



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

PAMELLY SANTA BRIGIDA QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DE COMBINAÇÕES DE MODELOS PREDITIVOS DE
BOMBAS FUNCIONADO COMO TURBINAS EM CONDIÇÕES OFF-
DESIGN EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

TUCURUÍ
2025

PAMELLY SANTA BRIGIDA QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DE COMBINAÇÕES DE MODELOS PREDITIVOS DE
BOMBAS FUNCIONADO COMO TURBINAS EM CONDIÇÕES OFF-
DESIGN EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

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

Orientador: Prof. Dr. Davi Edson Sales E Souza

TUCURUÍ
2025

**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)**

Q3a Queiroz, Pamily Santa Brigida Queiroz.
AVALIAÇÃO DE COMBINAÇÕES DE MODELOS
PREDITIVOS DE BOMBAS FUNCIONADO COMO
TURBINAS EM CONDIÇÕES OFFDESIGN EM REDES DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA / Pamily Santa Brigida Queiroz
Queiroz. — 2025.
43 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Davi Edson Sales E Souza Souza
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Sanitária e Ambiental, Tucuruí, 2025.

1. Bombas Funcionando como Turbinas. 2. VRP. 3.
Sistema de abastecimento de água. 4. Recuperação de Energia.
I. Título.

CDD 333.91

PAMELLY SANTA BRIGIDA QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DE COMBINAÇÕES DE MODELOS PREDITIVOS DE
BOMBAS FUNCIONADO COMO TURBINAS EM CONDIÇÕES OFF-
DESIGN EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

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

Data da aprovação: 06/11/2025

Conceito: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Davi Edson Sales e Souza
Orientador - FAESA/UFPA

Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara (FAESA/UFPA)
Examinador Interno a FAESA/CAMTUC

Eng. Vitória Barbosa Portilho (UFPA)
Examinador Externo a FAESA/CAMTUC

Dedico este trabalho à minha família, meus pais Patrícia e Luismar, minhas irmãs Polliana, Lucilla e Maria Cecilia, e ao meu avô, Luiz Xavier, cujo amor e apoio incondicional tornaram possível a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Durante minha trajetória, muitas pessoas foram essenciais nessa jornada. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e por guiar cada etapa desse caminho. Agradeço imensamente à minha querida mãe, Patricia dos Reis Santa Brígida, pelo apoio incondicional, pelo amor e pelas palavras encorajadoras que sempre me deram a certeza de que eu conseguiria. Ao meu pai, Luismar Bezerra Queiroz, por estar sempre ao meu lado, oferecendo ajuda e apoio em todos os momentos. Minha eterna gratidão à minha melhor amiga, Nedlyn Bruna da Silva, por sua amizade sincera e por permanecer ao meu lado nos momentos em que me senti mais vulnerável.

Expresso minha gratidão a todos os professores que compartilharam seus conhecimentos ao longo desses cinco anos de curso, em especial ao meu orientador e professor Davi Sales, cuja dedicação e ensinamentos foram fonte de motivação e aprendizado. Aos meus colegas de sala, com destaque para Ana Cristina, minha dupla inseparável ao longo de todo o curso. Afirmando novamente a minha sincera gratidão a todos que fizeram parte da minha trajetória acadêmica. As experiências vividas e os conhecimentos adquiridos ao longo desse percurso serão sempre lembrados e valorizados.

Obrigada!!

Pamelly Santa Brígida Queiroz

“Saneamento básico é a primeira e mais importante vacina da humanidade. Nenhum outro investimento em saúde pública produz resultados tão imediatos e duradouros para o bem-estar coletivo. Onde há saneamento, há prevenção, onde falta, multiplicam-se doenças e desigualdades” (Castro, 2003, P.45).

Josué de Castro

RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de combinações de modelos preditivos aplicados à estimativa do comportamento hidráulico de bombas operando como turbinas (BFTs) em condições fora do ponto de projeto, em redes de distribuição de água. Foram analisadas duas combinações amplamente referenciadas da literatura: Yang+Rossi e Stepanoff+Rossi. Os modelos permitem a determinação do ponto de melhor eficiência (MPE) da bomba e o comportamento hidráulico em regime fora do ponto de projeto (off-design). A metodologia adotada envolveu a formulação de relações adimensionais para construção das curvas de desempenho e validação frente a dados experimentais disponíveis, abrangendo diferentes faixas de velocidade específicas. A combinação Yang+Rossi apresentou desempenho mais consistente e foi aplicada em um estudo de caso real em uma área de medição distrital (AMD) localizada em Tucuruí-PA. A BFT selecionada foi inserida no software EPANET 2.2, considerando operação em velocidade variável durante 18 horas diárias. A simulação indicou que a BFT manteve o controle da pressão dentro dos limites normativos, operando de forma eficiente mesmo em faixas de vazão fora do ponto de projeto. A curva característica gerada permitiu prever a eficiência em função da rotação, com desempenho otimizado durante os horários de maior consumo. A potência média gerada pela BFT foi de 3,44 kw, resultando em uma recuperação energética anual de 22.620 kwh.

Palavras-chave: Modelos de Predição; Bomba como Turbina; Redes de Distribuição de Água; Recuperação de Energia; Válvulas redutoras de pressão.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the performance of combinations of predictive models applied to estimating the hydraulic behavior of pumps operating as turbines (PAT) under off-design conditions in water distribution networks. Two widely referenced combinations from the literature were analyzed: Yang+Rossi and Stepanoff+Rossi. These models enable the determination of the best efficiency point (BEP) of the pump and its hydraulic behavior in off-design regimes. The adopted methodology involved formulating dimensionless relationships to construct performance curves and validating them against available experimental data, covering different specific speed ranges. The Yang+Rossi combination showed more consistent performance and was applied in a real case study in a district metered area (DMA) located in Tucuruí, Pará, Brazil. The selected PAT was integrated into EPANET 2.2 softwares, considering variable speed operation for 18 hours per day. The simulation indicated that the PAT maintained pressure control within regulatory limits, operating efficiently even under flow conditions outside the design point. The generated characteristic curve enabled the prediction of efficiency as a function of rotational speed, with optimized performance during peak demand periods. The average power generated by the PAT was 3.44 kW, resulting in an annual energy recovery of 22,620 kWh.

Keywords: Predictive Models; Pump as Turbine; Water Distribution Networks; Energy Recovery; Pressure reducing valves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo: RDA da vila permanente em Tucuruí-PA.....	25
Figura 2. Instalação VRP e instalação BFT.....	26
Figura 3. Curva $\psi-\Phi$ (a).....	27
Figura 4. Curva $\eta-\omega$ (b)	28
Figura 5. Curva H-Q em velocidade variável.....	31
Figura 6. Curva $\eta-Q$ em velocidade variável.....	31
Figura 7. Pressões nodais registradas às 7h, 11h e 23h durante a operação da BFT.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Métodos de previsão da bomba como turbinas (BFTs) em seu melhor ponto de eficiência.....	20
Tabela 2. Modelos associados na pesquisa.....	23
Tabela 3. Resultados do cálculo do erro relativo.....	29
Tabela 4. Características hidráulicas no modo bomba e turbina	30
Tabela 5. Valores obtidos na combinação para a BFT 3.3 operando em off-design.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAA	Sistema de Abastecimento de água
VRP	Válvula Redutora de Pressão
BFT	Bombas Funcionando como Turbina
MPE	Melhor Ponto de Eficiência
RDA	Rede de Abastecimento de Água
AMD	Área de Medição Distrital
Ns	Velocidade Específica
Ht	Altura da Turbina
Hb	Altura da Bomba
Qt	Vazão da Turbina
Qb	Vazão da Bomba

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Eficiência da máquina
Φ	Coefficiente de Fluxo
Ψ	Coefficiente de Pressão
ρ	Massa Especifica
H	Altura
Q	Vazão
g	Aceleração da Gravidade
D	Diâmetro
P	Potência
%e	Erro Relativo
N	Rotação da Máquina
h	Coefficiente de Altura
q	Coefficiente de Vazão

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento populacional e a expansão urbana e industrial têm elevado a demanda por água e energia, impondo desafios significativos para a garantia do fornecimento seguro e sustentável desses recursos. Dentre os principais obstáculos, destacam-se a dependência de fontes energéticas não renováveis, os elevados custos operacionais, as perdas nos sistemas de distribuição e a necessidade de infraestruturas mais eficientes. Nesse contexto, torna-se urgente a adoção de soluções inovadoras que associem eficiência energética e sustentabilidade.

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) representam um setor com grande potencial para a geração de energia renovável, uma vez que operam com pressões muitas vezes superiores às necessárias, especialmente em regiões de relevo acidentado. Tradicionalmente, o excesso de pressão é dissipado por meio de válvulas redutoras de pressão (VRPs), o que resulta em desperdício energético. A substituição dessas válvulas por bombas operando como turbinas (BFTs) surge como uma alternativa viável, permitindo não apenas o controle da pressão, mas também a recuperação de energia hidráulica (Creaco et al., 2020).

Entretanto, a aplicação prática das Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) ainda apresenta limitações de ordem técnica, sobretudo em razão da escassez de dados referentes ao seu desempenho em regime reverso. De modo geral, os fabricantes não disponibilizam as curvas características de operação como turbina, o que compromete a seleção e o dimensionamento precisos desses equipamentos. Para suprir essa lacuna, diversos modelos preditivos têm sido propostos, baseando-se no melhor ponto de eficiência (MPE) e, mais recentemente, em análises voltadas às condições de operação fora do ponto de projeto (*off-design*).

No entanto, é unanimidade entre os pesquisadores que os modelos que consideram apenas o MPE mostram-se insuficientes para representar o comportamento real das BFTs em redes de distribuição, onde as condições de vazão e pressão variam continuamente. Contudo, os modelos que priorizam o melhor ponto de eficiência (MPE) constituem uma condição inicial e indispensável para a análise preliminar de uma máquina destinada a operar como turbina e recuperar energia. Desse modo, realizar combinações de modelos que integram o MPE e o regime *off-design* apresenta-se como uma estratégia para melhorar a precisão das previsões e otimizar o desempenho das BFTs.

Nesse sentido, este trabalho propõe a avaliação de combinações de modelos preditivos consagrados na literatura, com o intuito de identificar a associação mais eficiente para prever o comportamento hidráulico de BFTs em condições reais de operação. A metodologia foi

aplicada em um estudo de caso em uma rede de distribuição de água, visando validar técnica e energeticamente a substituição de VRPs por BFTs.

2 JUSTIFICATIVA

A busca por eficiência energética e sustentabilidade nos sistemas de abastecimento de água justifica a investigação de tecnologias como as bombas operando como turbinas (BFTs). Esses equipamentos permitem aproveitar o potencial hidráulico dissipado nas redes, convertendo-o em energia elétrica, o que contribui para a redução de custos operacionais e a diminuição da pegada ambiental do sistema.

Apesar das vantagens, a aplicação em larga escala das BFTs esbarra na falta de dados confiáveis sobre seu desempenho em modo turbina. A carência de curvas características fornecidas pelos fabricantes limita a precisão na seleção e na operação dessas máquinas, especialmente sob condições variáveis de vazão e pressão.

Estudos anteriores evidenciam que a combinação de modelos preditivos, associando o melhor ponto de eficiência (MPE) e condições de *off-design*, pode superar as limitações dos métodos isolados. (Rossi, Nigro e Renzi, 2019) desenvolveram modelos para prever o desempenho de BFTs em condições *off-design*. A validação foi realizada por meio de simulações CFD (Computational Fluid Dynamics) aplicadas a uma bomba centrífuga operando no sentido reverso, e os resultados mostraram que o modelo consegue estimar com precisão tanto o desempenho quanto a eficiência da BFT em condições próximas às de projeto. Essa abordagem híbrida possibilita uma representação mais fiel do comportamento hidráulico das BFTs, essencial para operações em velocidade variável, comprovadamente mais adequado quando a máquina é empregada em RDA (Rede de Abastecimento de Água). Segundo (Souza, 2022) o controle por velocidade variável em BFTs permite não apenas manter a pressão de saída próxima a 10 m, mas também ajustar a diferença de carga hidráulica às exigências da VCP (Válvula de controle de pressão). Além disso, essa estratégia amplia a faixa de vazões de maior eficiência, tornando o desempenho mais estável e vantajoso em relação à operação com velocidade constante. (Morani et al., 2018) estudaram alternativas para melhorar a eficiência energética em sistemas de abastecimentos no Condado de Laois, Irlanda, comparando BFTs e o bombeamento direto com controle de velocidade variável. Os resultados mostraram que, embora a BFT pudesse gerar energia, o bombeamento direto em velocidade variável apresentou menor consumo anual e maior eficiência.

Além disso, a validação desses modelos em casos reais, com auxílio de ferramentas de simulação como o EPANET, é fundamental para consolidar metodologias confiáveis e reproduzíveis. Portanto, este trabalho justifica-se pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o desempenho de BFTs e oferecer subsídios técnicos para sua implantação eficiente em sistemas abastecimento.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAL

Avaliar combinações de modelos preditivos de bombas operando como turbinas (BFTs) em condições de melhor ponto de eficiência (MPE) e regime *off-design*, aplicando a combinação mais precisa em um estudo de caso real para recuperação energética e controle de pressão em rede de distribuição de água.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compilar modelos preditivos de BFT disponíveis na literatura, com ênfase nos que abordam o MPE e condições *off-design*;
- Validar as combinações de modelos propostas por meio da comparação com dados experimentais, calculando o erro relativo para identificar a associação mais precisa;
- Aplicar a melhor combinação de modelos para selecionar e simular uma BFT em um estudo de caso real, utilizando o *software* EPANET 2.2;
- Quantificar a energia recuperada e o controle de pressão proporcionados pela BFT em regime de velocidade variável, comparando com o cenário original com VRP.

4 RESULTADOS

AVALIAÇÃO DE COMBINAÇÕES DE MODELOS PREDITIVOS DE BOMBAS FUNCIONADO COMO TURBINAS EM CONDIÇÕES OFF-DESIGN EM REDES MUNICIPAIS DE ÁGUA

Date of receipt: 01/09/2024

Date of acceptance for publication: 02/21/2024

DOI: <https://doi.org/10.54033/icmrvXnX->

Pamelly Santa Brigida Queiroz¹, Vitória Barbosa Portilho² Davi Edson Sales e Souza³

RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de combinações de modelos preditivos aplicados à estimativa do comportamento hidráulico de bombas operando como turbinas (BFTs) em condições fora do ponto de projeto, em redes de distribuição de água. Foram analisadas duas combinações amplamente referenciadas da literatura: Yang+Rossi e Stepanoff+Rossi. Os modelos permitem a determinação do ponto de melhor eficiência (MPE) da bomba e o comportamento hidráulico em regime fora do ponto de projeto (off-design). A metodologia adotada envolveu a formulação de relações adimensionais para construção das curvas de desempenho e validação frente a dados experimentais disponíveis, abrangendo diferentes faixas de velocidade específicas. A combinação Yang+Rossi apresentou desempenho mais consistente e foi aplicada em um estudo de caso real em uma área de medição distrital (AMD) localizada em Tucuruí-PA. A BFT selecionada foi inserida no software EPANET 2.2, considerando operação em velocidade variável durante 18 horas diárias. A simulação indicou que a BFT manteve o controle da pressão dentro dos limites normativos, operando de forma eficiente mesmo em faixas de vazão fora do ponto de projeto. A curva característica gerada permitiu prever a eficiência em função da rotação, com desempenho otimizado durante os horários de maior consumo. A potência média gerada pela BFT foi de 3,44 kw, resultando em uma recuperação energética anual de 22.620 kwh.

Palavras-chave: Modelos de predição. Bomba como turbina. Redes de distribuição de água. Recuperação de energia

EVALUATION OF PREDICTIVE MODEL COMBINATIONS FOR PUMPS OPERATING AS TURBINES UNDER OFF-DESIGN CONDITIONS IN MUNICIPAL WATER NETWORKS

¹ Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Tucuruí- Pará, Brasil.

E-mail: pamelly.queiroz@tucurui.ufpa.br

² Mestranda em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Tucuruí- Pará, Brasil.

E-mail: vitoria.portilho@tucurui.ufpa.br

³ Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí – Pará, Brasil.

E-mail: davisales@ufpa.br

ABSTRACT

This study aims to evaluate the performance of combinations of predictive models applied to estimating the hydraulic behavior of pumps operating as turbines (PAT) under off-design conditions in water distribution networks. Two widely referenced combinations from the literature were analyzed: Yang+Rossi and Stepanoff+Rossi. These models enable the determination of the best efficiency point (BEP) of the pump and its hydraulic behavior in off-design regimes. The adopted methodology involved formulating dimensionless relationships to construct performance curves and validating them against available experimental data, covering different specific speed ranges. The Yang+Rossi combination showed more consistent performance and was applied in a real case study in a district metered area (DMA) located in Tucuruí, Pará, Brazil. The selected PAT was integrated into EPANET 2.2 software, considering variable speed operation for 18 hours per day. The simulation indicated that the PAT maintained pressure control within regulatory limits, operating efficiently even under flow conditions outside the design point. The generated characteristic curve enabled the prediction of efficiency as a function of rotational speed, with optimized performance during peak demand periods. The average power generated by the PAT was 3.44 kW, resulting in an annual energy recovery of 22,620 kWh.

Keywords: Predictive models. Pump as turbine. Water distribution networks. Energy recovery.

EVALUACIÓN DE COMBINACIONES DE MODELOS PREDICTIVOS DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS EN CONDICIONES OFF-DESIGN EN REDES MUNICIPALES DE AGUA

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo evaluar el rendimiento de combinaciones de modelos predictivos aplicados a la estimación del comportamiento hidráulico de bombas que operan como turbinas (PATs) en condiciones fuera del punto de diseño, en redes de distribución de agua. Se analizaron dos combinaciones ampliamente referenciadas en la literatura: Yang+Rossi y Stepanoff+Rossi. Estos modelos permiten determinar el punto de mejor eficiencia (BEP) de la bomba y su comportamiento hidráulico en régimen fuera del diseño. La metodología adoptada involucró la formulación de relaciones adimensionales para construir las curvas de rendimiento y su validación frente a datos experimentales disponibles, abarcando diferentes rangos de velocidad específica. La combinación Yang+Rossi presentó un rendimiento más consistente y fue aplicada en un estudio de caso real en un área de medición distrital (DMA) ubicada en Tucuruí, Pará, Brasil. La PAT seleccionada fue incorporada al software EPANET 2.2, considerando operación a velocidad variable durante 18 horas diarias. La simulación indicó que la PAT mantuvo el control de presión dentro de los límites normativos, operando de manera eficiente incluso en caudales fuera del punto de diseño. La curva característica generada permitió prever la eficiencia en función de la velocidad de rotación, con un rendimiento optimizado durante los períodos de mayor consumo. La potencia media generada por la PAT fue de 3,44 kW, resultando en una recuperación energética anual de 22.620 kWh.

Palabras clave: Modelos predictivos. Bomba como turbina. Redes de distribución de agua. Recuperación de energía.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na gestão de sistemas de abastecimento de água (SAA) tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à eficiência energética e ao aproveitamento de recursos antes desperdiçados. Nesse contexto, as redes de distribuição de água (RDA) representam uma oportunidade confiável para a recuperação de energia, sobretudo com a integração de bombas operando como turbinas (BFT) em substituição às válvulas redutoras de pressão (VRP), tradicionalmente utilizadas para o controle da pressão nas tubulações. O uso excessivo das válvulas implica na dissipação da energia de pressão disponível, o que representa uma perda considerável do potencial energético do sistema que pode ser recuperado pelas BFT.

A substituição das VRPs por BFTs viabiliza não apenas o controle eficiente da pressão nas redes, reduzindo o desperdício de água e energia, mas também possibilita a conversão do excedente hidráulico em energia elétrica. Essa abordagem contribui significativamente para a sustentabilidade operacional dos sistemas e está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ao promover o uso eficiente dos recursos hídricos e energéticos, bem como a inovação na infraestrutura urbana.

Esses equipamentos apresentam a vantagem de operar em múltiplas faixas de vazão e pressão, com menor custo de investimento e retorno financeiro mais atrativo em comparação às turbinas convencionais (Maleki *et al.*, 2020). No entanto, sua ampla aplicação ainda é limitada pela escassez de informações sobre suas curvas de desempenho em modo reverso, que geralmente permanecem restritas aos fabricantes e raramente são disponibilizadas ao público técnico ou acadêmico (Novara; McNabola, 2018).

Nos últimos anos, diferentes métodos têm sido propostos para estimar o comportamento das BFTs. Os tradicionais baseiam-se na predição do Melhor Ponto de Eficiência (MPE) (Alatorre-Frenk, 1994; Yang; Derakhshan; Kong, 2012) e no número de velocidade específica da bomba (Singh; Nestmann, 2010; Tan; Engeda, 2016). Apesar de úteis, esses modelos são limitados para representar a dinâmica operacional real das BFTs, uma vez que, quando instaladas em RDAs, essas máquinas operam sob diversas condições ao longo do dia, frequentemente distantes de seu MPE, o que caracteriza o chamado regime fora de projeto (*off-design*) (Polák, 2019).

Apenas recentemente, pesquisas têm buscado caracterizar o desempenho hidráulico das BFTs em regime *off-design*, a fim de ampliar o conhecimento técnico sobre sua aplicação em

sistemas hidráulicos (Rossi *et al.*, 2019; Pérez Sánchez *et al.*, 2017; Stefanizzi 2018). Ainda assim, Renz e Rossi (2019) destacam que a avaliação da taxa de eficiência no MPE e o comportamento das BFT fora desse ponto operacional permanecem como os principais desafios nesse tipo de estudo. Essa lacuna metodológica reforça a necessidade de modelos capazes de prever o desempenho de forma mais abrangente e precisa, representando toda a faixa de operação da máquina.

Considerando que, na maioria dos casos, as aplicações das BFTs envolvem a recuperação de energia em redes sujeitas a variações diárias de vazão e pressão, influenciadas por fatores climáticos, socioeconômicos e pelo padrão de consumo dos usuários, torna-se fundamental não apenas identificar o MPE, mas também estimar o comportamento da BFT ao longo de toda sua curva de operação. Isso permitiria extrapolar com mais segurança as curvas de potência e carga, favorecendo a seleção adequada do equipamento para cada cenário específico.

Nesse sentido, como os métodos que preveem exclusivamente o MPE são menos confiáveis (Fecarotta *et al.*, 2011), sua aplicação torna-se mais robusta quando combinados com modelos que consideram o comportamento *off-design*. Embora a definição do MPE seja insuficiente para descrever o desempenho completo da máquina, ela continua sendo uma etapa inicial e fundamental para a predição de sua curva de operação como turbina.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe a associação de três modelos consolidados na literatura para prever o comportamento de BFTs em redes de distribuição de água, totalizando duas combinações preditivas. A melhor combinação deve priorizar, inicialmente, a seleção do equipamento com base no MPE, em seguida, seu desempenho sob condições variáveis de vazão e pressão (*off-design*). O objetivo é avaliar a viabilidade técnica e energética da substituição das VRPs por BFTs em RDAs, utilizando modelos híbridos de predição (MPE+*off-design*), os quais serão validados com a comparação de curvas experimentais de BFT disponíveis na literatura. A melhor combinação será aplicada em um estudo de caso para quantificar a energia recuperada com a aplicação do modelo conjunto proposto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BOMBAS FUNCIONADO COMO TURBINAS

Atualmente, as turbinas hidráulicas passaram por uma rápida evolução, já sendo conhecidas como uma solução tecnológica altamente eficiente para transformar energia potencial em energia mecânica. A diferença entre uma bomba e uma turbina é que a bomba converte energia mecânica fornecida pelo rotor em energia elétrica e energia de pressão, já as turbinas são máquinas que convertem a energia hidráulica em energia mecânica do rotor (Carvalho; Lemos, 1970). Estudos comprovaram que para uma bomba operar como turbina, é necessário alterar o sentido do fluxo através da inversão da rotação do rotor da máquina (Vilanova, 2007). Pesquisas realizadas por Viana (1987) demonstraram a viabilidade da utilização de bombas centrifugas operando como turbinas, porém recomendam-se utilizá-las com potência de 50 kW.

Viana (1987) analisou dois cenários para o funcionamento de uma bomba centrífuga. No primeiro, a bomba opera em seu modo convencional, no qual o fluido é admitido pela sucção com baixa pressão, e o rotor converte a energia cinética, elevando significativamente a pressão. No segundo cenário, a bomba é invertida para operar como turbina (BFT), fazendo com que o fluido entre com alta pressão e seja liberado com baixa pressão.

A utilização de BFTs para a geração de energia elétrica é justificada pela simplicidade dessas bombas durante a instalação e manutenção da máquina. São grandes os fatores que contribuem para a perda de energia no SAA, como o atrito nas tubulações, que reduz a pressão ao longo do percurso do fluxo. Além disso, mudanças na velocidade do fluido, causadas por curvas, válvulas e conexões, geram turbulência e dissipação de energia. Esses fatores resultam em uma maior demanda de energia para manter o fluxo adequado, afetando a eficiência do sistema. Carravetta *et al.*, (2012) propuseram um modelo para selecionar a BFT adequada para aplicar em uma RDA, através de um método que auxilia a BFT a reduzir pressões através de estratégias de operação variando a velocidade da máquina.

2.2 PREDIÇÃO DE BOMBAS COMO TURBINAS

A determinação das curvas características é essencial para compreender o desempenho das BFT. Pesquisas tem sido conduzida para avalia parâmetros como vazão, altura manométrica e eficiência, possibilitando a aplicação adequada dessas máquinas em sistemas hidráulicos. Delgado *et al.*, (2019) por meio da técnica matemática conhecida como expansão

do caso polinomial de Hemite, desenvolveram um método para prever as curvas características das BFTs. Essa abordagem possibilita a identificação do ponto ideal da eficiência, maximizando o desempenho da bomba. Rossi *et al.*, (2016) selecionaram uma BFT e realizaram uma análise não dimensional. As curvas características da BFT apresentaram resultados que a BFT poderia produzir 338,11 kwh de eletricidade para cada dia de operação.

Pugliese *et al.*, (2016) aplicaram um estudo em RDAs para prever as curvas características de BFTs na recuperação de energia, utilizando duas bombas centrífugas. Os resultados indicaram que a equação da curva de potência é adequada para números adimensionais de vazão inferiores a 0,40.

Como já relatado, a determinação das curvas características das BFTs é um desafio constante, uma vez que os fabricantes de bombas geralmente não as fornecem quando operam como turbinas (Williams, 1995). Quando uma bomba opera em modo turbina, sua carga e o fluxo no ponto de melhor eficiência MPE são maiores que quando uma bomba opera em modo bomba, e a potência de saída é superior do que a potência de entrada da bomba em seu melhor ponto de eficiência (Agostinelli; Shafer, 2013).

2.2.1 Modelos que priorizam o melhor ponto de eficiência da bomba (MPE)

Os modelos BEP representam o ponto no qual a bomba atinge seu rendimento máximo, conhecido como melhor ponto de eficiência (MPE). Esses modelos são aplicados para identificar as condições ideais de operação, como vazão e pressão. Conforme Chapallaz *et al.* (1992), os métodos de estimativa do desempenho das BFT podem apresentar variações de até $\pm 20\%$ em relação ao MPE, devido a fatores como perdas hidráulicas e especificidades construtiva da máquina. Na literatura é apresentado métodos empíricos que relacionam o desempenho da bomba a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, visando obter os coeficientes de pressão e vazão que operam em diferentes máquinas (Marchiori *et al.*, 2019).

Embora as bombas possuam seu MPE, nem todas são adequadas para operar como BFTs. Binama *et al.*, (2017) apontam que métodos teóricos podem ser empregados para estimar as curvas características das BFTs. Alguns estudos estabeleceram relações baseadas na eficiência da bomba operando no modo convencional (Stepanoff, 1957; Childs, 1962; Sharma, 1985; Alatorre-Frenk, 1994). Enquanto outros autores analisaram o desempenho com base na velocidade específica da bomba (Yang *et al.*, 2012). A Tabela 1, apresenta alguns métodos da literatura que permite estimar a previsão do desempenho da BFT em seu MPE da bomba.

Tabela 1. Métodos de previsão da bomba como turbinas (BFTs) em seu melhor ponto de eficiência

Ano	Autor	Correção da pressão (h)	Fator de correção de descarga (q)
1957	Stepanoff	$\left(\frac{1}{\eta_p}\right)$ (1)	$\left(\frac{1}{\sqrt{\eta_p}}\right)$ (2)
1962	Childs	$\left(\frac{1}{\eta_p}\right)$ (3)	$\left(\frac{1}{\eta_p}\right)$ (4)
1963	Hancock	$\left(\frac{1}{\eta_t}\right)$ (5)	$\left(\frac{1}{\eta_t}\right)$ (6)
1980	Grover	$(2.693 - 0.0229 N_{st})$ (7)	$(2.379 - 0.0264 N_{st})$ (8)
1982	Lewinsky-Kesslits	$\left(1.3 - \frac{6}{N_{st}-3}\right)$ (9)	$\left(1.3 - \frac{1.6}{N_{st}-5}\right)$ (10)
1985	Sharma	$\left(\frac{1}{\eta_p^{1.2}}\right)$ (11)	$\left(\frac{1}{\eta_p^{0.8}}\right)$ (12)
1988	Schmiedl	$\left(-1.4 + \frac{2.5}{\eta_{hp}}\right)$ (13)	$\left(-1.5 + \frac{2.4}{\eta_{hp}^2}\right)$ (14)
1994	Alatorre-Frenk	$\left(\frac{1}{0.85\eta_p^5 + 0.385}\right)$ (15)	$\left(\frac{0.85\eta_p^5 + 0.385}{2\eta_p^{9.5} + 0.205}\right)$ (16)
1998	Sharma	$\left(\left[\frac{N_g}{N_m}\right]^2 \times \left(\frac{1.1}{\eta_p^{1.2}}\right)\right)$ (17)	$\left(\frac{N_g}{N_m}\right) \times \left(\frac{1.1}{\eta_p^{0.8}}\right)$ (18)
2008	Derakshan and Nourbakhsh	$\left(0.0233 \left(\frac{N_p Q_{BEP,P}}{(gH_{BEP,P})^{0.75} + 0.6464}\right)\right)$ (19)	$\left(0.0233 \left(\frac{N_p Q_{BEP,P}^{0.5}}{(gH_{BEP,P})^{0.75} + 0.6045}\right)\right)$ (20)
2009	Sing and Nestemann	$f(N_{z,P})$ (21)	$f(N_{z,P})$ (22)
2011	Nautiyal	$\left(41,667 \left(\frac{\eta_{BEP,P} - 0,212}{\ln(N_{s,P})}\right)\right)$ (23)	$\left(30,303 \left(\frac{\eta_{BEP,P} - 0,212}{\ln(N_{s,P})}\right)\right)$ (24)
2012	Yang <i>et al.</i>	$\left(\frac{1,2}{\eta_{BEP,P}^{1.1}}\right)$ (25)	$\left(\frac{1,2}{\eta_{BEP,P}^{0.55}}\right)$ (26)
2016	Tan and Engeda	$\left(\frac{1}{H_{BEP,T}}\right) \left(\frac{\omega D_O}{N_{s,T} D_{s,T} g^{\frac{3}{4}}}\right)^2$ (27)	

		$\left(\frac{\omega D_0^3}{Q_{BEP,P} \cdot g^4 \cdot D_{s,T}^3 \cdot N_{s,T}} \right) \quad (28)$
2017	Stefanizzi <i>et al.</i> , $(H_{BEP,T} = h \cdot H_{BEP,P}) \quad (29)$	$(Q_{BEP,T}) = \left(\frac{N_{s,T} H_{BEP,T}^{\frac{3}{4}}}{N} \right)^2 \quad (30)$

Fonte: Elaborado pelos autores

2.2.2 Modelos que priorizam a operação fora de projeto (off-design)

Por mais que diversos modelos para estimar o MPE das BFT com base nos parâmetros da bomba, ainda há um desafio na previsão do comportamento dessas máquinas em condições *off-design*. A determinação do MPE da BFT em condições fora de projeto, representa uma das maiores instabilidade nesse campo de pesquisa (Renz; Rossi, 2019). Embora diversos estudos tenham sido realizados para prever o funcionamento das BFT, ainda não foi desenvolvido um método universal capaz de abranger uma ampla faixa de velocidades específicas (Binama *et al.*, 2017). A alteração na geometria da bomba pode resultar em melhorias em seu funcionamento quando operada como turbina. No entanto, essa modificação pode levar a bomba a operar fora dos parâmetros de altura e vazão para os quais foi originalmente projetada (Singh, 2005).

As BFT têm a capacidade de operar com maior eficiência do que as turbinas em condições *off-design* (Morabito; Steimes; Hendrick, 2016). Esse fenômeno ocorre devido à falta de controle do fluxo, o que torna difícil prever o MPE das BFTs nessas condições (Giosio *et al.*, 2015). Entretanto, considerando que o desempenho das BFTs está vinculado às variações do fluxo e à demanda dos usuários no Sistema de Abastecimento de Água (SAA), é essencial avaliar não apenas o MPE de eficiência da BFT, mas também prever sua faixa de operação em condições *off-design*.

Como alternativa, para analisar as características de desempenho da BFT, são realizadas pesquisas experimentais e análises dimensionais. Por exemplo, Rossi *et al.*, (2019) elaboraram uma abordagem para antecipar o comportamento de uma BFT, utilizando como referência o MPE da turbina. O modelo foi elaborado com base na reinterpretação de dados experimentais da literatura. Os experimentos foram conduzidos tanto no modo bomba quanto BFT, avaliando as variações nas taxas de fluxo. A capacidade de previsão do modelo foi validada por meio de testes práticos, além de ser confirmada por simulações numéricas (Rossi *et al.*, 2019).

Rossi e Renzi, (2017) verificaram um método capaz de prever o desempenho da BFT em condições fora de projeto, devido à semelhança fluidodinâmica, tipologia e geometria da

máquina. Mdee *et al.*, (2017) introduziram um modelo analítico que otimiza o desempenho das bombas fora do ponto de projeto, focando nas relações de queda e vazão. Esse modelo ajusta a operação e condições *off-design*, melhorando a eficiência em situações fora dos parâmetros originais.

2.3 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Nas redes de distribuição de água, as perdas de energia são inevitáveis devido às restrições no fluxo impostas pela VCP, que reduzem a pressão do fluido e geram perda de carga. Moura (2010) destaca que adoção de inversores de frequência para o controle da rotação das bombas nos sistemas de abastecimento de água SAA é uma estratégia eficiente para reduzir o consumo de energia elétrica e otimizar a operação do sistema. Além disso, o uso de equipamentos de menor porte em determinados períodos do dia pode contribuir para minimizar a dissipação excessiva de energia.

Ramos e Borga (1999) foram os primeiros a demonstrar que as BFTs podem ser utilizadas para produzir energia renovável em RDA. O estudo foi realizado com base em parâmetros de Suter onde concluíram que independente da bomba ser alternada, a utilização de BFT é a melhor solução econômica (Torley; Chaudhry, 1986). Apesar de limitações, essa tecnologia se destaca como uma opção natural e mais acessível, o que contribui positivamente a viabilidade econômica do projeto (Novara *et al.*, 2019).

Alguns estudos demonstraram que é possível recuperar energia em RDA adotando essa tecnologia. Giugni *et al.*, (2014) desenvolveram um método para otimizar a geração de energia e determinar a melhor localização para a instalação de BFTs em sistemas de distribuição de água. A abordagem proposta foi comparada com um algoritmo tradicional, cujo foco é a redução do excesso de pressão para minimizar perdas de água. Os resultados indicaram que, embora essa estratégia também contribua para a redução de perdas, seu principal benefício é a maximização da produção de energia.

Santos (2010) utilizou uma metodologia proposta por Williams (1995) para conduzir um ensaio experimental em um sistema localizado em Portugal-Covilhã para selecionar uma BFT adequada. Santos (2010) concluiu que o método se comportou eficiente no controle da pressão, recuperação de energia e potencial na geração de lucro a longo prazo.

Lima *et al.*, (2018) implementaram uma estratégia para otimizar o uso de BFTs no SAA de Piracicaba. O estudo resultou em uma redução de 16,1% nos vazamentos, representando um aumento de eficiência de 50,1% em comparação com a operação em velocidade constante.

Diante disso, foram gerados 1.320 kwh de energia, 92,2% a mais do que na operação em velocidade constante. No estudo de Souza *et al.*, (2023), foi avaliado as flutuações nas taxas de fluxo no SAA, que estão diretamente relacionadas à demanda de consumo na rede. Os resultados indicaram que, ao instalar BFT em substituição às VRP, o sistema teve um aumento significativo na recuperação de energia.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa, de caráter exploratório, e aplica seu método em um estudo de caso. Para melhor condução do estudo, a metodologia seguiu itens complementares descritos a seguir.

3.1 PREDIÇÃO DE BOMBAS COMO TURBINAS E VALIDAÇÃO DO MODELOS

Para a predição de BFT, será realizada a combinação de modelos presentes da literatura, duas combinações no total. Os dois primeiros priorizam o MPE da bomba (Yang *et al.*, 2012; Stepanoff, 1957) para descrever as curvas características da BFT, associados ao modelo de (Rossi *et al.*, 2019), que prevê o comportamento BFT fora de projeto (*off-design*), ou seja, que considera as variações de vazão e pressão inerentes a operação de uma RDA. A Tabela 2 apresenta as Equações dos modelos associados. Foram combinados os modelos de *Yang+Rossi* e *Stepanoff+Rossi*. Dentre os modelos existentes na literatura e supracitados nesta pesquisa, estes foram os que apresentaram os melhores resultados quando aplicados de forma individual, por isso foram selecionados para esta pesquisa.

Tabela 2. Modelos associados na pesquisa

Autor/modelo		
Yang <i>et al.</i> (2012) (MPE)	Stepanoff (1957) (MPE)	Rossi <i>et al.</i> (2019) (<i>off-design</i>)
$(h) = \left(\frac{1,2}{\eta_B^{1,1}} = \frac{H_{BFT}}{H_B} \right)$ <p style="text-align: center;">(31)</p>	$(h) = \left(\frac{1}{n_p} \right)$ <p style="text-align: center;">(33)</p>	$\left(\frac{\Psi_{BFT}}{\Psi_{MPE,BFT}} \right) = (0,2394R^2 + 0,769R)$ <p style="text-align: center;">(35)</p>
$(q) = \left(\frac{1,2}{\eta_B^{0,55}} = \frac{Q_{BFT}}{Q_B} \right)$ <p style="text-align: center;">(32)</p>	$(q) = \left(\frac{1}{\sqrt{n_p}} \right)$ <p style="text-align: center;">(34)</p>	$\left(\frac{n_{BFT}}{n_{MPE,BFT}} \right) = (-1,9788 R^6 + 9,0636 R^6 - 13,148R^4 + 3,8527 R^3 + 4,5614 R^2 - 1,3769 R)$ <p style="text-align: center;">(36)</p>
		$(R) = \left(\frac{\omega_{BFT}}{\omega_{MPE,BFT}} \right)$ <p style="text-align: center;">(37)</p>
		$(\omega) = \left(\frac{Q}{ND^3} \right)$ <p style="text-align: center;">(38)</p>

		$(\Psi) = \left(\frac{g.H}{(ND)^2} \right) \quad (39)$
--	--	---

Fonte: Elaborado pelos autores

Onde h é o coeficiente de altura, q é o coeficiente de vazão, η_B é a eficiência inicial da bomba, H_{BFT} é a altura da turbina em rotação nominal da bomba, H_B é a altura da bomba em rotação nominal, Q_{BFT} é a vazão da turbina em rotação nominal da bomba em m^3/s , Q_B é a vazão da bomba em rotação nominal m^3/s , ω é o coeficiente de fluxo, Ψ é o coeficiente de altura, η_{BFT} é a eficiência da turbina, N é a rotação da máquina em [rps], D é o diâmetro e g é a aceleração da gravidade em $[m^2/s^2]$.

Para aumentar a confiabilidade desta pesquisa e identificar a melhor combinação, foi necessário validar os modelos associados propostos. A validação dos métodos tem um fator essencial e impacta na qualidade dos dados gerados durante a pesquisa, passando ser uma parte de suma importância para avaliar aspectos como precisão e especificidade (Moretto, 2000). Para isso, os modelos combinados foram validados com dados experimentais disponíveis na literatura (Derakhshan; Nourbakhsh, 2008). Foram consideradas as velocidades $N_s=37,6$, $N_s=55,6$, $N_s=23$ e $N_s=14,6$. As curvas características das bombas relatadas pelos autores serviram de referência para comparação. Além disso, o erro relativo, entre os dados experimentais e os teóricos das combinações foram calculados a partir da Equação 40, onde $\%_e$ é o erro relativo.

$$(\%_e) = \left(\frac{\text{modelo-experimental}}{\text{experimental}} \right) \times (100) \quad (40)$$

3.2 SELEÇÃO DE BOMBA COMO TURBINA

Nas duas combinações, a seleção de uma BFT adequada requer a execução de seis etapas fundamentais. A etapa 1 vai depender das condições hidráulicas da VRP ($H_{VCP} = H_{BFT}$; $Q_{VCP} = Q_{BFT}$). A vazão usada para selecionar a bomba é a média da operação VRP e a pressão é máximo valor. Na etapa 2 é adotado um valor inicial de eficiência da bomba (η_i) (Pugliese *et al.*, 2016), para calcular o h e q corretivos das equações de (Yang *et al.*, 2012) e (Stepanoff, 1957), e identificar os dados da bomba no MPE ($H_{MPE,B}$ e $Q_{MPE,B}$). Nessa etapa, deve-se observar se a eficiência da BFT obteve valor menor ou igual ao da bomba ($\eta = \eta_B \geq \eta_{BFT}$).

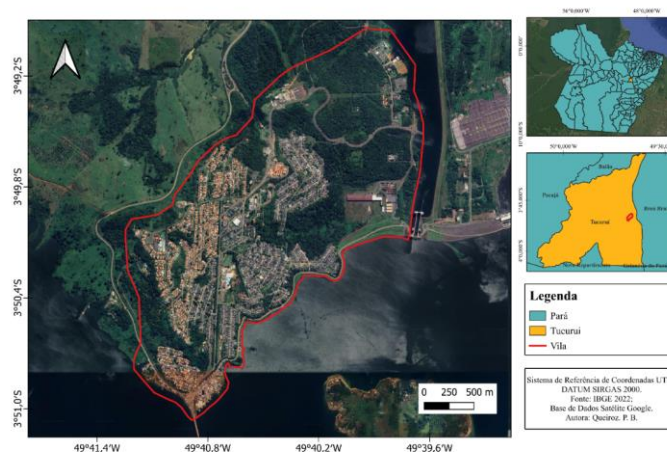
No catálogo do fabricante, seleciona-se a família da bomba e, nas curvas características, os dados de rotação (N), diâmetro (D) e eficiência (η_{i+1}) (etapa 3). Os cálculos com as

equações de (Yang *et al.*, 2012) e (Stepanoff, 1957), assim como todo o processo descrito anteriormente, devem ser realizados novamente, a fim de determinar o ponto de operação da bomba e da BFT no MPE, com base no valor de (η_{i+1}) obtido no catálogo do fabricante (etapa 4). Neste passo, deve confirmar se as condições $H_{MPE,BFT} \geq H_{VCP}$ e $Q_{MPE,BFT} \geq Q_{VCP}$ estão atendidas. Caso contrário, é preciso optar por outra bomba disponível no catálogo do fabricante. Os coeficientes adimensionais de vazão ($\phi_{MPE,BFT}$) e pressão ($\psi_{MPE,BFT}$) da BFT no MPE são determinados pela aplicação das equações de (Rossi *et al.*, 2019) (etapa 5). Por fim, é atribuído um intervalo para (ϕ_{BFT}) com base no valor de $(\eta_{MPE,BFT})$. Com as equações de (Rossi *et al.*, 2019), é determinado os coeficientes de pressão (Ψ_{BFT}) e a eficiência (η_{BFT}) da BFT a partir do intervalo estabelecido para (ϕ_{BFT}) (etapa 6).

3.2 ESTUDO DE CASO

A partir da identificação do melhor modelo, a metodologia foi aplicada em uma RDA dividida em Área de Medição Distrital (AMD), conforme estudado por (Souza *et al.*, 2022). A rede, localizada em Tucuruí, no sudeste do Pará, é composta por seis AMD e 14 VRP estrategicamente posicionadas para controlar a pressão na distribuição. Neste estudo, foram analisados exclusivamente os dados da VRP 3.3, pertencente à AMD 3, que apresenta vazão média (Q_M) de 71,28 m³/h, perda de carga requerida (ΔH) de 39,89 m e pressão de saída de 10 m. A vazão empregada para selecionar a bomba, é a média da operação da BFT, durante o processo de substituição da VRP pela BFT. A Figura 1 apresenta a localização da RDA estudada no município de Tucuruí-PA.

Figura 1. Área de estudo: RDA da vila permanente em Tucuruí-PA

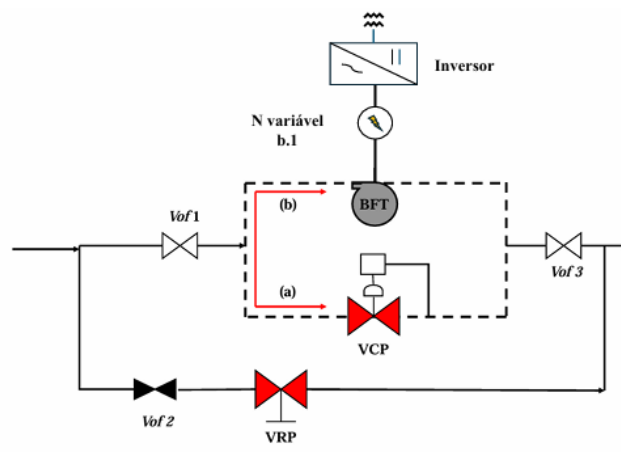


Fonte: Elaborado pelos autores.

A combinação que apresentou o menor erro relativo foi selecionada para o estudo de caso, por evidenciar o melhor desempenho operacional. A simulação hidráulica de uma RDA é essencial para assegurar o controle eficiente dos SAA (Jansen; Pade, 2013). Para a avaliação da pressão, foi utilizado o *software* EPANET 2.2, ferramenta amplamente reconhecida por sua precisão em análises de SAA (Castro, 2004). As simulações tiveram como objetivo verificar se as velocidades estimadas para a BFT seriam capazes de manter a pressão equivalente à VRP.

As curvas características da BFT (QxH) foram inseridas no *software* por meio de uma válvula genérica (VPG), que permite representar trechos com leis específicas de escoamento. Essa abordagem possibilitou a avaliação do desempenho da BFT fora do ponto de projeto (*off-design*). ABNT (2017) recomenda que a pressão mínima no ponto crítico da rede seja de 10 m, enquanto o limite máximo nos demais pontos seja de 50 m. A estimativa de energia gerada considerou o período operacional de 18 horas da BFT (6h00 – 23h59), abrangendo horários de maior demanda, com variação de vazão (Q) e pressão (H). Das 0h00 às 5h59, quando a vazão é menor em função do menor consumo de água da rede, a VRP opera (a) (Souza *et al.*, 2021; 2023). A Figura 2 apresenta o esquema do sistema, no qual o fluxo é desviado para a válvula de controle de pressão (VRP) por meio de um *by-pass* durante o intervalo analisado. Para o cálculo da potência hidráulica, foi empregada a Equação 41, em que P represente a potência (kW) e ρ a massa específica do fluido (kg/m^3). Após a substituição da VRP pela BFT (b), avaliou-se o regime de rotação variável (b.1) para recuperação de energia. Nos estudos de BFT para a recuperação de energia em RDA, é recomendável o controle de velocidade da máquina para manter a melhor eficiência da bomba (Souza *et al.*, 2021; 2023).

Figura 2. Instalação VRP e instalação BFT



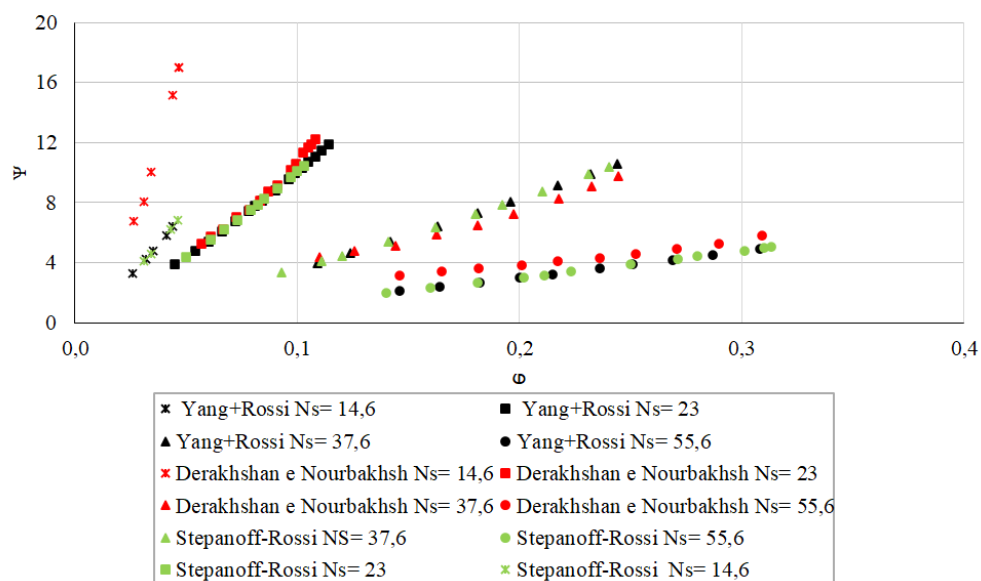
Fonte: Elaborado pelos autores

$$(P) = \left(\frac{Q_{BFT} \chi H_{BFT} \rho g \chi \eta_{BFT}}{1000} \right) \quad (41)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

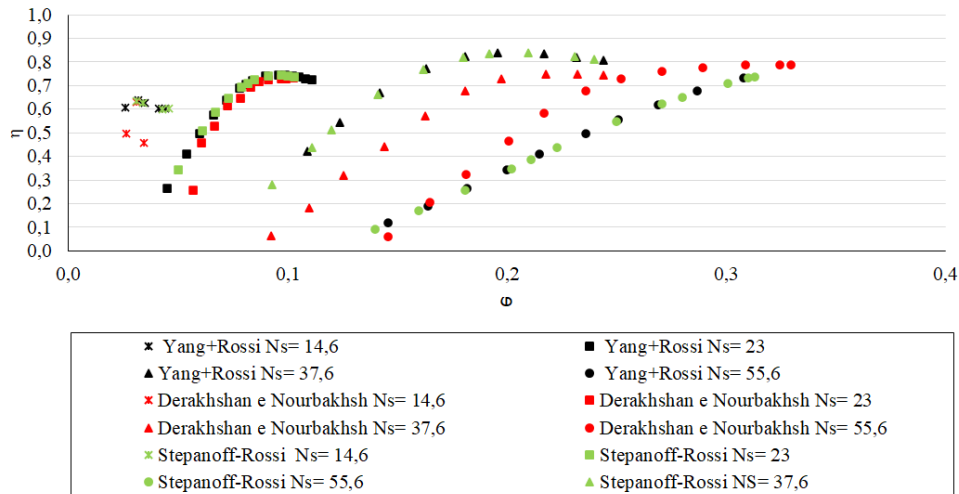
A Figura 3 e a Figura 4 apresenta as curvas características adimensionais ψ - ϕ (a) e η - ϕ (b) que representam as tendências das associações *Yang+Rossi* e *Stapanoff+Rossi*. Cada simbologia do gráfico corresponde a uma velocidade de rotação específica. Nota-se que as curvas mantêm uma concordância aceitável. Esse comportamento evidencia que os métodos analisados conseguem reproduzir adequadamente as tendências experimentais, independentemente do ponto de melhor eficiência (MPE) da bomba operando como turbina BFT.

Figura 3. Curva ψ - ϕ (a)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4. Curva η - ω (b)



Fonte: Elaborado pelos autores.

No entanto, é importante observar que durante a validação das curvas, verificou-se a incompatibilidade para velocidade específica ($N_s = 14,6$) com as curvas de ambas as combinações afastadas dos dados experimentais. Essa discrepância também ocorreu nos estudos de Fecarrota *et al.*, (2016), que investigaram a confiabilidade da previsão de uma BFT em velocidade variável. O estudo resultou em uma discrepância significativa entre os dados do experimento e da literatura nas curvas característica. Portanto, conclui-se que em faixas de velocidades específicas mais baixas, essas correções não apresentem o mesmo grau de precisão, o que pode comprometer a aproximação dos modelos aos resultados esperados. Por outro lado, a velocidade específica ($N_s = 23$) resultou em curvas características compatível tanto para os coeficientes de pressão (Ψ), vazão (ω) e eficiência (η), evidenciando uma correlação significativa entre os dados experimentais e o teórico. Essa compatibilidade sugere que para máquinas operando nessa faixa de velocidade, as equações empíricas utilizadas são adequadas para prever o comportamento hidráulico, reforçando sua funcionalidade na estimativa do desempenho da BFTs.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para cada combinação, permitindo a avaliação comparativa dos desempenhos. A análise dos dados indicou que a combinação *Yang+Rossi* apresentou o melhor comportamento em comparação as curvas experimentais. Assim, essa combinação foi estabelecida como referência para as etapas subsequentes da pesquisa, garantindo maior confiabilidade e precisão nos resultados.

Tabela 3. Resultados do cálculo do erro relativo.

<u><i>Yang+Rossi</i></u>								
Ns=37,6			Ns= 55,6			Ns= 23		
ϕ E%	ψ E%	η E%	ϕ E%	ψ E%	η E%	ϕ E%	ψ E%	η E%
0,109	6,2	-4,9	0,219	1,8	-17,6	0,073	2,9	3,0
0,125	5,7	-4,8	0,247	5,2	6,7	0,084	-2,4	8,6
0,143	-1,8	-1,1	0,273	7,5	-4,8	0,093	-1,0	8,7
0,163	0,2	6,1	0,300	3,1	-8,6	0,102	0,0	4,1
0,181	-2,8	9,8	0,323	-0,2	-11,1	0,111	4,3	-1,1
0,197	0,5	11,3	0,354	-7,7	-5,6	0,119	-2,6	-0,6
0,217	1,8	8,6	0,377	-6,7	-5,6	0,124	-1,8	0,4
Min	-3	-5	Min	1,8	-18	Min	-2,6	-1,1
Méd	1	4	Méd	0,4	-7	Méd	-0,1	3,3
Máx	6	11	Máx	7,5	7	Máx	2,9	8,6
<u><i>Stepanoff+Rossi</i></u>								
Ns=37,6			Ns= 55,6			Ns= 23		
ϕ E%	ψ E%	η E%	ϕ E%	ψ E%	η E%	ϕ E%	ψ E%	η E%
0,093	-19,0	-12,2	0,163	-0,1	-17,4	0,061	5,0	11,3
0,110	-6,6	-1,0	0,181	-1,2	7,8	0,067	7,6	10,7
0,123	-6,8	-10,3	0,201	1,7	-16,7	0,073	10,1	5,4
0,143	4,8	-2,0	0,214	4,3	-6,5	0,079	6,9	7,2
0,162	-2,5	5,5	0,230	-2,8	-8,6	0,082	5,2	2,2
0,181	-0,5	9,5	0,251	-2,1	-10,9	0,086	1,5	1,1
0,195	6,0	9,6	0,271	-5,7	-7,0	0,091	2,6	2,0
Min	-19,0	-12	Min	-5,7	-17	Min	1,5	1,1
Méd	-2,5	-1	Méd	-1,2	-9	Méd	5,2	5,4
Máx	6,0	10	Máx	4,3	8	Máx	10,1	11,3

Fonte: Elaborado pelos autores

4.2 ETAPAS DA SELEÇÃO DA BFT

No modelo Yang *et al.*, (2012) a bomba apresentou um desempenho de $Q_b = 48,82 \text{ m}^3/\text{h}$ e $H_b = 22,45 \text{ m}$, com o valor de eficiência inicial de $\eta_i = 70\%$ (Pugliese *et al.*, 2016). No catálogo do fabricante foram encontrados os dados da bomba, sendo rotação = 3500, diâmetro ($D = 0,123 \text{ m}$) e a eficiência real ($\eta = 0,653$). Posteriormente, identificou-se o melhor ponto de eficiência MPE, a partir da eficiência real (η_i) da bomba selecionado: $H_t = 41,86 \text{ m}$ e $Q_t = 73,02 \text{ m}^3/\text{h}$. Em seguida, calculou-se os coeficientes adimensionais de vazão ($\omega_{BFT} = 0,187$) e pressão ($\Psi_{BFT} = 8,051$) no MPE da BFT. Por fim, foram calculados os coeficientes adimensionais de pressão Ψ_{BFT} e eficiência η_{BFT} da BFT, a partir do intervalo atribuído ao ω_{BFT} , desta vez em Rossi *et al.*, (2019).

A Tabela 4 apresenta os parâmetros operacionais nos modos bomba e turbina, especificamente no ponto de melhor eficiência (MPE). Os dados indicam que, conforme relatado por Rossi e Renzi, (2018), o modo turbina exibe valores de vazão e altura manométrica superiores em relação ao modo bomba. Essa diferença é crucial para compreensão do desempenho da máquina em diferentes condições operacionais.

Tabela 4. Características hidráulicas no modo bomba e turbina

Características	Bomba	Turbina
Q [m ³ /h]	48,82	73,02
H [m]	22,45	41,86
Eficiência	0,70	0,653
Velocidade de rotação [rpm]	3500	
Diâmetro do impulsor	0,123 m	

Fonte: Elaborado pelos autores

Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos para a BFT 3.3 em condições fora do ponto de projeto, destacando os valores referentes ao ponto de melhor eficiência (MPE). Essa verificação é significativa para a análise do funcionamento da BFT, que é fortemente afetado pelas taxas de fluxo em uma RDA. O modelo proposto mostrou ser capaz de prever com precisão o desempenho da BFT, tanto nas condições de projeto quanto em *off-design*.

Tabela 5. Valores obtidos na combinação para a BFT 3.3 operando em off-design

ϕ_t	ψ_t	Qt (l/s)	H (m)	nt
0,178	7,180	17,94	35,87	0,619
0,181	7,328	18,24	36,60	0,624
0,184	7,477	18,55	37,35	0,629
0,187	7,627	18,85	38,10	0,633
0,190	7,777	19,15	38,85	0,637
0,193	7,929	19,45	39,60	0,640

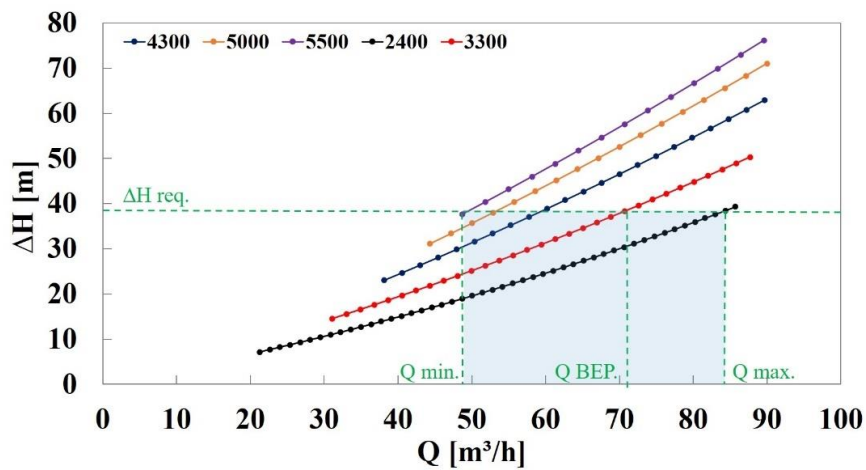
Fonte: Elaborado pelos autores

4.3 BFT EM VELOCIDADE VARIÁVEL

A Figura 6 ilustra a curva H-Q enquanto a Figura 7 apresenta a curva η -Q da BFT operando fora do ponto de projeto em condição de velocidade variável. É possível observar que o controle da velocidade durante as 18 horas de operação da BFT, resulta em valores aproximados do ΔH requerido pela VRP. Além disso, as melhores eficiências da BFT são alcançadas em uma faixa mais ampla de vazões, não se limitando apenas ao ponto de eficiência

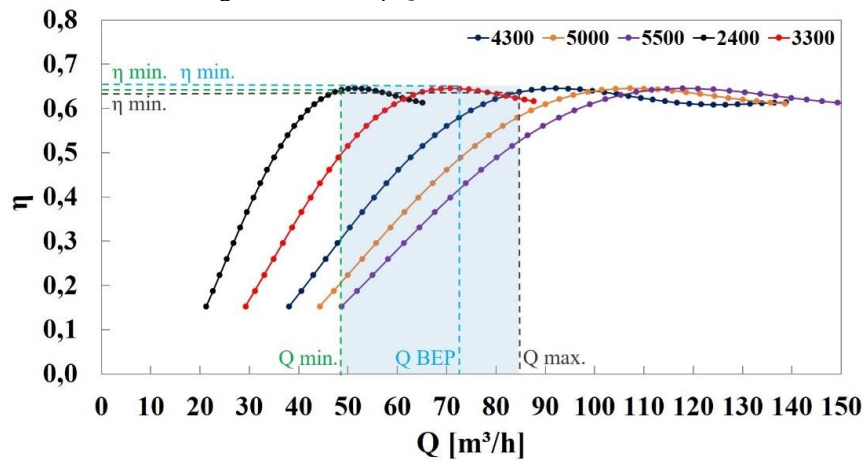
máxima (MPE). A Figura 8 demonstra o comportamento das pressões nodais no AMD 3 em velocidade variável, as 11h e 23h. Como era de se esperar, entre 23h01 e 5h59, o *by-pass* é ativado e a VRP ajusta a pressão de acordo com a legislação. Quando a BFT opera em velocidade variável, o controle da velocidade consegue aumentar sua eficiência e o rendimento da potência (Delgado *et al.*, 2019).

Figura 5. Curva H-Q em velocidade variável



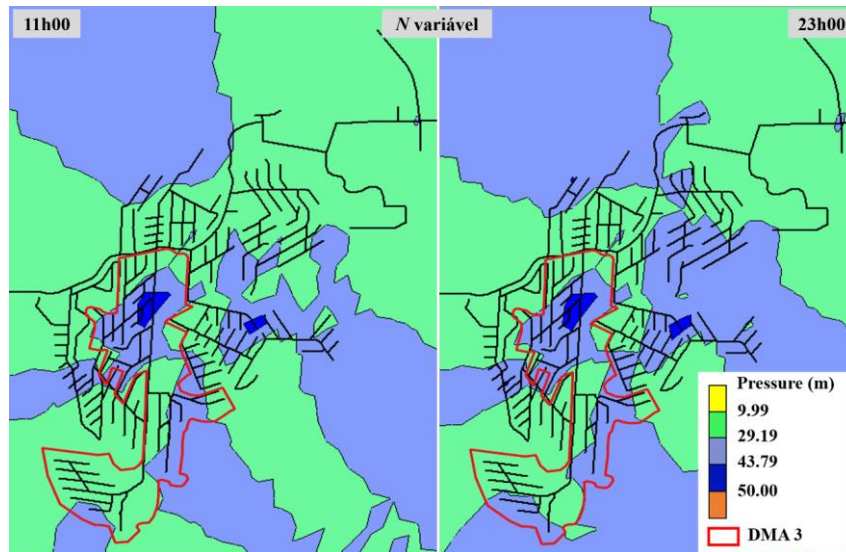
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 6. Curva η -Q em velocidade variável



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 7. Pressões nodais registradas às 7h, 11h e 23h durante a operação da BFT



Fonte: Elaborado pelos autores

4.4 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

A análise do desempenho da BFT 3.3 em velocidade variável, demonstrou resultados significativos na recuperação da energia. Os dados observados revelam que a máquina atingiu uma potência média de saída de 3,44 kW durante o período de operação. As potências e eficiências registradas estão de acordo com o consumo de maior pico na rede, especificamente entre (10h-15h e as 18h), quando a máquina opera em rotações mais baixas (2400 rpm às 11h e 3000 rpm às 18h). Este comportamento está em concordância com os estudos de Jain *et al.*, (2015) e Lima *et al.*, (2018), que relatam a diminuição da eficiência máxima em velocidades mais elevadas. A operação em *off-design* resultou em um ganho energético anual de 22.620 kWh.

5 CONCLUSÃO

Este estudo propôs uma metodologia para combinar três modelos de predição existentes. Foram avaliadas duas combinações, Yang+Rossi e Stapanoff+Rossi, para estimar o desempenho hidráulico da BFT, tanto em condições de ponto de melhor eficiência (MPE) quanto em regime *off-design*. As curvas dos modelos foram semelhantes aos valores experimentais com as velocidades de rotação $Ns=37,6$, $Ns= 55,6$ e $Ns= 23$. Entretanto, a velocidade de $Ns= 14,6$ 20 apresentou uma discrepância significativa com os dados teóricos. Os resultados indicaram que a combinação Yang+Rossi apresentou melhor desempenho em

velocidade variável e menor erro na estimativa das curvas características. A operação da BFT em velocidade variável mostrou alto desempenho durante os períodos de maior vazão (10h-15 e 18h), mantendo boa eficiência mesmo fora do ponto de projeto. A BFT 3.3 apresentou potência média de 3,44 kw, com recuperação de energia anual de 22.620 kwh.

Embora os resultados indiquem o potencial da metodologia para estimar o desempenho hidráulico de BFTs, limitações técnicas e operacionais não abordadas podem ter afetado a precisão dos modelos, especialmente em certas faixas de operação. Diante dos avanços obtidos, estudos futuros devem aprofundar a modelagem com simulações em CFD. Isso permitirá análises mais precisas do escoamento e o aprimoramento da metodologia proposta. Espera-se, assim, uma solução mais confiável e alinhada às necessidades do setor de abastecimento e aos ODS.

REFERÊNCIAS

AGOSTINELLI, A.; SHAFER, L. **Centrifugal pumps as hydraulic turbines**. Power Fluids, v. 7, n. 3, p. 5-7, 2013.

ALATORRE-FRENK, C. **Cost minimisation in micro-hydro systems using pumps-as turbines**. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 12218*: projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

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, v. 79, p. 148-179, 2017.

CARRAVETTA, A. *et al.* **Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy**. Water resources management, v. 26, n. 13, p. 3947–3959, 2012.

CARVALHO, D.; LEMOS, G. **Turbinas hidráulicas**. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia: [s.n] 111 p.1970.

CASTRO, M. A. H. **Uso conjunto do AutoCAD e do EPANET para projeto, simulação**. [S.l.]: [s.n.] 2004.

CHAPALLAZ, J.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. **Manual on pumps used as turbines**. 1992.

CHILDS, S. M. **Convert pumps to turbines and recover HP**. Hydrocarbon Processing and Petroleum Refiner, v. 41, n. 10, p. 173-174, 1962.

CREACO, Enrico et al. **A bi-objective approach for optimizing the installation of PATs in systems of transmission mains.** *Water*, v. 12, n. 2, p. 330, 2020.

DELGADO, J. *et al.* **Hill chart modelling using the Hermite polynomial chaos expansion for the performance prediction of pumps running as turbines.** *Energy Conversion and Management*, v. 187, n. October 2018, p. 578–592, 2019a.

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, pp. 800–807, 2008.

FECAROTTA, O. *et al.* **An improved affinity model to enhance variable operating strategy for pumps used as turbines.** *Journal of Hydraulic Research*, v. 54, n. 3, p. 332–341, 2016.

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.

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.

JAIN, S. *et al.* **Effects of impeller diameter and rotational speed on performance of pump running in turbine mode.** *Energy Conversion and Management*, v. 89, p. 808–824, 2015.

JANSEN, L.; PADE, J. **Global unique solvability for a quasi-stationary water network model.** *Preprint*, 11, 2013.

LIMA, G. *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.

LIMA, G. *et al.* **Leakage control and energy recovery using variable speed pumps as turbines.** *J. Water Resour. Plann. Manage.*, v. 144, n. 1, 2018.

MALEKI, A. *et al.* **Numerical study on the effect of viscosity on a multistage pump running in reverse mode.** *Renewable Energy*, v. 150, p. 234–254, 2020.

MARCHIORI, I. N. *et al.* **Effectiveness of methods for selecting pumps as turbines to operate in water distribution networks.** *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 19, n. 2, p. 417–423, 2019.

MDEE, Ombeni J. *et al.* **Methodological approach of performance evaluation for using pump as micro hydro-turbine.** In: *Proceedings of the ISES Solar World Conference 2017 and the IEA SHC Solar Heating and Cooling Conference for Buildings and Industry*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, p. 46–57, 2017.

MORANI, Maria Cristina *et al.* **A comparison of energy recovery by PATs against direct variable speed pumping in water distribution networks.** *Fluids*, v. 3, n. 2, p. 41, 2018.

MORETTO, L. D. **A era da validação.** *Pharmaceutical Technology*, v. 4, n. 4, pp. 44–48, 2000.

MOURA, G. **The water-energy relationship: energy management on water supply systems of Brazil's sanitation companies;** A relação entre água e energia: gestão energética nos sistemas de abastecimento de água das companhias de saneamento básico do Brasil. 2010.

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. May, p. 1–7, 2018.

PÉREZ-SÁNCHEZ, M. *et al.* **Energy recovery in existing water networks: Towards greater sustainability.** *Water (Switzerland)*, v. 9, n. 2, p. 1–20, 2017.

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

PUGLIESE, F. *et al.* **Experimental characterization of two pumps as turbines for hydropower generation.** *Renewable energy*, v. 99, p. 180–187, 2016.

RAMOS, H. M.; BORGA, A.; SIMÃO, M. **New design solutions for low-power energy production in water pipe systems.** *Water Science and Engineering*, v. 2, n. 4, p. 69–84, 2009.

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, p. 555–566, 2019b.

ROSSI, M.; RENZI, M. **Analytical prediction models for evaluating pumps-as turbines (PaTs) performance.** *Energy Procedia*, v. 118, p. 238–242, 2017.

ROSSI, M.; RIGHETTI, M.; RENZI, M. **Pump-as-Turbine for energy recovery applications: the case study of an aqueduct.** *Energy Procedia*, v. 101, p. 1207–1214, 2016.

SANTOS, F. **Avaliação do potencial energético associado a uma válvula redutora de pressão - caso de estudo.** 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.

SHARMA, K. **Small hydroelectric project-use of centrifugal pumps as turbines.** Kirloskar Electric Co., Bangalore, India, 1985.

SINGH, P. **Optimization of internal hydraulics and of system design for pumps as turbines with field implementation and evaluation.** 2005. Tese de Doutorado. Karlsruhe, Univ., Diss., 2005.

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

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.

SOUZA, D. *et al.* **Recuperação de energia em redes de distribuição de água com a utilização de bomba funcionando como turbina em velocidade variável.** [S.l.]: [s.n.], 2022.

SOUZA, D. *et al.* **Recuperação de energia em redes de distribuição de água com a utilização de bomba funcionando como turbina em velocidade variável.** 2022.

STEPANOFF, A. **Centrifugal and axial flow pumps: Theory, design, and application.** [S.l.]: [s.n.], 1957.

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

TORLEY, A.; CHAUDHRY, M. **Pump characteristics for transient flow analysis.** In: *Pressure Surge and Fluid Transients* (ed. B. Group), p. 461–476, 1986.

VIANA, A. **Comportamento de bombas centrífugas funcionando como turbinas hidráulicas.** 1987. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá, 1987.

VILANOVA, M. **Estudo de grupos moto-bomba operando como grupos geradores em microcentrais hidrelétricas.** 2007.

Williams, A. **Pumps as turbines – a user guide.** Intermediate Technology Publications. Londres, 1995.

YANG, S. S.; DERAKHSHAN, S.; KONG, F. Y. **Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance.** *Renewable Energy*, v. 48, p. 507–513, 2012.

**ANEXO A – REVISTA PARA SUBMISSÃO: INTERNATIONAL CONTEMPORARY
MANAGEMENT REVIEW- QUALIS: INTERDISCIPLINARY B4**

<https://icmreview.com/icmr/article/view/373>

**AVALIAÇÃO DE COMBINAÇÕES DE MODELOS PREDITIVOS DE
BOMBAS FUNCIONADO COMO TURBINAS EM CONDIÇÕES OFF-
DESIGN EM REDES MUNICIPAIS DE ÁGUA**

Pamelly Santa Brigida Queiroz

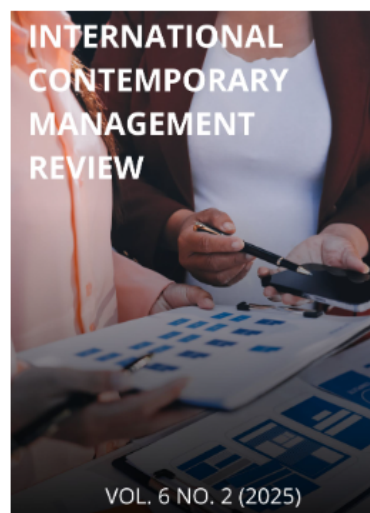
Vitória Barbosa Portilho

Davi Edson Sales e Souza

DOI: <https://doi.org/10.54033/icmrv6n2-040>

Keywords: Modelos de Predição, Bomba como Turbina, Redes de
Distribuição de Água, Recuperação de Energia

Abstract



CLASSIFICAÇÕES DE PERIÓDICOS QUADRIÊNIO 2017-2020 ▾

Área de Avaliação:

-- SELECIONE -- ▾ +

ISSN:

Título:

INTERNATIONAL CONTEMPORARY MANAGEMENT REVIEW

Classificação:

-- SELECIONE -- ▾

Periódicos

ISSN	Título	Área com publicação no quadriênio	Classificação	Área mãe
2595-0428	INTERNATIONAL CONTEMPORARY MANAGEMENT REVIEW - ICMR	INTERDISCIPLINAR	B4	INTERDISCIPLINAR

◀ Início ◀ Anterior 1 ▾ Próxima ▶ ▶ Fim ▶