam desperdiçando essa energia contida na rede. Devido à necessidade mundial de buscar tecnologias de geração de energia renovável, pesquisadores estudaram a possibilidade de substituir essas VRPs por bomba funcionando como turbinas (BFT). Trata-se de uma bomba centrífuga operando inversamente em substituição VRP. Como as RDAs operam sob condições variáveis de vazão e pressão, a predição de BFTs ainda encontra dificuldades, o que prejudica seu controle efetivo da pressão quando substituem as VRPs. Esse trabalho analisa uma rede real, no município de Tucuruí, estado do Pará - Brasil, com problemas na gestão das pressões. Localização distintas de VRPs para controlar a pressão da rede foram propostas em duas simulações hidráulicas. As VRPs foram substituídas por BFTs e foi avaliado qual a melhor configuração apresenta maior controle de pressão de abastecimento. A predição dessas máquinas foi realizada por um método conjunto que analisa toda a faixa de operação. Além disso, foi estimado a quantidade de energia recuperada e as vantagens ambientais. Os resultados apontam o controle de pressão nas duas simulações (S_1 e S_2), em S_1 a pressão no Nó mais crítico reduziu 42,80% e a recuperação de energia foi de 52 kWh/dia. Em S_2 , a pressão reduziu 45,21% e a recuperação de energia foi de 190,96 kWh/dia, além de controlar melhor a pressão, os resultados de recuperação de energia foram 267% superiores a S_1 . O método conjunto, proposto na pesquisa, simplificou o processo de seleção e predição de BFT e foi possível concluir que as BFTs devem ser instaladas em paralelo com as VRPs, pois quando as BFTs não podem ajustar a pressão em algumas horas do dia, as VRPs ajustam.

Palavra Chave: Rede de distribuição de água, Predição de bomba como turbina, Controle da pressão, Recuperação de energia

ABSTRACT

Water distribution networks (WDNs) need adequate pressure to deliver water to users. In some cases, the pressure is excessive and is usually dissipated by pressure reducing valves (PRVs), which end up wasting this energy contained in the network. Due to the worldwide need to seek renewable energy generation technologies, researchers have studied the possibility of replacing these PRVs with pump functioning as turbines (PAT). It is a centrifugal pump operating inversely in substitution of PRV. As WDNs operate under varying conditions of flow and pressure, the prediction of PATs still encounters difficulties, which impairs their effective control of pressure when replacing PRVs. This work analyzes a real network, in the municipality of Tucuruí, state of Pará – Brazil, with pressure management problems. Different locations of PRVs to control network pressure were proposed in two hydraulic simulations. The PRVs were replaced by PATs and it was evaluated which the best configuration presents greater control of supply pressure. The prediction of these machines was performed by a joint method that analyzes the entire operating range. In addition, the amount of energy recovered and the environmental benefits were estimated. The results point to the pressure control in the two simulations (S_1 and S_2), in S_1 the pressure in the most critical node reduced 42.80% and the energy recovery was 52 kWh/day. In S_2 , the pressure reduced 45.21% and the energy recovery was 190.96 kWh/day, in addition to better controlling the pressure, the energy recovery results were 267% higher than S_1 . The joint method, proposed in the research, simplified the process of selection and prediction of PAT and it was possible to conclude that the PATs must be installed in parallel with the PRVs, because when the PATs cannot adjust the pressure in some hours of the day, the PRVs adjust.

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

INTRODUÇÃO

As questões climáticas têm despertado grandes discursões na sociedade sobre modelo socioeconômico de produção e consumo que tem proporcionado grandes impactos ambientais e as mudanças são cada vez mais perceptíveis, destacando-se, o aquecimento global e a poluição. As fontes de energia renováveis são parte fundamental da solução para reduzir as emissões, um exemplo viável são as pequenas centrais hidroelétricas aplicadas em sistemas de abastecimento de água (SAA) para recuperação de energia (EBRAHIMI; RIASI; KANDI, 2021). Esses sistemas apresentam grande energia na forma de pressão e o excesso de pressão causa perdas por vazamento. Tradicionalmente, as válvulas redutoras de pressão (VRP) são usadas para controlar a pressão, entretanto, desperdiçam energia. Nesse contexto, as bombas funcionando como turbina (BFT) apresentam-se como uma solução interessante para reduzir a pressão e recuperar a energia contida nas redes de distribuição de água (RDA) (FECAROTTA; MCNABOLA, 2017; LIMA et al., 2018). Essas são bombas comuns, axiais ou centrifugas, operando em modo reverso que, diferente das turbinas tradicionais, apresentam baixo custo e grande disponibilidade no mercado, além de maior faixa de operação em relação a vazão. As desvantagens são a escassez de dados em modo turbina e a dificuldade de prever o comportamento em toda faixa de operação (CARRAVETTA et al., 2017; POLÁK, 2019).

A literatura tem buscado prever o comportamento das BFTs. Os modelos clássicos utilizam o ponto de melhor eficiência da bomba (PME) para encontrar a turbina correspondente. No entanto, poucos investigam toda faixa operacional, ou seja, considerando as variações de vazão e pressão das RDAs. Os métodos que investigam toda faixa operacional são importantes para observar o comportamento da BFT fora do (PME) e a recuperação de energia em toda faixa de operação (FERNÁNDEZ GARCÍA; MC NABOLA, 2020; LIMA et al., 2018). Além disso, muitas pesquisas têm buscado ferramentas de otimização de RDAs, objetivando controlar a pressão e diminuir o volume de vazamentos, uma ferramenta muito utilizada pelos pesquisadores é o EPANET, utilizado para modelar sistemas hidráulicos e simular a qualidade da água em redes de pressão. Por exemplo, Chacón et al. (2020) analisaram cinco distritos de irrigação localizados em Córdoba e Sevilha, sul da Espanha, usando o EPANET, e obtiveram resultados relevantes na recuperação de energia. Sambito et al. (2021) utilizaram o EPANET para simular uma rede teórica numa abordagem estocástica para a solução do problema de otimização multiobjetivo com BFT em SAA.

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

Além disso, pesquisas recentes indicam o potencial de utilização das BFTs para reduzir GEE. Algieri et al. (2020) estudaram a possibilidade de aproveitamento energético em sistemas de irrigação no sul da Itália utilizando bombas como turbinas, e constataram que os sistemas proporcionaram uma queda nas emissões de GEE superiores a 8.800 ton/ano comparado à produção elétrica convencional. Balacco et al. (2020) analisaram a viabilidade técnica e econômica da substituição de VRPs por BFTs em duas RDAs italianas visando a eficiência energética; os autores estimaram, considerando um fator de emissão de 400 g CO_2 /kWh, a redução das emissões de CO_2 em 327.211 kg CO_2 /ano e 20.732 kg CO_2 /ano nas redes.

O objetivo desse trabalho é investigar o controle de pressão e recuperação de energia em sistema de abastecimento de água através de BFT combinando os dois métodos consolidados, Williams (1995) para seleção de BFT e Rossi et al. (2019) para avaliar as curvas características de BFT. A combinação dos métodos, além de selecionar a bomba adequada, deve prever o comportamento em modo turbina em condições fora de projeto. Os dados experimentais de Derakhshan e Nourbakhsh (2008) serão utilizados para validação da metodologia. Em seguida, um estudo de caso será realizado com o objetivo de investigar o controle de pressão e a recuperação de energia, aplicando a metodologia proposta em uma rede de distribuição de água real na cidade de Tukuruí, localizada no sudeste do Pará-Brasil. Por fim, através dos resultados de energia recuperada na RDA, uma análise da quantidade de energia produzida e de redução de emissão de CO_2 será realizada.

METODOLOGIA

Modelo de predição de bombas como turbinas

Nesse estudo, a operação da BFT é analisada como uma VRP. Além disso, selecionar a máquina adequada é importante para a garantia do controle efetivo da pressão na RDA, segundo a legislação específica. E como tecnologia extra, espera-se a máxima recuperação de energia renovável na rede. Dessa forma, a associação de dois métodos já consolidados na literatura científica para prever o comportamento das BFTs é proposta (GAIA, 2021). O primeiro modelo utilizado foi o de Sharma (1985), um método simples que pressupõem a eficiência da BFT sendo igual à da bomba. Este foi melhorado por Williams (1995), que analisou oito diferentes métodos que utilizam dados da bomba no BEP para estimar o desempenho da BFT. A partir das correções, foram geradas equações para duas situações: velocidade da turbina igual à da bomba, Eq. (1) e (2), e velocidade de rotação do BFT diferente da rotação da bomba, Eq. (3) e (4):

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

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

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

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

Onde Q_t é a vazão no ponto de melhor eficiência da turbina, Q_{bep} é a vazão no ponto de melhor eficiência da bomba, η_{max} é a eficiência máxima da bomba, H_t é a altura da turbina no BEP, H_{bep} é a altura da bomba no BEP, N_t é a velocidade de funcionamento da turbina e N_p é a velocidade nominal da bomba.

No segundo método, Rossi et al. (2019), também foi apresentado um modelo de previsão usado para avaliar as curvas características das bombas como turbinas, com atenção particular às condições operacionais fora de projeto. O modelo de previsão foi derivado da reformulação de dados experimentais da literatura mais relevantes das BFTs. A verificação da capacidade de previsão do modelo foi analisada em testes experimentais, nos modos direto e reverso, e confirmada em simulações numéricas para várias taxas de fluxo. As Eq. (5)-(9) o descrevem. Este foi escolhido pela facilidade de aplicação e boa capacidade de predição; onde ϕ é o coeficiente de fluxo, ψ é o coeficiente de altura, η é a eficiência, N é a rotação em [rps], Q é a vazão em [m³/s], H é a altura em [m] e g é a aceleração da gravidade em [m/s²]. Embora os métodos simples que preveem o BEP de BFT sejam menos confiáveis (FECAROTTA; CARRAVETTA; RAMOS, 2011), sua utilização em conjunto com métodos que predizem o comportamento BFT em toda faixa de operação é oportuna, pois, o desempenho do modo turbina de uma bomba inicia com a previsão do BEP, que é condição inicial e tem papel crucial na estimativa da curva BFT fora de projeto.

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

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

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

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

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

Validação do Método

O método proposto neste estudo foi validado com os resultados experimentais de BFT de Derakhshan e Nourbakhsh (2008). As curvas características dos BFT relatados pelos autores serviram de referência para comparação. Na validação, foram utilizadas máquinas com velocidades específicas e eficiências distintas. Esses

parâmetros são úteis para definir o desempenho hidráulico de uma bomba centrífuga, e considerá-los pode ajudar a prever, de forma precisa, o desempenho de uma BFT (NAUTIYAL et al., 2011). A **Fig. 1a** e a **Fig. 1b** mostram, respectivamente, as curvas adimensionais $\psi-\phi$ e $\eta-\phi$ que representam a tendência do método proposto. É possível notar que as curvas obtidas com o método conjunto estão em concordância aceitável com os dados experimentais. Esse processo permite generalizar o estudo e prolongar sua aplicação para diversas máquinas, pois reproduziu bem as linhas de tendências dos experimentos, independente do BEP da bomba em modo turbina, velocidade específica e eficiência de cada bomba.

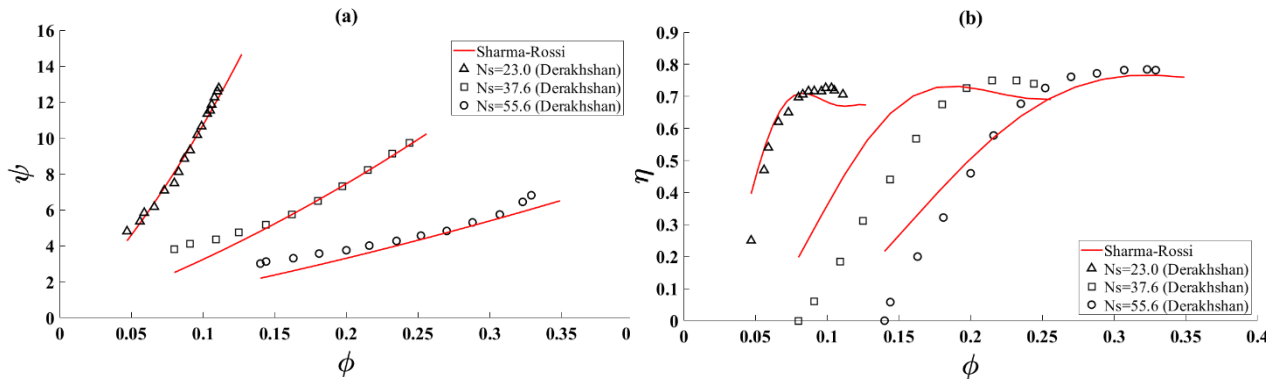


Fig. 1 (a) Curvas de potência adimensionais da BFT medidas e estimadas; (b) Curvas de eficiência da BFT medidas e estimadas.

Controle da pressão e recuperação de energia

A RDA foi simulada no software EPANET 2.0. Este é um programa de computador que permite a análise hidráulica de redes de dutos (ROSSMAN; OTHERS, 2000). O software otimiza e melhora uma rede com a vantagem do bom efeito de simulação e alta velocidade de operação (DUAN et al., 2019). O programa permite simular tubulações, nós, reservatórios, bombas e válvulas (SOLÓRZANO, 2017). Como já relatado, diversos estudos empregaram o EPANET para otimizar a pressão de distribuição em uma RDA (ALVISI, 2015; KARADIREK et al., 2012). Em muitos casos, as estratégias mais utilizadas dividem uma RDA maior em sub-redes menores, denominadas áreas de medições distritais (AMD), posicionando, estrategicamente, VRPs à montante dos distritos para o controle efetivo da pressão de abastecimento, conforme a **Fig. 2**. De fato, o ajuste e o posicionamento ideal, das VRPs são tarefas fortemente conectadas, que devem considerar as demandas de água estacionárias ou as descargas variáveis de tempo requeridas nos Nós (NGUYEN et al., 2020). E com a otimização antecipada é possível estabelecer critérios técnicos capazes de auxiliar na implantação e gestão dos SAA (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021).

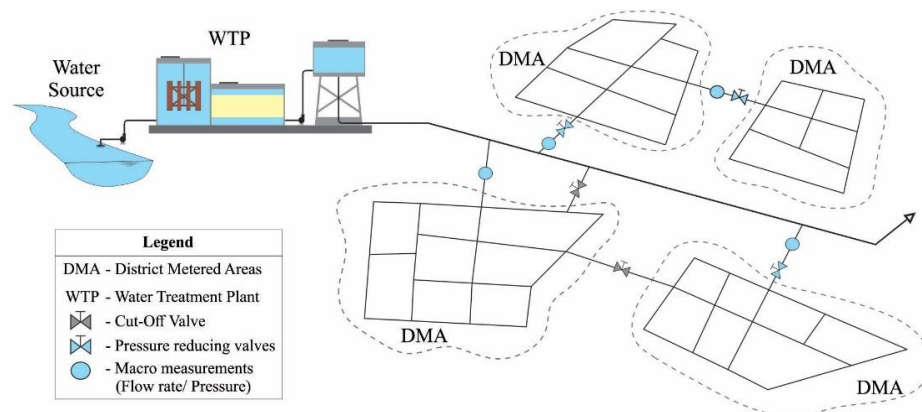


Fig. 2 Sistema de abastecimento de água dividido em (AMD) com VRPs a montante (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021).

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

Redução de equivalente de Gases do Efeito Estufa (GEE)

Na análise de redução, as emissões de gases do efeito estufa será utilizado o método proposto por Lira et al. (2019). Estes propõem que as emissões de dióxido de carbono evitadas (ECO_2) são iguais a geração anual da fonte renovável (E) multiplicado pelo fator de emissão (F_e) da energia elétrica despachada no Sistema Interligado Nacional – SIN, conforme observado na Eq. 10. O fator de emissão F_e é fornecido e calculado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e têm como objetivo estimar a contribuição de um projeto de energia renovável que gere eletricidade para a rede em termos de redução de emissões de CO_2 . Em 2021, o fator de emissão médio foi de 0,5985 $KgCO_2/kWh$ (MCTI, 2021). Além disso, será estimada a quantidade de árvores equivalentes para capturar as emissões evitadas. Para isso, será utilizado o modelo proposto por Lacerda et al. (2009), que relata que uma árvore é capaz de capturar 7,0 kg de CO_2 equivalente ao ano ou 140,0 kg de CO_2 equivalente em 20 anos, ou ainda 7,14 árvores por tonelada (t) de CO_2 equivalente em 20 anos.

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

Estudo de caso

O estudo de caso analisou uma RDA real que abastece o bairro Cristo Vive do município de Tucuruí, ao norte do Brasil, região Amazônica. A rede opera por gravidade e beneficia uma área de, aproximadamente, 0,58 km^2 , com variação topográfica de 75 m a 155 m. É composta por um reservatório elevado (RE), 144 trechos, 115 nós conforme a **Fig. 3**. O RE está localizado na cota 151 m e recebe água tratada de uma adutora e distribui aos usuários do sistema. A rede está sujeita a variações de consumo durante o dia, e apresenta sérias deficiências na gestão da pressão de distribuição, que varia de 20 m a 87,9 m, o que pode ser explicado pela topografia acentuada e a ausência de dispositivos de controle de pressão ao longo da rede.

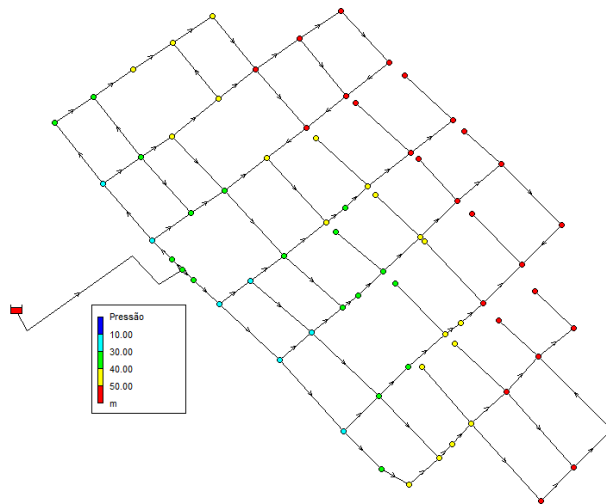


Fig. 3 Rede que abastece o bairro Cristo Vive do município de Tucuruí.

No Brasil, para o abastecimento de água é recomendada 10 mca para a pressão dinâmica mínima e 40 mca para a pressão estática máxima, com um limite de até 50 mca em regiões com extrema topografia (ABNT, 2017). A **Fig. 4** mostra a variação horária do padrão de consumo da rede.

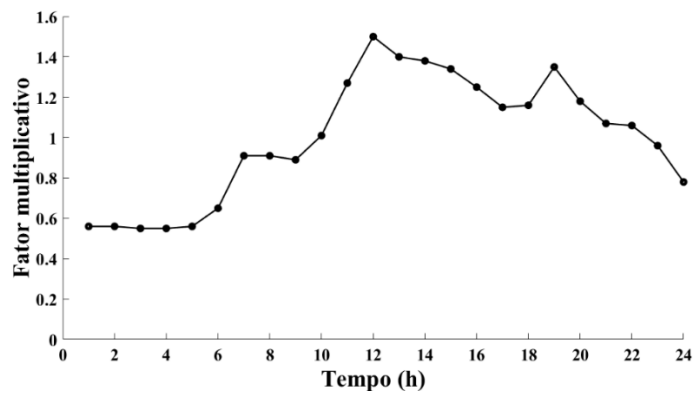


Fig. 4 Variação horária do padrão de consumo da rede (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021).

Foram realizadas duas simulações (S_1 e S_2) na RDA, com o objetivo de adequar as pressões de trabalho à legislação Brasileira, no caso, às normas da ABNT, a partir de AMDs distintas. A **Tabela 1** e a **Fig. 5** apresentam um resumo das simulações.

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

Simulação	AMD	VRP	Vazão - Q (m ³ /s)	Pressão dissipada - H (m)	Varição da pressão nos Nós (m)
1	1.1	1.1.A	0,069	15,45	10 a 49,8
	1.2	1.2.A	0,155	3,05	
		1.2.B	0,016	19,13	
	1.2.C	0,036	15,12		
1.3	1.3.A	0,024	20,19		
2	2.1	2.1.A	0,026	25,23	10 a 49
	2.2	2.2.A	0,026	24,45	
	2.3	2.3.A	0,013	23,70	
		2.3.B	0,024	19,61	

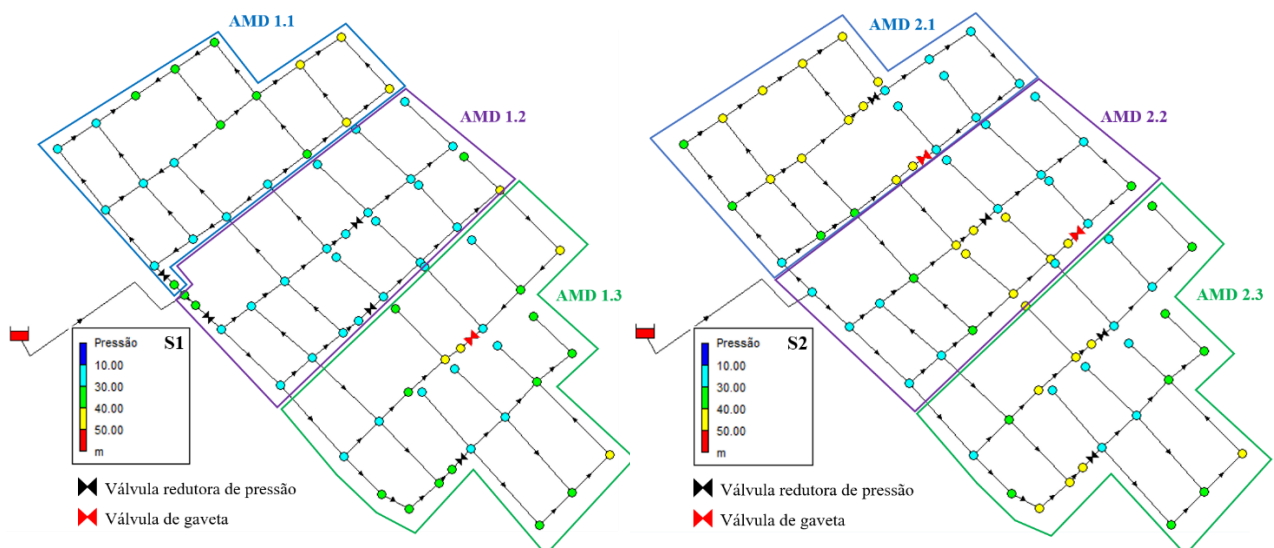


Fig. 5 Pressões nos Nós, divisão da rede em AMD e o posicionamento das VRP nas (S_1 e S_2).

Em seguida, foi investigado as configurações para as simulações (S_1 e S_2) onde as VRPs seriam substituídas por BFT, com velocidade de rotação constante e independente entre si, com um by-pass para a operação de uma PRV em paralelo em situações de redução drástica de consumo (**Fig. 6**), por exemplo, no período da madrugada. A VRP garante a pressão de abastecimento adequada ao longo do dia caso a BFT necessite

de alguma manutenção. A partir disso, foi avaliado qual das simulações apresenta a melhor localização de BFT para o maior controle da pressão de abastecimento e a máxima recuperação de energia potencial da rede.

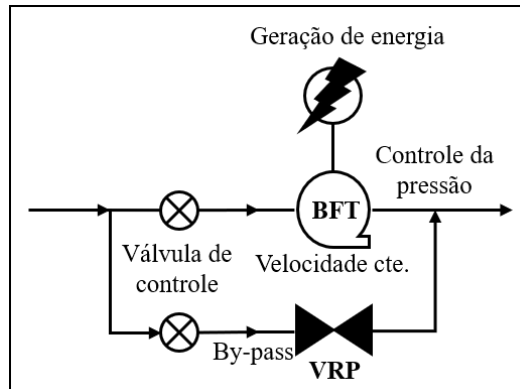


Fig. 6 Cenário proposto.

Nem sempre é financeiramente vantajoso substituir uma válvula por uma BFT, pois, a pouca energia dissipada por uma VRP leva a seleção de uma máquina insuficiente para superar a pressão e a vazão ocorrente em certa hora do dia, prejudicando a função de controle da pressão, aumentando as perdas de água por vazamentos e a recuperação de energia pela BFT (SOUZA; MESQUITA; BLANCO, 2021). Portanto, o método será aplicado somente no AMD 3 para ambas simulações. Em S_1 será substituída a VRP 1.3.A, enquanto em S_2 às VRP 2.3.A e VRP 2.3.B. É válido ressaltar que será analisado, em primeiro lugar, a comparação do posicionamento ideal das BFTs em substituição às VRPs, e se essa configuração mantém as pressões de abastecimento segundo a legislação. Como tecnologia extra, será analisado a energia renovável recuperada na RDA.

RESULTADOS

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

Tabela 2 Características operacionais no BEP das máquinas selecionadas.

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

Características	Bomba			Turbina		
	BOMBA 1.3.A	BOMBA 2.3.A	BOMBA 2.3.B	BFT 1.3.A	BFT 2.3.A	BFT 2.3.B
Q [m ³ /s]	0,020	0,050	0,020	0,0275	0,0674	0,0274
H [m]	14,65	21,76	18,41	22,94	33,37	28,63
Eficiência [-]	0,79	0,80	0,79	0,79	0,80	0,79
Velocidade de rotação [rpm]	1730	1770	3500	1730	1770	3500
Diâmetro do impulsor [m]	0,260	0,330	0,142	0,260	0,330	0,142

Simulação 1

A **Fig. 7** mostra, respectivamente, as curvas H-Q (a) e η -Q (b), construídas através do método de Rossi et al. (2019), para a BFT 1.3.A operando fora de projeto, ou seja, prevendo a curva a partir dos valores de vazão, altura manométrica e eficiência da BFT distante do seu BEP.

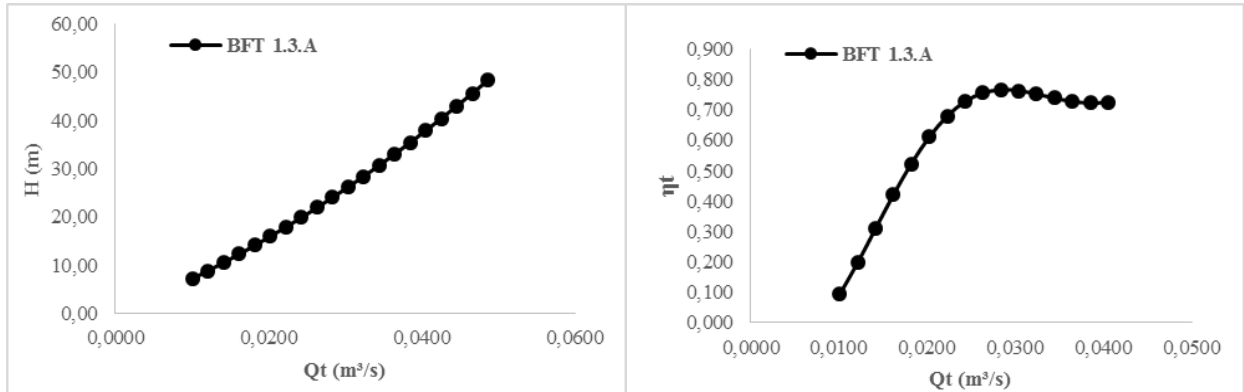


Fig. 7 (a) Curva $H(m)$ - $Q(m^3/s)$; (b) Curva η_t - $Q(m^3/s)$ – Simulação 1.

Já a **Fig. 8** apresenta, as curvas de pressão para o Nó 110, mais crítico, durante 24 h de operação para três casos: rede sem controle, com VRP e com BFT. Fica claro que o desempenho da BFT se aproxima ao da VRP quando o consumo da rede é alto, das 5-23 h. No período de 23-5 h, a eficiência da bomba reduz e o controle da pressão é prejudicado, dessa forma, o desempenho da BFT se afasta da VRP. Isso se deve porque as máquinas não conseguem absorver a redução das taxas de fluxo e a elevação da pressão na RDA adequadamente no período da madrugada, por operar em velocidade de rotação constante. Esse comportamento é observado nos trabalhos de Ebrahimi et al. (2021) e Jafari et al. (2015), que também utilizaram BFTs com velocidade constante durante o dia em uma RDA e durante o período da madrugada. Os autores também observaram um aumento indesejado na pressão dos Nós. Observa-se que na simulação 1 optou-se pela operação da BFTs no período de 5-23h. Devido à queda de rendimento de 24-4h, apenas a VRP 1.3.A continuou em operação.

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

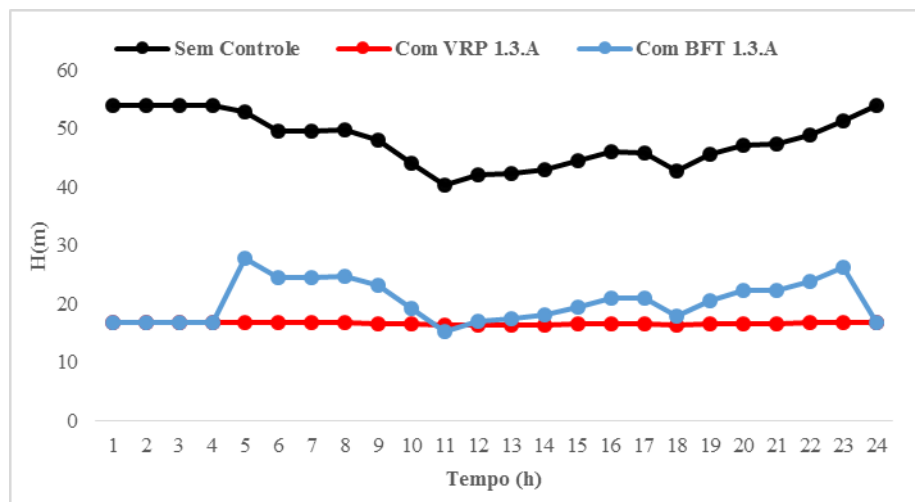


Fig. 8 Curva de pressão para o Nó 110, Simulação 1.

A **Fig. 9** mostra a potência de saída da BFT 1.3.A em 24h. Os resultados da simulação mostram que a potência de saída das BFTs entre 23-5 h é próxima de zero, isso é justificado pela operação da VRP no período. Em 18 h de operação, a potência de saída da BFT 1.3.A variou de 2,27 kW a 3,19 kW e a energia recuperada foi de 52 kWh/dia ou 18,98 MWh/ano, respectivamente. Para comparação, a energia recuperada apenas com uma BFT consegue abastecer, aproximadamente, oito residências/mês enquadradas na categoria baixa renda (consumo de até 220 kWh/mês) pela companhia elétrica do Pará (EQUATORIAL ENERGIA, 2022). A energia recuperada na simulação 1 é equivalente a 11,35 toneladas de CO_2 evitados por ano, sendo necessárias 81 árvores para absorver essa quantidade de carbono da atmosfera ao longo de 20 anos. Esses valores significativos

estão de acordo com os estudos desenvolvidos por Ebrahimi et al.(2021), Lacerda et al. (2009) e Lira et al. (2019).

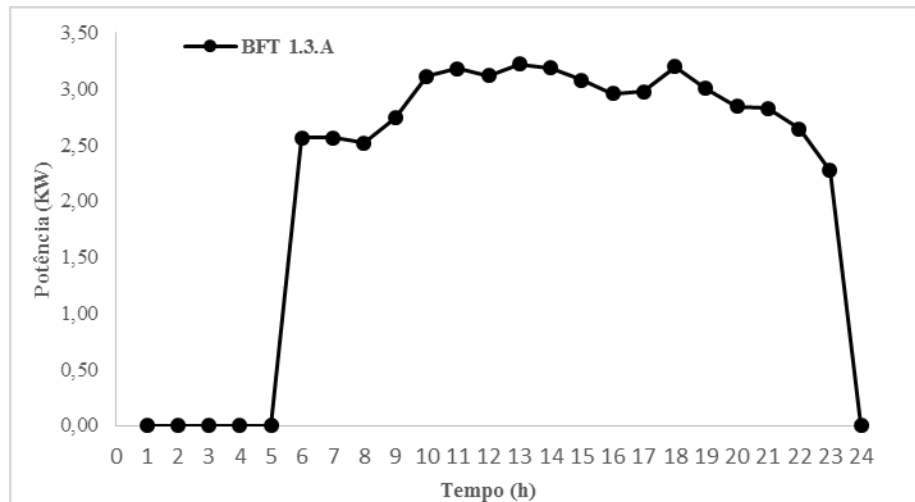


Fig. 9 Potência de saída da BFT 1.3.A, Simulação 1.

Simulação 2

Na Simulação 2 o objetivo foi investigar o desempenho do sistema com duas BFTs. A **Fig. 10** mostra as curvas H-Q (a) e η -Q (b) para a BFT 2.3.A e BFT 2.3.B operando fora de projeto.

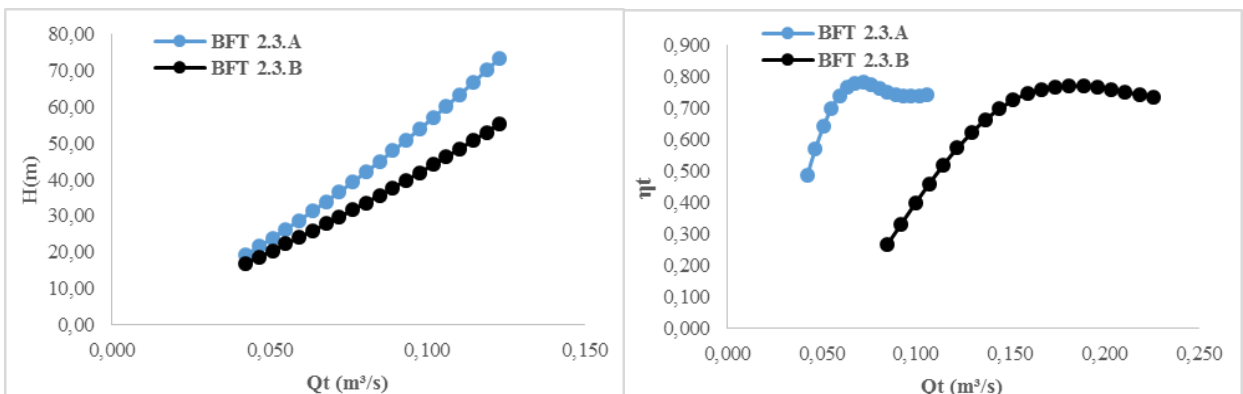


Fig. 10 (a) Curva H(m)-Q(m³/s); (b) Curva η t-Q(m³/s) – Simulação 2.

A **Fig. 11** apresenta as curvas de pressão para o Nó 110 durante 24 h de operação para três casos: rede sem controle, com VRP e com BFT. Diferente da simulação 1, duas VRPs foram inseridas e posteriormente substituídas por BFTs onde a variação de pressão foi 17,34 a 28,25 m, representando uma redução de 45,21% comparado com a rede sem controle. Observa-se o mesmo comportamento ocorrido na simulação 1 nos horários de 24-5h, um aumento indesejado de pressão e a redução das taxas de fluxos diminuindo a eficiência das BFTs para geração energia elétrica e controle de pressão.

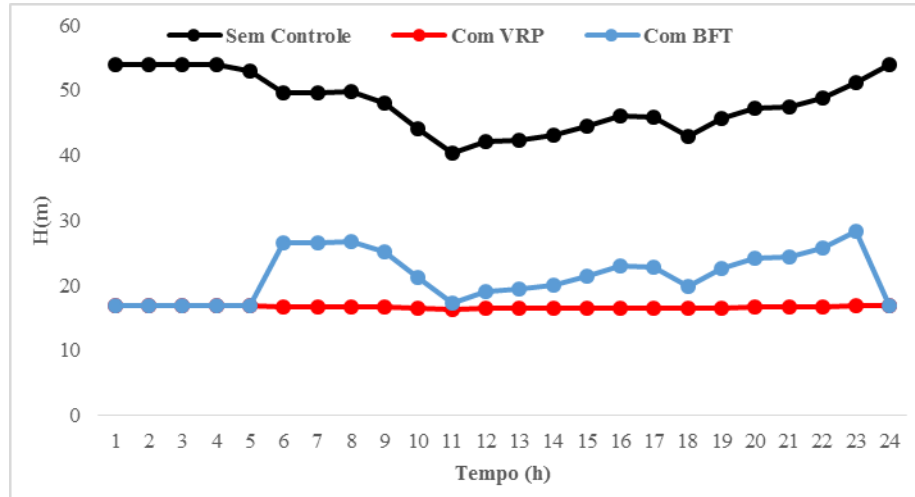


Fig. 11 Curvas de pressão para o Nó 110, na simulação 2.

Na simulação 2 a pressão no Nó 110 também acompanhou a legislação ABNT (2017). Além disso, houve um ganho na recuperação de energia, o que já era esperado. A **Fig. 12** mostra a potência de saída de cada BFT, bem como a potência total das máquinas. A potência da BFT 2.3.A variou de 7,18 kW a 9,13 kW e recuperou 155 kWh/dia, enquanto a BFT 2.3.B variou de 1,23 kW a 2,41 kW e recuperou 35,71 kWh/dia. As duas máquinas conseguiram recuperar 190,93 kWh/dia ou 5.728,8 kWh/mês. Essa geração representa um aumento de 267% comparado a simulação 1. A energia total gerada pode alimentar até 26 residências/mês enquadradas na categoria baixa renda (consumo de até 220 kWh/mês) e representa uma redução de 41,71 toneladas equivalente de CO₂ não emitidos por ano. Para absorver essa quantidade de CO₂ da atmosfera são necessárias 298 árvores ao longo de 20 anos.

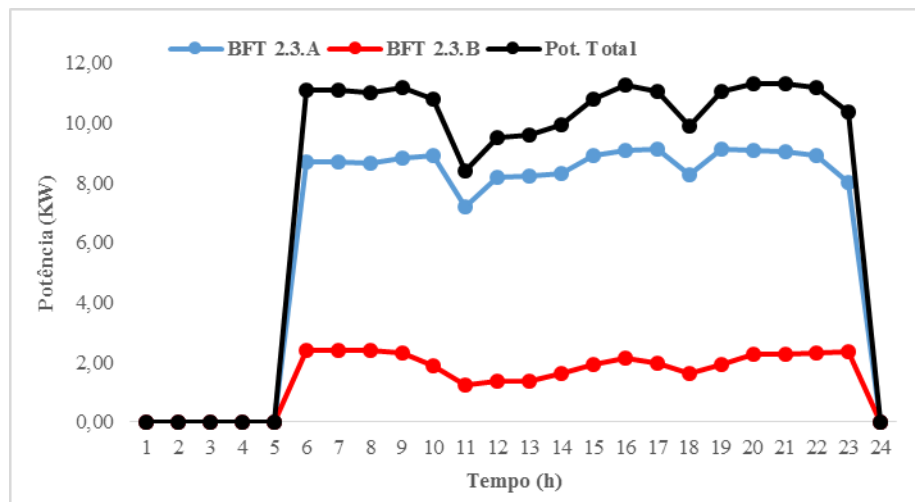


Fig. 12 Potência de saída da BFT 2.3.A, BFT 2.3.B e potência total, simulação 2.

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

Tabela 3 Comparação entre simulação 1 e 2.

Resultados	Simulação 1 - BFT 1.3.A	Simulação 2 - BFT 2.3.A e BFT 2.3.B
Variação de Pressão	16,9 a 27,81 m	17,34 a 28,25 m
Redução de pressão	42,80%	45,21%
Potência de saída da BFT	2,27 kW a 3,19 kW	(1,23 kW a 2,41 kW) e (7,18 kW a 9,13 kW)
Energia recuperada	52 kWh/dia	190,93 kWh/dia
Emissões evitadas	11,35 tCO ₂ /ano.	41,71 tCO ₂ /ano.
Árvores equivalentes	81 árvores	298 árvores

CONCLUSÃO

Neste artigo, a combinação dos métodos proposta para selecionar e prever o comportamento de BFTs em toda a faixa de operação apresentou bons resultados, obtendo uma solução viável, com baixo esforço, sem a necessidade programação robusta e hidraulicamente melhorando o controle da pressão e a recuperação de energia. De acordo com os resultados das simulações, quando o consumo da rede foi alto, as BFTs se aproximaram da VRP e obtiveram um bom controle de pressão, assim como maior recuperação de energia. Nos momentos em que o consumo da rede era baixo, a VRP em paralelo operava para manter a pressão de trabalho na rede.

Ressalta-se que na simulação 2 houve um ganho significativo na recuperação de energia. Os resultados mostraram que duas BFTs funcionando simultaneamente recuperaram 267% de energia a mais que a simulação 1, mas o desempenho do sistema em termos de controle de pressão não foi significativamente melhorado, principalmente nas horas de início e fim do dia. A fim de manter a pressão da rede na faixa padrão em todas as horas do dia, a combinação de BFT e VRP pode ser implementada para gerar energia além de ajustar a pressão. Desta forma, as BFTs funcionam apenas por horas, quando podem ajustar a pressão padrão necessária e, no restante, a VRP regula a pressão. Neste caso, além de controlar a pressão continuamente, energia renovável significativa pode ser recuperada da RDA. Vale ressaltar que não foram considerados BFTs operando em velocidade variável. Trabalhos futuros podem incluir a implementação de BFTs com velocidade variável de operação otimizada em uma RDA real para investigar a recuperação de energia e o controle de pressão nas primeiras e últimas horas do dia.

REFERÊNCIAS

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

ALGIERI, A. et al. Potential energy exploitation in collective irrigation systems using pumps as turbines: A case study in Calabria (Southern Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120538, 2020.

ALVISI, S. A New Procedure for Optimal Design of District Metered Areas Based on the Multilevel Balancing and Refinement Algorithm. **Water Resources Management**, v. 29, n. 12, p. 4397–4409, 2015.

BALACCO, G. et al. Pump as Turbine for the Energy Recovery in a Water Distribution Network: Two Italian (Apulian) Case Studies. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 1, 2020.

CARRAVETTA, A. et al. Energy saving in a water supply network by coupling a pump and a Pump As Turbine (PAT) in a turbopump. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 1, 2017.

CRESPO CHACÓN, M. et al. Hydropower energy recovery in irrigation networks: Validation of a methodology for flow prediction and pump as turbine selection. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1728–1738, 2020.

DERAKHSHAN, S.; NOURBAKHS, A. Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. **Experimental thermal and fluid science**, v. 32, n. 3, p. 800–807, 2008.

DUAN, X. et al. Research of hydraulic reliability of water supply network based on the simulation of EPANET. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 349, n. 1, 2019.

EBRAHIMI, S.; RIASI, A.; KANDI, A. Selection optimization of variable speed pump as turbine (PAT) for energy recovery and pressure management. **Energy Conversion and Management**, v. 227, n. July 2020, p. 113586, 2021.

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

FECAROTTA, O.; CARRAVETTA, A.; RAMOS, H. M. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT CFD and comparisons for a pump as turbine: Mesh reliability and performance concerns. **Journal homepage: www.IJEE.IEEFoundation.org ISSN**, v. 2, n. 1, p. 2076–2909, 2011.

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

FERNÁNDEZ GARCÍA, I.; MC NABOLA, A. Maximizing Hydropower Generation in Gravity Water Distribution Networks: Determining the Optimal Location and Number of Pumps as Turbines. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 1, p. 04019066, 2020.

GAIA, J. G. **Predição de bombas funcionando como turbinas em toda a faixa de operação – estudo de caso de uma rede de distribuição de água**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2021.

IMBIL, SOLUÇÃO EM BOMBEAMENTO. **Linha Esmaltada. Catálogo INI (in portuguese)**, 2022a.

IMBIL, SOLUÇÃO EM BOMBEAMENTO. **Linha Esmaltada. Catálogo BMI (in portuguese)**, 2022b.

JAFARI, R.; KHANJANI, M. J.; ESMAEILIAN, H. R. Pressure management and electric power production using pumps as turbines. **Journal - American Water Works Association**, v. 107, n. 7, p. E351–E363, 2015.

KARADIREK, I. E. et al. Implementation of Hydraulic Modelling for Water-Loss Reduction Through Pressure Management. **Water Resources Management**, v. 26, n. 9, p. 2555–2568, 2012.

LACERDA, J. S. DE et al. Estimativa da Biomassa e Carbono em Áreas Restauradas com Plantio de Essências Nativas. **Metrvim**, n. 5, p. 1–23, 2009.

LIMA, G. M. et al. Leakage Control and Energy Recovery Using Variable Speed Pumps as Turbines. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 1, p. 04017077, 2018.

LIRA, M. A. T. et al. Contribution of photovoltaic systems connected to the electrical network for reducing CO₂ in the state of Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p. 389–397, 2019.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, T. E I. **Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>.

NAUTIYAL, H. et al. Experimental investigation of centrifugal pump working as turbine for small hydropower systems. **Energy Science and technology**, v. 1, n. 1, p. 79–86, 2011.

NGUYEN, K. D. et al. A MINLP model for optimal localization of pumps as turbines in water distribution systems considering power generation constraints. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020.

NOVARA, D. et al. Cost Model for Pumps as Turbines in Run-of-River and In-Pipe Microhydropower Applications. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 5, p. 04019012, 2019.

NOVARA, D.; MCNABOLA, A. A model for the extrapolation of the characteristic curves of Pumps as Turbines from a datum Best Efficiency Point. **Energy Conversion and Management**, v. 174, n. July, p. 1–7, 2018.

POLÁK, M. The Influence of Changing Hydropower Potential on. **enegies**, 2019.

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

ROSSMAN, L. A.; OTHERS. **EPANET 2 users manual**. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OHEPA/600, , 2000.

SAMBITO, M.; PIAZZA, S.; FRENI, G. Stochastic approach for optimal positioning of pumps as turbines (Pats). **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 21, p. 1–12, 2021.

SOLÓRZANO, J. S. D. P. **Ejercicios básicos de mecánica de fluidos e hidráulica aplicados a través del software de distribución gratuita EPANET 2.0**. [s.l: s.n.].

SOUZA, D. E. S. E.; MESQUITA, A. L. A.; BLANCO, C. J. C. Pump-as-turbine for energy recovery in municipal water supply networks. A review. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 11, 2021.

WILLIAMS, A. A. The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, v. 208, n. 1, p. 59–66, 1995.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seleção e predição de BFT é complexa devido ao amplo espaço de busca do problema. Neste artigo, a combinação dos métodos proposta para selecionar e prever o comportamento de BFTs em toda a faixa de operação apresentou bons resultados, obtendo uma solução viável e simples, com baixo esforço, e hidraulicamente melhorando o controle de pressão, redução de vazamento e a recuperação de energia.

De acordo com os resultados das duas simulações realizadas, quando o consumo da rede foi alto, as BFTs tiveram bom desempenho e recuperaram energia elétrica, além de controlarem a pressão da rede. No entanto, nos momentos em que o consumo da rede era baixo, o desempenho da BFT caiu, tanto em termos de controle de pressão da rede, quanto de geração de energia, ficando a pressão do nó crítico fora do limite de normatização.

Para tanto, na simulação 2, houve um ganho significativo na recuperação de energia. Os resultados mostraram que duas BFTs funcionando simultaneamente recuperaram 267% de energia a mais que a simulação 1, mas o desempenho do sistema em termos de controle de pressão não foi significativamente melhorado, principalmente nas horas de início e fim do dia. A fim de manter a pressão da rede na faixa padrão em todas as horas do dia, a combinação de BFT e VRP pode ser implementada para gerar energia além de ajustar a pressão. Desta forma, as BFTs funcionam apenas por horas, quando podem ajustar a pressão padrão necessária e, no restante, a VRP regula a pressão. Neste caso, além de controlar a pressão continuamente, energia renovável significativa pode ser recuperada da RDA. Vale ressaltar que não foram considerados BFTs operando em velocidade variável. Trabalhos futuros podem incluir a implementação de BFTs com velocidade variável de operação otimizada em uma RDA real para investigar a recuperação de energia e o controle de pressão nas primeiras e últimas horas do dia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEDEJI, K. B. et al. Pressure management strategies for water loss reduction in large-scale water piping networks: A review. In: **Advances in Hydroinformatics**. [S.l.]: Springer, 2018. p.465–480.

ALBERIZZI, J. C. et al. 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**, Elsevier, v. 148, p. 226–233, 2018.

ALVISI, S. A new procedure for optimal design of district metered areas based on the multilevel balancing and refinement algorithm. **Water resources management**, Springer, v. 29, n. 12, p. 4397–4409, 2015.

BARBARELLI, S. et al. Procedure selecting pumps running as turbines in micro hydro plants. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 126, p. 549–556, 2017.

BARRETO, G. C. et al. Impacto da setorização no abastecimento de água em áreas urbanas. **VI SEREA-Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água**. João Pessoa, v. 5, 2006.

BHATTACHARYA, M. et al. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. **Applied Energy**, v. 162, n. C, p. 733–741, 2016. Disponível em: <<https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:appene:v:162:y:2016:i:c:p:733-741>>.

BINAMA, M. et al. Investigation on pump as turbine (pat) technical aspects for micro hydropower schemes: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 79, p. 148–179, 2017.

BRADY, J. et al. Effects of long-term flow variation on microhydropower energy production in pressure reducing valves in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, American Society of Civil Engineers, v. 143, n. 3, p. 04016076, 2017.

CARRAVETTA, A. et al. Energy saving in a water supply network by coupling a pump and a pump as turbine (pat) in a turbopump. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 1, p. 62, 2017.

CARRAVETTA, A. et al. Pat design strategy for energy recovery in water distribution networks by electrical regulation. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 1, p. 411–424, 2013.

CHACÓN, M. C. et al. Pump-as-turbine selection methodology for energy recovery in irrigation networks: Minimising the payback period. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 1, p. 149, 2019.

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Energy recovery in water networks: Numerical decision support tool for optimal site and selection of micro turbines.

Journal of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers, v. 144, n. 3, p. 04018004, 2018.

CORCORAN, L. **Hydropower Energy Recovery Form the Water Supply Network: Feasibility, Risk Analysis, Optimisation and Implementation**. Tese (Doutorado) — Trinity College Dublin, 2015.

COVELLI, C. et al. Optimal location and setting of prvs in wds for leakage minimization. **Water resources management**, Springer, v. 30, n. 5, p. 1803–1817, 2016.

DINCER, I.; ACAR, C. A review on clean energy solutions for better sustainability. **International Journal of Energy Research**, v. 39, n. 5, p. 585–606, 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.3329>>.

DU, J. et al. Micro hydro power generation from water supply system in high rise buildings using pump as turbines. **Energy**, Elsevier, v. 137, p. 431–440, 2017.

EIA, U. Today in energy. **US Energy Information Administration Independent Analysis and Statistics**, 2021.

FECAROTTA, O. et al. Hydropower potential in water distribution networks: Pressure control by pats. **Water resources management**, Springer, v. 29, n. 3, p. 699–714, 2015.

FECAROTTA, O.; MCNABOLA, A. Optimal location of pump as turbines (pats) in water distribution networks to recover energy and reduce leakage. **Water resources management**, Springer, v. 31, n. 15, p. 5043–5059, 2017.

FERREIRA, A. R. M. G. d. C. **Deteção e avaliação de fugas e perdas em sistemas de abastecimento de água**. Tese (Doutorado) — Universidade de Coimbra, 2017.

FERREIRA, J. F. H. et al. Avaliação do consumo e da despesa de energia elétrica no estudo de concepção de sistema de abastecimento de água. Universidade Federal do Pará, 2019.

GAJGHATE, P. W.; MIRAJKAR, A. Irrigation pipe network planning at tertiary level: An indian case study. **KSCE Journal of Civil Engineering**, Springer, v. 24, n. 1, p. 322–335, 2020.

GARCÍA, I. F.; NABOLA, A. M. Maximizing hydropower generation in gravity water distribution networks: Determining the optimal location and number of pumps as turbines. **Journal of Water Resources Planning and Management**, American Society of Civil Engineers, v. 146, n. 1, p. 04019066, 2020.

GIUGNI, M.; FONTANA, N.; RANUCCI, A. Optimal location of prvs and turbines in water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, American Society of Civil Engineers, v. 140, n. 9, p. 06014004, 2014.

GOMES, M. R. Avaliação da qualidade da água de distribuição em alguns municípios do estado do Ceará. 2019.

GUPTA, R. S. **Hydrology and hydraulic systems**. [S.l.]: Waveland Press, 2016.

HELLER, L.; PADUA, V. L. D. **Abastecimento de água para consumo humano**. [S.l.]: Editora UFMG, 2006.

IBGE, B. Instituto brasileiro de geografia e estatística. Censo demográfico, v. 2010, 2010.

JAIN, S. V.; PATEL, R. N. Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 30, p. 841–868, 2014.

KAUNDA, C. S.; KIMAMBO, C. Z.; NIELSEN, T. K. A technical discussion on microhydropower technology and its turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 35, p. 445–459, 2014.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE. **Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks**. [S.l.], 1995. v. 4, p. 1942–1948.

KHATAVKAR, P. N.; MAYS, L. Testing an optimization–simulation model for optimal pump and valve operations with required storage tank turnovers. **Journal of Water Management Modeling**, Computational Hydraulics Int.(CHI), 2019.

KORKANA, P. et al. Forming district metered areas in a water distribution network using genetic algorithms. **Procedia engineering**, Elsevier, v. 162, p. 511–520, 2016.

LAHIMER, A. et al. Research and development aspects of pico-hydro power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 16, n. 8, p. 5861–5878, 2012.

LIMA, G. M. Microgeração em sistemas de abastecimento de água. 2013.

LIMA, G. M.; JUNIOR, E. L.; BRENTAN, B. M. Selection and location of pumps as turbines substituting pressure reducing valves. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 109, p. 392–405, 2017.

LIMA, G. M. et al. Geração de energia e controle de pressão em redes de abastecimento de água utilizando bombas funcionando como turbina. [sn], 2017.

LYDON, T.; COUGHLAN, P.; MCNABOLA, A. Pump-as-turbine: Characterization as an energy recovery device for the water distribution network. **Journal of Hydraulic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 143, n. 8, p. 04017020, 2017.

MARCHIORI, I. N. et al. Effectiveness of methods for selecting pumps as turbines to operate inwater distribution networks. **Water Supply**, IWA Publishing, v. 19, n. 2, p. 417–423, 2019.

MARCHIS, M. D. et al. Energy saving in water distribution network through pump as turbine generators: economic and environmental analysis. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 11, p. 877, 2016.

MILLONAS, M. Swarms, phase transitions, and collective intelligence. **Proc. Artificial Life**, 1994.

MUHAMMETOGLU, A. et al. Evaluation of performance and environmental benefits of a full-scale pump as turbine system in antalya **water distribution network**. **Water Science and Technology: Water Supply**, IWA Publishing, v. 18, n. 1, p. 130–141, 2018.

NASCIMENTO, R. B. d. **Análise e gerenciamento de redes de distribuição de água com suporte em Sistema de Informações Geográficas (SIG)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

NBR12.218, A. 12.218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. **Rio de Janeiro**, 2017.

NETTO, J. M. d. A. Fernández, miguel fernández y. **Manual de Hidráulica**, v. 9, 2015.

NOVARA, D. et al. Cost model for pumps as turbines in run-of-river and in-pipe microhydropower applications. **Journal of Water Resources Planning and Management**, American Society of Civil Engineers, v. 145, n. 5, p. 04019012, 2019.

NOVARA, D.; MCNABOLA, A. A model for the extrapolation of the characteristic curves of pumps as turbines from a datum best efficiency point. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 174, p. 1–7, 2018.

NWOSU, C.; MADUEME, T. Recycled micro hydropower generation using hydraulic ram pump (hydram). **International Journal of Research in Engineering & Technology, Citeseer**, v. 1, n. 3, p. 1–10, 2013.

PAISH, O. Small hydro power: technology and current status. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 6, n. 6, p. 537–556, 2002.

PAOLA, F. D. et al. Automatic multi-objective sectorization of a water distribution network. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 89, p. 1200–1207, 2014.

PEREIRA, J. A. R. et al. Variação da pressão dinâmica em redes de distribuição de água com e sem setorização. **Sistemas de saneamento: eficiência energética**, 2010.

PÉREZ-SÁNCHEZ, M. et al. Energy recovery in existing water networks: Towards greater sustainability. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 2, p. 97, 2017.

POLÁK, M. The influence of changing hydropower potential on performance parameters of pumps in turbine mode. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 11, p. 2103, 2019.

POWER, C.; COUGHLAN, P.; MCNABOLA, A. Microhydropower energy recovery at wastewater-treatment plants: Turbine selection and optimization. **Journal of Energy Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 143, n. 1, p. 04016036, 2017.

PUGLIESE, F. et al. Performance of vertical-axis pumps as turbines. **Journal of Hydraulic Research**, Taylor & Francis, v. 56, n. 4, p. 482–493, 2018.

SAMMARTANO, V. et al. A banki–michell turbine for in-line water supply systems. **Journal of Hydraulic Research**, Taylor & Francis, v. 55, n. 5, p. 686–694, 2017.

SERAPIÃO, A. B. d. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 20, n. 3, p. 271–304, 2009.

SILVA, A. F.; LEMONGE, A. C.; LIMA, B. S. Algoritmo de otimização com enxame de partículas auxiliado por metamodelos. **XI Simpósio de Mecânica Computacional, II Encontro Mineiro de Modelagem Computacional, SIMMEC/EMMCOMP**, 2014.

SIMÃO, M. et al. Flow conditions for pats operating in parallel: Experimental and numerical analyses. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 5, p. 901, 2019.

SOSNOSKI, A. S. K.-B. **Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de água**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015.

SOUSA, R. d. et al. Uso de válvulas redutoras de pressão na otimização de rede setorizada de distribuição de água. Universidade Federal da Paraíba, 2017.

TRICARICO, C. et al. Optimal energy recovery by means of pumps as turbines (pats) for improved wds management. **Water Science and Technology: Water Supply**, IWA Publishing, v. 18, n. 4, p. 1365–1374, 2018.

TSUTIYA, M. Abastecimento de água-departamento de engenharia hidráulica e sanitária da escola politécnica da universidade de são paulo, 4º edição. **São Paulo**, 2006.

VENTURINI, M. et al. Energy production by means of pumps as turbines in water distribution networks. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 10, p. 1666, 2017.

ZHANG, Y. et al. Multi-model based pressure optimization for large-scale water distribution networks. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 95, p. 104232, 2020.

SATISHA, DOKIPARTI. et al. Review on Pump as Turbine Application Water Distribution Networks for Power Generation. **AIP Conference Proceedings** 2341, 030034 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0049900>

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Assembleia geral das Nações Unidas**. A ONU e a água. Brasília, 2020.

TUNDISI, J. G. Recursos Hídricos. **Instituto Internacional de Ecologia**, São Carlos, 2003.

REGO, A. et al. Correlação entre as especificidades de sistemas de abastecimento de água e suas perdas de água: o caso das companhias regionais do norte do Brasil. **Engenharia e Tecnologia**, V. 12, No. 2, 2020.

ALENCAR, I. et al. Ausência de saneamento básico e sua relação com a diarreia em crianças no nordeste brasileiro, nos anos de 2007 a 2019: uma revisão de literatura. **Estação Científica**, N. 22, 2019.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnósticos dos serviços de água e esgoto**. Brasília, 2018.

BRASIL, T.; ASSOCIADOS, G. O. **Perdas de água 2018 (snis 2016)**: desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico. São Paulo, 2019.