

## **XI-082 - REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE APLICAÇÃO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

**Sabrina da Silva Corrêa<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

**Saulo de Tarso Marques Bezerra<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Professor Titular da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

**Jose Eloim Silva de Macedo<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

**Thaise Suanne Guimarães Ferreira<sup>(4)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

**Maria Alice Britto Feitoza<sup>(5)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Siqueira Campos, 282 – Centro - Cachoeirinha - PE - CEP: 55380-000 - Brasil - cel: (81) 99740-3800 - e-mail: [sabrinna\\_s.c@hotmail.com](mailto:sabrinna_s.c@hotmail.com)

### **RESUMO**

A recuperação de energia e o gerenciamento de pressão são essenciais para alcançar melhorias sustentáveis no desempenho dos sistemas de distribuição de água. Uma alternativa que vem sendo estudada em todo o mundo é a utilização de Bombas funcionando como Turbinas (BFTs) em substituição às válvulas redutoras de pressão, tendo em vista que esta concilia o controle de pressão juntamente com a geração de energia. Este artigo se trata de uma revisão de literatura sobre o uso de BFTs em sistemas de distribuição de água, abordando implicações técnicas e econômicas analisadas pela comunidade científica. Foram analisados 29 artigos, sendo 26 inclusos nesta revisão, destacando métodos de seleção e localização das BFTs, e a realização de estudos de caso, com indicação da geração de energia elétrica, redução de vazamentos nas tubulações, além de mostrar uma boa relação custo/benefício.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bomba funcionando como turbina, Eficiência energética em sistemas de distribuição de água, Perdas de água.

### **INTRODUÇÃO**

Um dos maiores problemas das concessionárias de água são as perdas de água. Ao fornecer água para os diversos consumidores, os sistemas de abastecimento de água (SAA) sofrem perdas durante todo o processo de captação, tratamento e distribuição. Segundo o SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, a média brasileira de perdas na distribuição foi de 38% em 2016, alcançando índices superiores a 60% em algumas concessionárias de água. Tais perdas não se limitam a problemas técnicos e econômicos que se restringem às operadoras locais ou regionais, sendo uma problemática bem mais ampla, possuindo consequências e efeitos significativos nos aspectos políticos, econômicos, sociais, tecnológicos, legais e ambientais do país.

Uma das alternativas mais eficazes para a diminuição de perdas reais de água é o controle da pressão. Sendo um dos pilares fundamentais para a operação segura dos sistemas de distribuição de água, o controle da pressão possibilita a redução das perdas físicas e dos riscos de interrupções, reduzindo assim, gastos com energia e

manutenção (COVELLI *et al.*, 2016). Tradicionalmente, as principais ações para o controle de pressão em SAA são as instalações de válvulas redutoras de pressão (VRP) e o uso de bombas operando com velocidade de rotação variável.

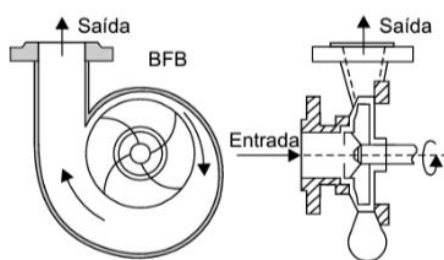
Recentemente, pesquisadores estão buscando soluções para o controle de pressão em redes hidráulicas que adotem turbinas e/ou bombas funcionando como turbinas (BFT) em substituição às VRP (FONTANTA *et al.*, 2016; POULIEZOS *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2017). Esta alternativa concilia o controle de pressão, que aumenta a eficiência hidráulica dos SAA, com a geração de energia elétrica. A priori, as turbinas são os equipamentos mais apropriados, mas as BFT vêm se destacando por apresentarem baixo custo, facilidade e rapidez de aquisição (são produzidas em grande escala pela indústria), obtenção simplificada de peças para reposição, e serem equipamentos robustos. Porém, a utilização de turbinas convencionais não é viável para a maioria das situações devido ao baixo potencial encontrado, alto custo e a demanda de mão de obra especializada. Em contrapartida, a utilização de BFT como alternativa ao uso das VRP apresenta baixo custo e boa eficiência.

Frente ao exposto, este estudo teve como objetivo analisar a produção científica acerca da aplicação de BFT em sistemas de distribuição de água, destacando métodos de seleção e localização, e estudos de casos que avaliaram a viabilidade técnica e econômica destas.

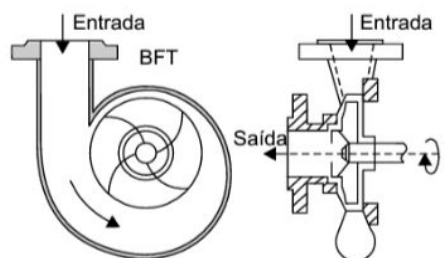
## BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS

As bombas centrífugas são fisicamente e hidraulicamente semelhantes às turbinas, no entanto, operam processos opostos. Kittredge e Thoma (1931) foram os primeiros a mostrar que bombas centrífugas podem ser eficientemente usadas como turbinas. Bombas são máquinas geratrizes, convertem energia mecânica fornecida pelo motor, em energia cinética e energia de pressão, enquanto que as turbinas são máquinas motrizes, convertem a energia hidráulica em energia mecânica do rotor.

Para que uma bomba funcione como uma turbina é necessária que haja a inversão do sentido do fluxo do fluido, ocorrendo, portanto, a inversão da rotação do rotor. A Figura 1 ilustra uma bomba centrífuga que está operando como bomba, cujo líquido entra na sucção em baixa pressão e o rotor transforma energia cinética em alta pressão. Já a Figura 2 ilustra uma bomba centrífuga operando como turbina, nesse caso, o líquido entra com pressão alta pela descarga, aciona o rotor e sai com baixa pressão.



**Figura 1: Bomba Funcionando como Bomba (Viana, 2012).**



**Figura 2: Bomba Funcionando como Turbina (Viana, 2012).**

O desempenho da bomba é diferente quando opera como turbina. Isso se deve às perdas de energia, ocasionado principalmente pelos ângulos construtivos das suas pás, que foi projetado para que a bomba tenha um rendimento máximo possível. Porém quando ocorre a inversão, os ângulos construtivos não estarão adequados. Portanto, os valores do fluxo e da altura manométrica serão menores quando a bomba operar como turbina (Chappell *et al.*, 1982).

## METODOLOGIA

O presente trabalho consiste na implementação de uma revisão sistemática, a partir de pesquisas encontradas na literatura, acerca do uso de BFT em SAA, através da análise de geração de energia elétrica e redução de perdas de água. A revisão sistemática foi baseada no método de Khan *et al.*, (2003), que é dividido em cinco etapas. A primeira etapa consiste no desenvolvimento de um questionamento central, a fim de guiar o estudo a ser realizado. No presente estudo foi definida a seguinte questão: **“É viável a utilização de BFT para o controle de pressão e geração de energia em sistemas de distribuição de água?”**.

O estudo deve, portanto, envolver pesquisas que analisem a aplicação das BFTs em sistemas de distribuição de água e que apontem técnicas que se mostrem eficientes no controle de pressão e na geração de energia.

O segundo passo trata-se da seleção das pesquisas relevantes para o estudo. Inicialmente, foi realizada a busca das pesquisas através do Portal Periódicos-CAPES, usando como palavras-chave os termos: “*Pump as turbine water distribution networks*” “*Energy recovery water distribution networks*” e “Bombas funcionando como turbinas redes de distribuição de água”. Resultando em 25 artigos internacionais e quatro pesquisas nacionais.

Para obter uma análise dos estudos selecionados, foram formuladas questões que constituíram de inclusão ou exclusão da pesquisa. Os Quesitos (Q) a serem analisados estão apresentados na Tabela 1 a seguir:

**Tabela 1: Descrição dos quesitos analisados**

Q1	Os objetivos do estudo estão claramente expostos?
Q2	A metodologia para implantação da BFT é descrita satisfatoriamente?
Q3	O estudo analisa a redução de perdas de água proveniente do controle de pressão?
Q4	O estudo quantifica a geração de energia elétrica?
Q5	O estudo apresenta os custos de implantação do dispositivo?
Q6	O estudo apresenta o tempo de retorno do investimento?
Q7	O estudo faz comparações com outras técnicas ou pesquisas?
Q8	São apresentadas as problemáticas do estudo em questão?

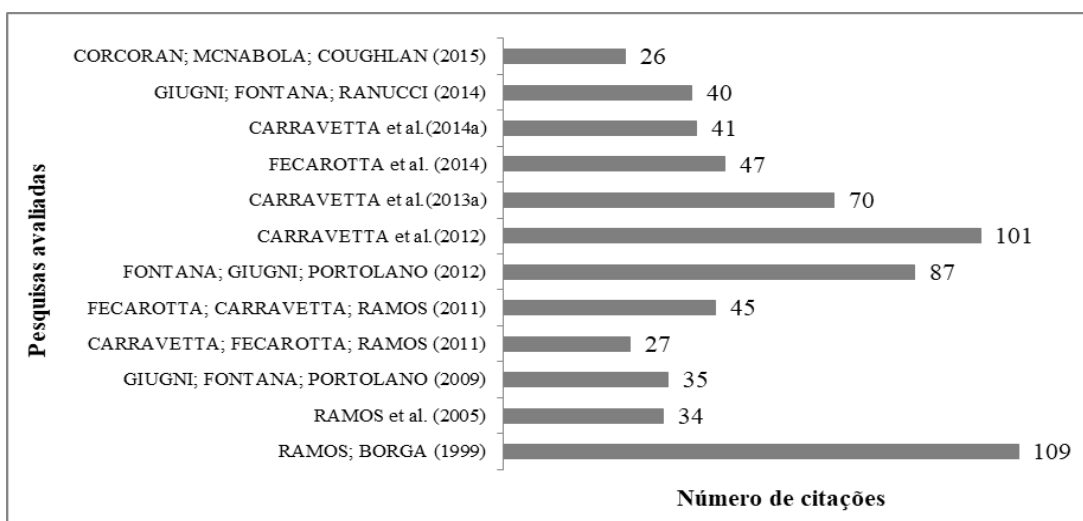
As perguntas foram respondidas e cada pesquisa teve então um percentual agregado às respostas, de modo que estudos com o resultado entre 100% - 60% foram caracterizados como “Bom” e aqueles que obtiveram percentuais abaixo de 60% foram caracterizados como “Ruim” e foram excluídos das revisões.

No terceiro passo faz-se a avaliação da qualidade dos estudos, aplicando as questões para cada estudo. Para a resposta “sim” tem-se o valor 1 e para a resposta “não” tem-se o valor 0, como mostra a Tabela 2:

**Tabela 2: Resultado dos quesitos aplicados ao estudo**

Pesquisa	Autor	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Resultado	%
1	LIMA <i>et al.</i> (2018)	1	1	1	1	0	0	1	1	6	75
2	MORANI <i>et al.</i> (2018)	1	1	0	1	1	0	1	1	6	75
3	KRAMER; TERHEIDEN; WIEPRECHT (2018)	1	1	0	1	1	1	0	1	6	75
4	LIMA (2017)	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100
5	LIMA <i>et al.</i> (2017)	1	1	1	1	0	0	1	1	6	75
6	FECAROTTA; MCNABOLA (2017)	1	1	1	1	0	1	1	1	7	88
7	CARRAVETTA <i>et al.</i> (2017)	1	1	0	1	0	1	0	1	5	63
8	MARCHIS <i>et al.</i> (2016)	1	1	0	1	1	1	0	1	6	75
9	POULIEZOS <i>et al.</i> (2016)	1	0	0	1	1	1	1	1	6	75
10	SILVA; GARCETE; DE ASSIS (2016)	1	1	0	1	1	1	0	1	6	75
11	CORCORAN; MCNABOLA; COUGHLAN (2015)	1	0	0	1	1	0	1	1	5	63
12	JAFARI; KHANJANI; ESMAEILIAN (2015)	1	1	1	1	1	1	0	1	7	88
13	GIUGNI; FONTANA; RANUCCI (2014)	1	1	1	1	0	0	1	1	6	75
14	CARRAVETTA <i>et al.</i> (2014a)	1	1	0	1	1	1	0	1	6	75
15	CARRAVETTA <i>et al.</i> (2014b)	1	1	0	0	0	0	0	1	3	38
16	CARRAVETTA <i>et al.</i> (2014c)	1	1	0	0	0	0	0	1	3	38
17	FECAROTTA <i>et al.</i> (2014)	1	1	1	1	1	1	0	1	7	88
18	LIMA; VIANA; DIAS (2013)	1	1	0	1	1	0	0	1	5	63
19	CARRAVETTA <i>et al.</i> (2013a)	1	1	0	1	1	1	1	1	7	88
20	CARRAVETTA <i>et al.</i> (2013b)	1	1	0	0	0	0	1	1	4	50
21	CARRAVETTA <i>et al.</i> (2012)	1	1	0	1	0	0	1	1	5	63
22	FONTANA; GIUGNI; PORTOLANO (2012)	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100
23	FECAROTTA; CARRAVETTA; RAMOS (2011)	1	1	0	1	0	0	1	1	5	63
24	CARRAVETTA; FECAROTTA; RAMOS (2011)	1	1	0	1	0	0	1	1	5	63
25	GARCÍA; MARCO; SANTOS (2010)	1	1	0	1	0	0	1	1	5	63
26	SANTOS (2010)	1	1	0	1	1	1	1	1	7	88
27	GIUGNI; FONTANA; PORTOLANO (2009)	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100
28	RAMOS <i>et al.</i> (2005)	1	1	1	0	0	0	1	1	5	63
29	RAMOS; BORGA (1999)	1	1	0	1	0	0	1	1	5	63

Dentre os 29 estudos analisados, 26 foram incluídos na presente revisão. Sendo em sua maioria artigos publicados em revistas internacionais. A Figura 3 apresenta o gráfico com os artigos mais citados e seus respectivos números de citações.



**Figura 3: Quantidade de citações por artigo.**

O quarto passo consiste em fazer uma análise crítica dos estudos selecionados, identificando as problemáticas encontradas pelos pesquisadores e resumindo os dados obtidos. E por fim, a proposta da última etapa é a interpretação dos resultados, avaliando os principais pontos dos estudos.

## RESULTADOS

A utilização da bomba funcionando como turbina (BFT) vem se sendo estudada e aplicada no mundo, com maiores publicações na Europa, mostrando-se eficiente na redução de perdas em redes de abastecimento de água e na geração de energia elétrica. Desse modo, Ramos e Borgia (1999) foram os primeiros a demonstrar que as BFT podem ser utilizadas para produzir energia renovável em sistemas de distribuição de água. A análise foi realizada com base nos parâmetros de Suter (TORLEY; CHAUDHRY, 1986) e concluíram que independente do motor ou alternador adotado no projeto, a utilização das BFT é a melhor solução econômica.

Mais tarde, Ramos *et al.* (2005) investigaram o resultado do sistema hidráulico, em estado estacionário e transitório, para analisar e comparar o comportamento entre uma válvula redutora de pressão e a BFT. Através do modelo matemático proposto, desenvolvido com base no software EPANET e no algoritmo genético, observou-se um comportamento semelhante entre a VRP e a BFT para regimes estacionários, e algumas diferenças no regime transitório. Conclui-se ainda, que em alguns casos o comportamento da BFT pode ser melhor que o da VRP, mas em outros é aconselhável uma solução utilize ambos dispositivos simultaneamente.

Giugni *et al.* (2009) utilizaram VRP e BFT para controlar a pressão no SAA de Nápoles, Itália. As curvas características das BFT foram calculadas a partir de relações experimentais obtidas por Derakhshan e Nourbakhsh (2008) e usadas para simular o estudo de caso. Os resultados mostraram que as BFT podem substituir as VRP para minimizar as perdas de água e ainda produzir energia, podendo chegar a 821,6 kWh/dia. Além disso, o estudo mostra lucros atraentes e retorno de capital relativamente curto. No mesmo estudo de caso Fontana *et al.* (2012) observaram que a localização ideal das VRP para redução das perdas não maximiza a produção de energia, portanto uma função de adequação diferentes deveria ser inserida no processo de otimização. Do mesmo modo Santos (2010) realizou um ensaio experimental em um sistema adutor de Covilhã, Portugal. A seleção da BFT foi obtida através da metodologia proposta por Williams (1995), e através da análise de recuperação de energia concluiu que o método é eficaz e traz lucros atraentes.

No mesmo ano García *et al.* (2010) observaram que diferentes métodos para obter as características das bombas centrífugas operando como turbina, possui resultados semelhantes. Os métodos estudados foram de: Williams (1995), Audisio (2002), Fernández *et al.* (2010) e Derakhshan e Nourbakhsh (2008).

Fecarotta *et al.* (2011) e Carravetta *et al.* (2011) utilizaram o *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para obter o desempenho das BFT em um sistema de distribuição de água. Cálculos foram realizados sob diferentes

condições de fluxos (estático e dinâmico), em seguida as curvas de desempenho de uma BFT foram obtidas. O estudo mostra que o CFD pode ser uma ferramenta confiável para entender o comportamento das bombas em reverso, pois incluem interações entre o rotor, o estator e as condições hidrodinâmicas.

Carravetta *et al.* (2012) analisaram o método *Variable Operating Strategy* (VOS), utilizando curvas características obtidas pelo CFD e também curvas obtidas experimentalmente. Os resultados mostraram que o VOS permite a seleção ótima da BFT para atuarem em redes de distribuição de água, e mais de 50% da energia disponível pode ser convertida na BFT na configuração série-paralelo (regulagem hidráulica). Além disso, os resultados do VOS em combinação ao CFD mostraram-se precisos, indicando este ser uma boa alternativa de projeto.

Em seguida, Carravetta *et al.* (2013) adaptaram o método VOS para o sistema de regulagem elétrica e ao compararem com a regulagem hidráulica, por meio de um circuito hidráulico série-paralelo, concluíram que o sistema é geralmente mais eficiente e conveniente economicamente na atuação da variabilidade de pressão e vazão da BFT.

Fecarotta *et al.* (2014) deram continuidade com as pesquisas, utilizando o método VOS com sistema de regulagem hidráulica para a avaliação do benefício econômico da substituição das VRP por BFT, considerando tanto a economia de água quanto o preço de venda da energia, custos de operação e tarifas de energia de diversos países foram considerados. Como resultado, o sistema de distribuição de água fictício foi otimizada, indicando o local e a quantidade de BFT e VRP, de modo a obter o maior benefício possível.

Carravetta *et al.* (2014) investigaram a relação dos tamanhos dos diâmetros das tubulações com a produção de energia em um projeto de uma pequena usina hidrelétrica no SAA de Oreto-Stazione, Palermo, Itália. Concluíram que a instalação da BFT e seu benefício econômico devem ser incluídos na variável de decisão da otimização de dimensionamento de redes. Os resultados indicam que um pequeno incremento limitado no diâmetro projetado leva a um incremento significativo na produção de energia, e o incremento excessivo dos diâmetros implica em um custo não recuperável pela produção de energia.

Giugni *et al.* (2014) desenvolveram um método capaz de maximizar a produção de energia e encontrar a localização ótima das BFT em um sistema de distribuição de água. Adicionalmente, compararam a abordagem proposta com o algoritmo tradicional, no qual visa minimizar as perdas de água através da minimização do excesso de pressão, e mostra ser eficaz na produção de energia apesar de reduzir menos as perdas na rede.

Corcoran *et al.* (2015) também desenvolveram um algoritmo capaz de localizar os dispositivos geradores de energia, com quantidades fixadas, em redes. A proposta desenvolvida conseguiu gerar 3% mais energia se comparada com a proposta de Giugni *et al.* (2014), porém o método apresenta resultados ótimos somente com a utilização de turbinas, mostrando as BFT como pouco eficientes, uma vez que não levam em consideração os custos dos equipamentos.

Jafari *et al.* (2015) analisaram o sistema de distribuição de água, conhecido por Andishe, na província de Tabriz, Irã, substituindo algumas VRP por BFT. Primeiramente, o ajuste ideal e a colocação das VRP foram determinados através de algoritmos genéticos implementados no software MATLAB, com auxílio da biblioteca Toolkit Toolbox conectado, com o software EPANET 2.0. Entre as 15 VRP inseridas no sistema, apenas oito foram substituídas por BFT, por apresentarem altas taxas de perda de carga. Essa alternativa mostrou-se efetiva e benéfica para as agências de água, com uma considerável redução de vazamentos e geração de uma quantidade notável de energia, indicando um investimento que será devolvido em aproximadamente 17 meses.

Pouliezios *et al.* (2016) observaram a utilização de tecnologias de geração de energia renovável no SAA de abastecimento de Creta, Grécia. As tecnologias examinadas foram o sistema fotovoltaico e a utilização de BFT, com o auxílio do software SmartWater para a simulação das demandas hidráulicas e energéticas. Os resultados mostram que a redução dos custos de eletricidade pode ser alcançada em todos os casos, porém o uso da BFT provou ser mais rentável.

Marchis *et al.* (2016) aplicaram o modelo hidrodinâmico que resolve equações diferenciais conhecidas como equações de compatibilidade para simular o comportamento da BFT no SAA de Misilmeri, Itália. Utilizaram as



relações experimentais de Derakhshan e Nourbakhsh (2008) para obter as curvas características das BFT e realizaram simulações considerando diferentes cenários de localização dos dispositivos e a presença ou não de tanques de armazenamento de água dos usuários. O estudo indica que o tempo do retorno econômico está associado à posição das BFT, mostrando claramente que em alguns casos o investimento é economicamente inviável. Além disso, os resultados mostraram que os tanques de armazenamento causam diminuição na geração de energia, e que devem ser considerados na análise.

Carravetta *et al.* (2017) estudaram o novo modelo P&P (*Pat & Pump*) no qual se faz um acoplamento direto da BFT com uma bomba, permitindo transferir energia do sistema de controle de pressão para o sistema de bombeamento sem qualquer dispositivo elétrico. Através de análises experimentais, foi possível identificar a viabilidade do sistema em diferentes cenários proposto, podendo substituir completamente um sistema de abastecimento comum.

Fecarotta e McNabola (2017) desenvolveram um novo modelo de otimização com intuito de encontrar a localização ideal das BFT em sistemas de distribuição de água para produzir energia e reduzir vazamentos. A função objetivo leva em consideração o preço de venda e a redução econômica relacionada com a redução de vazamento nas tubulações, não limitando a quantidade de BFT no sistema. A otimização proposta garante melhores soluções nas condições médias de demanda, tanto em termos de produção de energia quanto a redução de pressão, se comparado com os resultados de Corcoran *et al.* (2015). Quando comparado com os resultados obtidos por Giugni *et al.* (2014), o modelo proposto apresentou valores maiores ou comparáveis de produção de energia e maiores valores de economia de água.

Kramer *et al.* (2018) investigaram a viabilidade técnica e econômica de usinas de recuperação de energia em SAA. Uma bomba foi investigada em laboratório e em campo para melhorar a rentabilidade econômica, métodos de conversão de bomba para turbina foram comparados, indicando que o método de Sharma (1985) apresenta bons resultados. Em relação à análise econômica, os resultados mostram que o período de retorno é atingido dentro de um período em que os reinvestimentos são necessários, no entanto, se a eletricidade gerada contribuir na demanda, o período de retorno cai significativamente, e, portanto, uma indicação é dada para a decisão dos investimentos.

Morani *et al.* (2018) compararam a utilização de BFTs com o uso do bombeamento direto, sem a utilização de reservatórios, operando com velocidade variáveis, duas soluções para aumentar a eficiência energética no sistema de abastecimento de água analisadas no Condado de Laois, Irlanda. A BFT foi selecionada de modo que houvesse a maximização da energia gerada na rede, produzindo 2.234 kWh/ano, porém com necessidade de 32.420 kWh/ano, enquanto no segundo cenário, o bombeamento direto com velocidade variável demandou 22.327 kWh/ano, ou seja, uma economia de 10.093 kWh/ano, indicando esta ser a opção mais eficiente. A solução deve ser estudada caso a caso, considerando as condições hidráulicas do sistema e os custos para uma análise financeira.

No Brasil, a aplicação de BFT no SAA da cidade de Cruzeiro-SP foi estudada por Lima *et al.* (2013). A análise foi realizada através de simulações no software EPANET 2.0, utilizando uma válvula genérica para simular a perda de carga da BFT. Foi utilizado o método de Chapallaz (1992) para a seleção da BFT bem como a obtenção da sua curva característica. Devido à variabilidade de pressão e vazão no sistema, o estudo sugere o uso de múltiplas BFT em paralelo para operarem em horários diferentes, indicando bons resultados, redução de pressão de 47,3 % e 6,96 kWh de energia gerada. Além disso, foram realizados testes laboratoriais para avaliar o desempenho da BFT, que mostraram queda de rendimento ao operar com controle de vazão a jusante e diferença no comportamento da BFT quando esta está atuando fora do seu ponto de melhor eficiência.

Silva *et al.* (2016) desenvolveram e analisaram um sistema piloto de microgeração energética no SAA Curitiba-PR. A seleção da bomba se deu através do método de Viana (1990), porém utilizaram uma bomba disponível, para baratear os custos, da marca KSB modelo Omega-V 125-230B, e a seleção do motor de indução foi realizada por meio da metodologia de Chapallaz (1990). O estudo concluiu que o sistema piloto apresentou resultados satisfatórios, com geração de aproximadamente 330 kWh/dia, com retorno financeiro de 22 meses.

Lima *et al.* (2017) desenvolveram um método para seleção e localização de BFT para operarem em redes de distribuição de água, baseado na maximização do benefício, isto é, na redução de vazamento nas tubulações e

aumento da produção de energia simultaneamente. O estudo utilizou a técnica de otimização *Particle Swarm Optimization* (PSO) e empregou o conjunto de curvas características completas de bombas, representadas no plano de Suter (TORLEY; CHAUDHRY, 1986). O método foi aplicado em duas redes fictícias, disponíveis em Gomes (2011), e apresentou melhores resultados ao se utilizar BFT em paralelos atuando em horários diferentes, gerando 94,1 kWh de energia e redução de 86,2 m<sup>3</sup> no volume de vazamento diário.

Lima (2017) apresentou um modelo de dimensionamento ótimo das redes de distribuição de água levando em consideração a exploração de energia. A solução do problema foi realizada através da minimização da função objetivo, definida pela soma dos custos das tubulações e da microcentral, descontados do benefício obtido com a geração de energia. O método foi aplicado no setor Laudissi, pertencente ao SAA de Santa Bárbara do Oeste-SP, podendo gerar um benefício de \$ 480.156 com um custo adicional de \$ 51.899, um valor nove vezes maior que o investimento adicional, e que supera o custo total de implantação da rede.

Lima *et al.* (2018) otimizaram a utilização de BFT no SAA de Piracicaba-SP. O método é baseado na operação dos dispositivos usando velocidade variável a fim de melhorar a recuperação de energia e reduzir vazamentos e também é aplicado na rede fictícia de Gomes (2011), mostrando melhoria quando comparado com os resultados obtidos por Lima *et al.* (2017) e também quando comparados com a utilização de VRP. Além disso, o SAA de Piracicaba-SP apresentou redução de 16,1% nos vazamentos (um aumento de 50,1% em relação à operação em velocidade constante) e produção de 1320 kWh de energia, correspondendo a 92,2% maior que a operação em velocidade constante.

## DISCUSSÕES

Apesar da existência de poucos estudos de aplicação das BFTs em sistemas de distribuição de água, foi possível averiguar a evolução significativa da utilização dessa tecnologia. Os estudos expõem a eficiência das BFTs quanto à redução de perdas e produção de energia, indicando ser uma alternativa de otimização sustentável.

Os artigos que compararam a utilização das BFTs com as VRPs mostram que as primeiras não são tão eficientes no gerenciamento de pressão quanto às válvulas, isso se deve principalmente ao comportamento da BFT em um sistema dinâmico, com variabilidade de vazão e pressão. Dessa forma, métodos utilizando BFTs com velocidade variável resultou em maiores benefícios, posto que estes se ajustam melhor em redes de distribuição de água.

Outra dificuldade também demonstrada ocorre na seleção das bombas para operarem em modo reverso, uma vez que, prever seu desempenho é complexo em diferentes situações. Diversos métodos são propostos, porém com a utilização restrita, como o método de Viana por exemplo. A seleção através da otimização do benefício proposto por Lima *et al.* (2017) e do método VOS se mostram ser uma solução atraente para as companhias de água, com alta geração energia.

Além disso, o Computational Fluid Dynamics CFD é uma ferramenta que pode ser utilizada para calcular as curvas características das BFTs, além de analisar sua atuação no sistema de distribuição de água concedendo mais confiabilidade no sistema e garantindo melhores tomadas de decisões.

Os estudos que analisaram as localizações ótimas das BFTs, revelam que este é um dos meios para otimizar a eficiência energética na rede. A simples substituição das VRPs, não maximiza a geração de energia elétrica, sendo então, necessário, a utilização de algoritmos para predizer o ponto de instalação mais favorável.

Em relação à viabilidade econômica, a maioria dos estudos concluiu que os riscos de investimentos são baixos, e apresentam retorno financeiro curto devido ao baixo custo da BFT se comparado com os custos da turbina, a alta geração de energia e economia relacionada com a redução de vazamento de água nas tubulações.



## CONCLUSÕES

A utilização de BFTs em sistemas de distribuição de água mostra-se bastante viável, tanto no ponto de vista técnico quanto econômico. Para a análise da implantação da micro central, deve-se analisar fatores como tarifas de energia e custo de produção de água.

Possivelmente o grande desafio do Século XXI, é a busca da sustentabilidade. Em um planeta capitalista e globalizado, a preservação e a otimização dos recursos naturais têm importância não apenas teórica ou acadêmica, mas podem influir no sistema político, econômico e social de uma nação.

A presente revisão sistemática apresentada analisou os diferentes estudos sobre a atuação das bombas operando em reverso nas redes, e concluiu que tal sistema é plenamente exequível e possível de implementação, devendo para tanto, ter sua metodologia aprofundada e ser aplicada em seu maior grau de eficiência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AUDISIO, O.A. *Bombas utilizadas como turbinas*. Laboratorio de Máquinas Hidráulicas. Universidad de Comahue. Argentina, 2002.
2. CARRAVETTA, A., ANTIPODI, L., GOLIA, U., FECAROTTA, O. *Energy saving in a water supply network by coupling a pump and a pump as turbine (PAT) in a turbopump*. Water, v. 9, n. 62, p. 14, 2017.
3. CARRAVETTA, A., DEL GIUDICE, G., FECAROTTA, O., RAMOS, H.M. *Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy*. Water Resour Manage, n. 26, p. 3947–3959, 2012.
4. CARRAVETTA, A., DEL GIUDICE, G., FECAROTTA, O., RAMOS, H.M. *Pat design strategy for energy recovery in water distribution networks by electrical regulation*. Energies, v. 6, n. 1, p. 411–424, 2013.
5. CARRAVETTA, A., FECAROTTA, O., RAMOS, H.M. *Numerical simulation on pump as turbine: Mesh reliability and performance concerns*. In Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power, Ischia, Italy, p. 14–16, 2011.
6. CARRAVETTA, A., FECAROTTA, O., SINAGARA, M., TUCCIARELLI, T. *Cost-benefit analysis for hydropower production in water distribution networks by a pump as turbine*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 140, n. 6, p. 1-8, 2014.
7. CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. *Manual on Pumps Used as Turbines*. MHPG Series, v. 11, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Germany, 1992.
8. CHAPALLAZ J. M.; GHALI, J. D.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; *Manual on Motors Used as Generators*. MHPG Series, v. 10, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Germany, 1990.
9. CHAPPELL, J. R.; HICKMAN, W.W.; SEEGMILLER, D.S. *Pump As Turbine (Hydraulic) Pumps as turbines Experience Profile*. Acc. 02, IDO-10109, EG & G Idaho Inc., p. 56, September 1982.
10. CORCORAN, L., MCNABOLA, A., COUGHLAN, P. *Optimization of water distribution networks for combined hydropower energy recovery and leakage reduction*. J Water Resour Plan Manag, v. 42, n. 2, 2015.
11. COVELLI, C., CIMORELLI, L., COZZOLINO, L., DELLA MORTE, R., PIANESE, D. *Reduction in water losses in water distribution systems using pressure reduction valves*. Water Science and Technology: Water Supply, v. 16, n. 4, p. 1033-1045, 2016.
12. 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, 2008.
13. FECAROTTA, O., ARICÒ, C., CARRAVETTA, A., MARTINO, R., RAMOS, H. M. *Hydropower potential in water distribution networks: Pressure control by pats*. Water Resour Manage, v. 29, n. 3, p. 699–714, 2014.
14. FECAROTTA, O., CARRAVETTA, A., RAMOS, H.M. *CFD and comparisons for a pump as turbine: mesh reliability and performance concerns*. International Journal of Energy and Environment, v. 2, n. 1, p.39-48, 2011.
15. FECAROTTA, O., MCNABOLA, A. *Optimal location of pump as turbines (pats) in water distribution networks to recover energy and reduce leakage*. Water Resour Manage, v. 31, p. 5043–5059, 2017.
16. FERNÁNDEZ, J. BLANCO, E. PARRONDO, J. STICKLAND, M. T. SCANLON, J. *Performance of a centrifugal pump running in inverse mode*, (2004) Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 218 Part A: J. Power and Energy
17. FONTANA, N., GIUGNI, M., GLIELMO, L., & MARINI, G. (2016). *Real time control of a prototype for pressure regulation and energy production in water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, 142(7), 04016015.

18. FONTANA, N., GIUGNI, M., PORTOLANO, D. *Losses reduction and energy production in water distribution networks*. J Water Res PI-ASCE, v. 138, n. 3, p. 237–244, 2012.
19. GARCÍA, J.P., MARCO, A.C., SANTOS, S.N. *Use of centrifugal pumps operating as turbines for energy recovery in water distribution networks*. Two case study. Advanced Materials Research, v. 107, p 87-92, 2010.
20. GIUGNI, M., FONTANA, N., PORTOLANO, D. *Energy saving policy in water distribution networks*. Renewable Energy Power Quality Journal, v. 7, n. 487, p. 1–6, 2009.
21. GIUGNI, M., FONTANA, N., RANUCCI, A. *Optimal location of PRVs and turbines in water distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 104, n. 9, 2014.
22. GOMES, R.J., MARQUES, A.S., SOUSA, J. *Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems*. Urban Water J., v. 8, n. 2, p. 65–77, 2011.
23. JAFARI, R., KHANJANI, M., ESMAEILIAN, H.R. *Pressure management and electric power production using pumps as turbines*. Journal American Water Works Association, 2015.
24. KHAN, K.S., KUNZ, R., KLEIJNEN, J., ANTES, G. *Five steps to conducting a systematic review*. Journal of the Royal Society of Medicine, v. 96, n. 3, p. 118-121, 2003.
25. KITTREDGE, C.P.; THOMA, D. *Centrifugal pumps operated under abnormal conditions*. Power, p. 881-884, 1931.
26. KRAMER, M., TERHEIDEN, K., WIEPRECHT, S. *Pumps as turbines for efficient energy recovery in ater supply networks*. Renewable Energy, v. 122, p. 17-25, 2018.
27. LIMA, G.M. *Geração de energia e controle de pressão em redes de abastecimento de água utilizando bombas funcionando como turbina*. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Energéticos e Ambientais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
28. LIMA, G.M., LUVIZOTTO, E., BRENTAN, B.M., RAMOS, H.M. *Leakage control and energy recovery using variable speed pumps as turbines*. J. Water Resour. Plann. Manage., v. 144, n. 1, 2018.
29. LIMA, G.M., LUVIZOTTO, E., BRENTAN, B.M. *Selection and location of pumps as turbines substituting pressure reducing valves*. Renewable Energy, v. 109, p. 392-405, 2017.
30. LIMA, G.M., VIANA, A.N.C., DIAS, R.S.C. *Eficiência energética e controle de pressão utilizando bombas funcionando como turbina em redes de distribuição de água*. The 9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2013.
31. MARCHIS, M., FRENI, G. *Pump as turbine implementation in a dynamic numerical model: cost analysis for energy recovery in water distribution network*. Journal of Hydroinformatics, 2016.
32. MORANI, M.C., CARRAVETTA, A., GIUDICE, G.D., MCNABOLA, A., FECAROTTA, O. *A comparison of energy recovery by pats against direct variable speed pumping in water distribution networks*. Fluids, v. 3, n. 41, 18p, 2018.
33. POULIEZOS, A., KANELLOS, F.D., PAPAETHIMIOU, S, KATSIGIANNIS, Y.A. *Energy management system for water distribution systems: applicatio to crate*. Trivent, 2016.
34. RAMOS, H., BORGA, A. *Pumps as turbines: an unconventional solution to energy production*. Urban Water, v. 1, n. 3, p. 261–3, 1999.
35. RAMOS, H., COVAS, D., ARAUJO, L., MELLO, M. *Available energy assessment in water supply systems*. Proceedings of the Congress— International Association for Hydraulic Research, v. 1, p. 250–1, 2005.
36. SANTOS, F.D.T. *Avaliação do potencial energético associado a uma válvula redutora de pressão - caso de estud*. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.
37. SHARMA, K.R. *Small hydro electric projects – use of centrifugal pump as turbines*. Kirloskar Electric Company Limited. Bangalore, India, 1985.
38. SILVA, L. A.; GARCETE, M. E. H.; ASSIS, M. G. *Desenvolvimento e avaliação de um sistema piloto de microgeração hidroenergética na rede de abastecimento de água de Curitiba*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2016..
39. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018.
40. TORLEY, A. R. D.; CHAUDHRY, M. H. *Pump characteristics for transient flow analysis*. In: Pressure Surge and Fluid Transients (ed. B. Group), p. 461– 476, 1986.
41. VIANA, Augusto Nelson Carvalho. *Bombas funcionando como turbinas*. Rio de Janeiro: Synergia, 192p 2012.
42. VIANA, A.N.C.; NOGUEIRA, F. J. H.; *Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas*. Departamento de Mecânica. EFEI. Itajubá - MG. Março de 1990.
43. Williams, A. *Pumps as turbines – a user guide*. Intermediate Techonology Publications. Londres, 1995.