



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SABRINA DA SILVA CORRÊA

CONTROLE DE PRESSÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE
BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Caruaru

2018

SABRINA DA SILVA CORRÊA

**CONTROLE DE PRESSÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE
BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste – CAA, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: **Recursos Hídricos.**

Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra

Caruaru

2018

SABRINA DA SILVA CORRÊA

**CONTROLE DE PRESSÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE
BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste – CAA, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: **Recursos Hídricos.**

A banca examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o candidato

APROVADA com nota _____

Caruaru, 19 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Msc. José Eloim Silva de Macêdo: _____

Centro Universitário Maurício de Nassau – UNINASSAU (Avaliador)

Prof. Dr. José Almir Cirilo: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina de TCC)

A Deus, pelo amor da tua benignidade e da tua verdade.

À minha mãe, que não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me concedeu forças, saúde e me abençoou para a realização desse trabalho com fé e dedicação.

Agradeço à minha amada mãe, que foi a grande responsável por todas as minhas conquistas, que se dedicou totalmente para que eu pudesse me tornar Engenheira Civil, por todos os momentos difíceis, recursos e tempo gastos na concretização do meu sonho.

Agradeço ao meu noivo, Gilberto Filho, por ter me encorajado diante de todas as dificuldades, pela sua paciência e compreensão nas fases de ausência, e principalmente por ter me dado auxílio em todos os momentos que eu precisava, tornando-se indispensáveis.

Aos meus avós, tios e primos pelo apoio e incentivo, que através de palavras de conforto me deram suporte para que eu alcançasse os meus objetivos.

Meu agradecimento ao Prof. Dr. Saulo de Tarso, por ter me orientado nesse trabalho, colaborando com suas correções, opiniões e avaliações importantes.

Aos meus amigos por terem me ajudado com momentos de descontrações, que sem dúvida foram essenciais para o equilíbrio dessa jornada, em especial Lucas Caitano e Thaise Suanne, por terem me aconselhado em momentos difíceis e por serem essenciais em toda a minha graduação, amo vocês.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram neste trabalho.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: A vontade.” Albert Einstein.

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 (BFT) em substituição às válvulas redutoras de pressão (VRP), tendo em vista que esta concilia o controle de pressão 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 na aquisição e obtenção de peças para a reposição, pois são equipamentos robustos e produzidos em grande escala pela indústria. Assim, esta pesquisa objetivou o desenvolvimento de um modelo para determinar a configuração ótima de BFT em sistemas de distribuição de água, com o propósito de minimizar os vazamentos e maximizar a geração de energia, simultaneamente. A metodologia proposta define, com o auxílio do EPANET e de um processo de otimização, a altura manométrica e a vazão da BFT com melhor eficiência.

O modelo foi aplicado a uma rede fictícia proposta na literatura e os resultados da pesquisa apontaram que a BFT possui eficiência semelhante à VRP no controle de pressão. Sendo assim, a operação da bomba em reverso como turbina é uma opção real e plausível, mostrando-se atrativa em função do seu baixo custo, se comparada com as turbinas, além de possibilitar a geração de energia elétrica e a redução do volume de água perdido em vazamentos.

Palavras-chave: Sistemas de distribuição de água, BFT, Microgeração de energia, Perdas de Água, Otimização.

ABSTRACT

Energy recovery and pressure management are essential to achieve sustainable improvements in the performance of water distribution systems. An alternative that has been studied all over the world is the use of Pump as Turbine (PAT) in place of Pressure Reducing Valves (PRV), since it reconciles the pressure control together with the generation of energy. At first, the turbines are the most appropriate equipment, but the PAT have been shown to be of low cost, easy to obtain spare parts, easy and quick to acquire (they are produced in large scale by the industry), and are robust equipment. Therefore, this research aims at the development of a model to determine the optimal configuration of PATs in water distribution systems, with the purpose of minimizing leakage and maximizing energy efficiency. The methodology is based on the optimization process, which defines the head and the flow at its point of operation of best efficiency. The hydraulic simulations were performed in EPANET 2.0 software, where a generic valve was adopted to simulate the loss of load caused by PAT. The method was applied to a fictitious network proposed in the literature and the results of the research pointed out that the PAT has similar efficiency to the valves in the pressure control. Then, the operation of the reverse pump as a turbine is a real and plausible option, proving attractive due to its low cost, compared to the turbines, besides allowing the generation of electric energy and the reduction of the volume of water lost in leaks .

Keywords: Water distribution systems, PAT, Micro energy generation, Water losses, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação da variação da vazão perdida em função da pressão	24
Figura 2 – Diferentes tipos de VRP; da esquerda para a direita, VRP controladora por mola, VRP controlada por pistão, VRP controlada por diafragma.	25
Figura 3 – Representação de operação de uma VRP com pressão de saída fixa.....	26
Figura 4 – Representação de operação de uma VRP com pressão de saída proporcional	26
Figura 5 – Representação de operação de uma VRP com pressão de saída modulada por tempo com duas atribuições (4 horas e 22 horas), ciclo diário.	27
Figura 6 – Representação de operação de uma VRP com pressão de saída modulada pela vazão com três atribuições (vazão menor que 50% da máxima, vazão entre 50% e 80% da máxima, vazão acima de 80% da máxima), ciclo diário.	27
Figura 7 – Representação esquemática de uma turbina.....	28
Figura 8 – Representação esquemática de uma bomba	28
Figura 9 – Campo operacional das turbinas.	30
Figura 10 – Aspectos construtivos de uma bomba centrífuga.....	31
Figura 11 – Forma dos rotores. A – Radial: operam vazões pequenas e grandes alturas manométricas, B – Misto ou diagonal: operam vazões e alturas manométricas médias, C – Hélice ou axial: operam grandes vazões e pequenas alturas manométricas.....	31
Figura 12 – Rotor fechado, semiaberto e aberto, A, B e C respectivamente.....	32
Figura 13 – Bomba funcionando como bomba BFB.....	33
Figura 14 – Bomba funcionando como turbina BFT.....	33
Figura 15 – Curvas de recepção da BFB e da BFT.	34
Figura 16 – Coeficientes de altura e vazão.....	35
Figura 17 – Fluxograma do Procedimento de Seleção da BFT.....	44
Figura 18 – Esquema da rede de distribuição de água.	50
Figura 19 – Coeficiente de demanda dos nós da Rede Exemplo.....	51
Figura 20 – Mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia de Gomes (2011) às 00h.....	52
Figura 21 – Mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia de Gomes (2011) às 00h com a atuação da VRP.	53
Figura 22 – Curva característica da BFT – Perda de carga em função da vazão turbinada.	53
Figura 23 – Mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia de Gomes (2011) às 00h com a atuação da BFT (selecionada pelo método de Viana).	55

Figura 24 – Curva Característica da BFT otimizada – Perda de carga em função da vazão turbinada.	55
Figura 25 – Mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia de Gomes (2011) às 00h com a atuação da BFT (selecionada pelo método de Otimização).	56
Figura 26 – Comportamento da pressão média da Rede Exemplo.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de operação de melhor eficiência da bomba KSB – Rotação 1750 rpm.....	47
Tabela 2 – Pontos de operação de melhor eficiência da bomba KSB – Rotação 3500 rpm.....	48
Tabela 3 – Dados da rede de distribuição de água.	50
Tabela 4 – Pressões em cada intervalo de tempo da Rede Fictícia.	51
Tabela 5 – Pressões dos nós da rede fictícia após a introdução da VRP.....	52
Tabela 6 – Pressões dos nós da rede de distribuição de água com BFT.....	54
Tabela 7 - Pressões dos nós da rede de distribuição de água com BFT considerando seu desligamento.	54
Tabela 8 – Pressões dos nós da rede fictícia com otimização da BFT.	56
Tabela 9 – Resumo dos resultados obtidos para cada método utilizado.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
BEN	Balanco Energético Nacional
BFB	Bomba Funcionando como Bomba
BFT	Bomba Funcionando como Turbina
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
ETA	Estação de tratamento de água
FO	Função Objetivo
IWA	<i>International Water Association</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
SAA	Sistema de abastecimento de água
SIN	Sistema Interligado Nacional
VRP	Válvula(s) redutora(s) de pressão
VOS	<i>Variable Operating Strategy</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_v	vazão de vazamento
P	pressão do sistema de abastecimento de água
n_{qa}	velocidade específica
n_t	velocidade de rotação
P_u	potência unitária
H_b	altura manométrica da bomba que será utilizada como turbina
H_t	altura manométrica disponível no aproveitamento da BFT
Q_b	vazão da bomba que será utilizada como turbina
Q_t	vazão disponível no aproveitamento da BFT
c_H	coeficiente de altura manométrica
c_Q	coeficiente de vazão
H_{ob}	altura manométrica referente à velocidade nominal da bomba
Q_{ob}	vazão referente à velocidade nominal da bomba
n_{ob}	velocidade de rotação nominal da bomba
n_b	velocidade de rotação da bomba
FO	função objetivo
t_e	tarifa de energia
t_a	tarifa de água
γ	peso específico da água
Q_i	vazão da BFT no instante i
H_i	variação de carga inserida pela BFT no instante i
η	rendimento do conjunto motor-bomba
P_m	pressão média do sistema
P_i	pressão do nó i
L	comprimento do trecho
$P_{mín}$	pressão mínima
H_{tb}	altura manométrica da BFT no ponto de melhor eficiência
Q_{tb}	vazão da BFT no ponto de melhor eficiência

H_{pme} altura manométrica da bomba no ponto de melhor eficiência

Q_{pme} vazão da bomba no ponto de melhor eficiência

$\eta_{m\acute{a}x}$ rendimento máximo do conjunto motor-bomba

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	NEXO ÁGUA-ENERGIA	20
3.2	CONTROLE DE PRESSÃO	22
3.3	MÁQUINAS HIDRÁULICAS	28
3.3.1	TURBINAS	29
3.3.2	BOMBAS HIDRÁULICAS	30
3.4	BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS	32
3.4.1	SELEÇÃO DE BFT – MÉTODO DE VIANA	34
3.4.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS BFT	36
4	REVISÃO DE LITERATURA	38
5	METODOLOGIA	43
5.1	SELEÇÃO DA BFT EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	43
5.1.1	FUNÇÃO OBJETIVO	45
5.1.2	CURVA CARACTERÍSTICA DA BFT	46
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
6.1	ESTUDO DE CASO	50
6.2	REDE FICTÍCIA COM VRP	52
6.3	REDE FICTÍCIA COM BFT SELECIONADA COM O MÉTODO DE VIANA	53
6.4	REDE FICTÍCIA OTIMIZADA	55
7	CONCLUSÕES	58
7.1	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES	58

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS.	60
APÊNDICE A – CÓDIGO IMPLEMENTADO NO MATLAB PARA A OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DE BFT EM SAA.	65
A.1) CÓDIGO PRINCIPAL	65
A.2) FUNÇÃO AUXILIAR	69
ANEXO A – CATÁLOGOS DE BOMBAS KSB	70

1 INTRODUÇÃO

Recurso natural escasso, fonte essencial tanto na formação de vidas quanto na sua sobrevivência, a água tem sido nas últimas décadas um alvo de preocupação global. Segundo a ONU, metade da população mundial, sofrerá escassez de água em 2025, particularmente nos países em desenvolvimento. Nesse sentido, cada vez mais se tem buscado por soluções sustentáveis de maneira a contornar a atual situação hídrica. No setor de saneamento, a questão de perdas de água por vazamento no processo de distribuição de água, onde se tem os mais altos índices (HUNAIDI *et al.*, 2000), tem sido foco de inúmeras pesquisas.

Uma das alternativas mais eficazes para a diminuição de perdas reais de água é o controle de pressão em sistemas de distribuição de água (COVELLI *et al.*, 2016). A influência da pressão nas perdas não é uma novidade para os pesquisadores e técnicos das companhias de saneamento. Foi publicado no início dos anos 90 no Reino Unido diversos relatórios como resultado da *National Leakage Initiative*, destacando-se o *Report G – Managing Water Pressure*, que se tornou uma referência tradicional da relação entre pressão e volume de vazamento.

O uso de válvulas redutoras de pressão (VRP) nos sistemas de abastecimento de água é uma das principais ações voltadas para o controle de pressão. Trata-se de estruturas dissipadoras que são utilizadas nos sistemas hidráulicos como forma de uniformização e controle das pressões, dando origem a uma perda de carga localizada, mediante a dissipação de energia hidráulica, energia esta que é desperdiçada, devido ao abaixamento dos valores de pressão a jusante.

Além da preocupação com as perdas de água, as empresas do setor de abastecimento de água também se preocupam com o consumo excessivo de eletricidade, seu principal insumo energético (DUTRA, 2005). Estima-se que as companhias de água consomem 2 a 10% de todo o consumo de energia elétrica de um país (PELLI; HITZ, 2002). No Brasil, o setor de água e esgoto consome cerca de 2,5% do consumo total de eletricidade, o equivalente a mais de 13 bilhões de kWh/ano, dos quais cerca de 90% dessa energia é destinada aos conjuntos motor-bomba (BEZERRA *et al.*, 2015).

Diversas pesquisas no mundo estão sendo desenvolvidas considerando o nexo água-energia, seja a partir de uma perspectiva de segurança da água ou de segurança energética (VENKATESH; BRATTEBO, 2011). Energia e água são insumos que estão intrinsecamente conectados. A energia é imprescindível para tratar e transportar água para os diversos usuários (residências, agricultores, empresas, indústrias, etc.), enquanto a água é indispensável como

matéria-prima para a construção, operação e manutenção das usinas termoelétricas, além de ser fonte de energia primária das usinas hidrelétricas. Diante disso, as pesquisas que envolvem soluções para o controle de pressão em redes hidráulicas que adotem turbinas e/ou bombas funcionando como turbinas (BFT) em substituição às válvulas redutoras de pressão têm se destacado recentemente. Esta alternativa concilia o controle de pressão, que aumenta a eficiência hidráulica do sistema, com a geração de energia elétrica.

As BFT vêm se destacando em relação às turbinas por apresentarem baixo custo, mão de obra não especializada, facilidade de obtenção de peças para reposição, instalação simples e por serem equipamentos robustos. A oportunidade de acoplar uma estratégia de gestão de pressão com a geração de energia em redes de distribuição de água tem atraído um interesse crescente. Simulações numéricas desenvolvidas para casos reais mostraram períodos de retorno de capital atraentes. Embora existam alguns dispositivos já implantados, as instalações são bastantes incomuns devido à alta variabilidade dos padrões de vazão e pressão (FONTANTA *et al.*, 2016). Este novo conceito de aproveitamento energético, conhecido por *pumped-storage*, permitiu que bombas de modelo *standard* fossem objetos de novas investigações; o que resulta em um esforço conjunto por parte de pesquisadores, técnicos e fabricantes desse tipo de máquinas hidráulicas.

1.1 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em sete capítulos, um apêndice e um anexo. No primeiro capítulo (INTRODUÇÃO), são expostas algumas considerações iniciais e justificativas da pesquisa. No segundo capítulo (OBJETIVOS) apresentam-se os objetivos do estudo aqui desenvolvido. No terceiro capítulo (REFERENCIAL TEÓRICO), apresentam-se os principais conceitos sobre o tema abordado. No capítulo quatro (REVISÃO DE LITERATURA) estão apresentados os trabalhos realizados com BFT atuando em sistemas de distribuição de água. O capítulo cinco (METODOLOGIA) descreve as ferramentas e os procedimentos utilizados para desenvolvimento do trabalho. No capítulo seis (RESULTADOS E DISCUSSÃO) são apresentadas as análises e discussões dos resultados numéricos obtidos no desenvolver do trabalho. Por fim, no capítulo sete (CONCLUSÕES), são mostradas e comentadas as principais conclusões do trabalho, alguns assuntos correlacionados com o tema e sugestões para trabalhos futuros. A posteriori dos cinco capítulos, apresentam-se as REFERÊNCIAS citadas no texto, no APÊNDICE A o código em MATLAB utilizado no trabalho, e no ANEXO A estão apresentadas as curvas das bombas utilizadas nesse trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo de seleção otimizada de bombas funcionando como turbinas (BFT), para operarem em substituição às válvulas redutoras de pressão (VRP) em sistemas de distribuição de água, que vise à minimização das perdas de água e à maximização da geração de energia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar um algoritmo de otimização capaz de selecionar bombas para operarem como turbinas;
- Avaliar o impacto da aplicação de BFT em relação à redução de perdas e geração de energia;
- Avaliar o retorno financeiro da aplicação de BFT.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos alguns conceitos importantes para a compreensão deste trabalho.

3.1 NEXO ÁGUA-ENERGIA

O crescimento populacional, a urbanização, o desenvolvimento industrial e a agricultura estão aumentando o consumo de água e energia, logo, torna-se evidente que as próximas décadas serão marcadas por uma demanda mais intensa por esses recursos. A análise destes problemas possibilita uma visão crítica, em busca de soluções que preservem os benefícios gerados por esses recursos, sem comprometer a qualidade dos serviços e a preservação dos recursos naturais.

A água e a energia são reconhecidas como insumos indispensáveis para as economias modernas. A comunidade global enfrenta um desafio difícil em atender as demandas de água e energia imposta pela sociedade, que são ainda mais agravados pelas mudanças climáticas (RASUL; SHARMA, 2016). A interdependência entre água e energia é amplamente conhecida. Diversas pesquisas no mundo estão sendo desenvolvidas considerando o nexo água-energia, seja a partir de uma perspectiva de segurança da água ou de segurança energética (VENKATESH; BRATTEBO, 2011). Energia e água são insumos que estão intrinsecamente conectados. A energia é imprescindível para tratar e transportar água para os diversos usuários (residências, agricultores, empresas, indústrias, etc.), enquanto a água é indispensável como matéria-prima para a construção, operação e manutenção das usinas termoelétricas, além de ser fonte de energia primária das usinas hidrelétricas.

Nos Estados Unidos, por exemplo, o setor de energia é o maior consumidor de água da economia (CARTER, 2010). Diferente da Austrália, onde a energia utilizada pelas empresas de abastecimento de água é de apenas 0,2% do consumo total de energia (HUSSEY; PITTOCK, 2012), no Brasil estima-se que as companhias de água e esgoto consomem 2,5% de todo o consumo de energia elétrica do país, o equivalente a mais de 13 bilhões de kWh/ano, dos quais cerca de 90% dessa energia é consumida pelos conjuntos motor-bomba (BEZERRA *et al.*, 2015).

Água e energia são usadas e perdidas através da aquisição, processamento, transporte e uso final. Essas quantidades perdidas desses insumos raramente são consideradas quando

contabilizamos consumo de recurso porque são praticamente invisíveis. Compreender o nexo da água e da energia será fundamental para projetar uma adaptação efetiva de políticas e estratégias (RASUL; SHARMA, 2016).

Segundo Hussey e Pittock (2012) o cerne do problema é a falta de integração política, os decisores políticos precisam ser capazes de responder a uma série de questões chaves:

- Quais são os impactos das políticas e regulamentos da água sobre o fornecimento e demanda de energia?
- Quais são os impactos das políticas e regulamentos energéticos sobre as demandas e disponibilidade de água?
- Como as políticas voltadas para mitigação e adaptação climáticas afetam as políticas desenvolvidas nos setores de energia e água e, especificamente, o nexo água-energia?
- Que tipo de quadro regulamentar é necessário e viável para minimizar os impactos negativos e maximizar as sinergias no nexo energia-água, tanto no planejamento do setor público como na empresa privada?

Informações incompletas sobre como a energia e a água interagem em diferentes escalas significa que as políticas (campanhas de educação, subsídios econômicos, regulamentos rigorosos, novas infraestruturas, etc.) projetadas para aumentar a eficiência em um setor podem estar criando demanda adicional no outro setor. Por outro lado, os esforços de eficiência em um setor têm, em alguns casos, um efeito positivo no outro setor. Por exemplo, os esforços para reduzir o comprimento dos chuveiros nas casas poderiam reduzir significativamente o consumo de água e energia e as mudanças nas técnicas de produção em algumas indústrias privadas, com vistas a reduzir as emissões de carbono, podem, por sua vez, reduzir o consumo de água, embora essa não seja a intenção original.

O aumento da eficiência energética dos sistemas de distribuição de água representa uma oportunidade significativa para reduzir o consumo de energia elétrica, os custos de operação e manutenção e o aumento da produtividade. O consumo de energia na maioria dos sistemas, em todo o mundo, pode ser reduzido em pelo menos 25% por meio de ações voltadas para o aumento da eficiência, o que equivale a toda a energia usada na Tailândia (JAMES *et al.*, 2002). A cada R\$ 1 economizado por meio da eficiência, ou seja, na conservação de energia, resulta em uma economia de R\$ 8 em investimentos em geração (ABES, 2005). Nas últimas décadas, impulsionados pela diminuição da disponibilidade hídrica, necessidade de sustentabilidade ambiental e pelo aumento dos custos com energia

elétrica, as empresas de saneamento estão sendo submetidas a pressões pelo aumento da eficiência dos seus processos.

A redução dos vazamentos e o aumento da eficiência do uso da água proporcionam melhorias menos onerosas em comparação com estratégias de investimento em infraestruturas adicionais, além disso, podem evitar os custos relacionados ao aumento do consumo da energia, necessidades de combustível para usinas de energia, além de danos ambientais (GUANAIS, 2015).

As perdas de energia elétrica das companhias de saneamento ocorrem majoritariamente nas estações elevatórias e originam-se principalmente por causa da baixa eficiência dos equipamentos eletromecânicos, por procedimentos operacionais inadequados e por falha na concepção dos projetos. Nesse sentido, esse detalhe (perda de água) outrora ignorado pelos antigos engenheiros em seus projetos, hoje se torna de grande importância (GOMES, 2009).

Corrêa *et al.* (2017) analisaram os impactos ambientais proporcionados pelas perdas na Adutora do Agreste em Pernambuco e concluíram que se os índices de perdas fosse reduzidos para 15%, valor aceitável do ponto de vista técnico, a redução do volume de água corresponderia ao abastecimento de uma cidade de mais de 100 mil habitantes. Além disso, haveria uma redução bastante significativa nos valores referentes ao consumo de energia, equivalente ao consumo de aproximadamente de 7,5 mil residências, e ainda uma redução de mais de 4.900 toneladas de CO₂.

3.2 CONTROLE DE PRESSÃO

As perdas de água são um dos principais problemas nos sistemas de distribuição. Os vazamentos têm causa diferentes, mas a mais impactante é o excesso de pressão nos sistemas de abastecimento de água (SAA) (WU *et al.*, 2009; COVELLI *et al.*, 2016). A pressão de serviço de SAA deve ser definida em função das demandas dos consumidores. No momento em que a vazão diminui, ocorre uma pressão adicional nas tubulações, o que pode acarretar em vazamento. Considerando o envelhecimento e a destruição dos tubos, há um vazamento médio entre 30 a 40% no sistema (FONTANA *et al.*, 2012).

A relação entre pressão e as perdas reais é conhecida há muito tempo pelos pesquisadores e técnicos de saneamento. No início dos anos 90 foram publicados no Reino Unido vários relatórios como resultado da *National Leakage Initiative* destacando o *Report G – Managing Water Pressure*, que se tornou uma referência tradicional da relação entre

pressão e volume de vazamento. De modo geral, uma diminuição de 10% na pressão em grandes sistemas implica em uma redução aproximada de 11,5% no volume perdido por vazamentos (BEZERRA, 2009).

Foi utilizado há muito tempo o cálculo das estimativas de perdas que é baseado no princípio da raiz quadrada, onde a vazão perdida é proporcional à raiz quadrada da pressão na rede hidráulica. MAY (1994) apresentou a Teoria *Fixed and Variable Area Discharge paths* (FAVAD), onde a vazão perdida varia conforme a Equação 1.

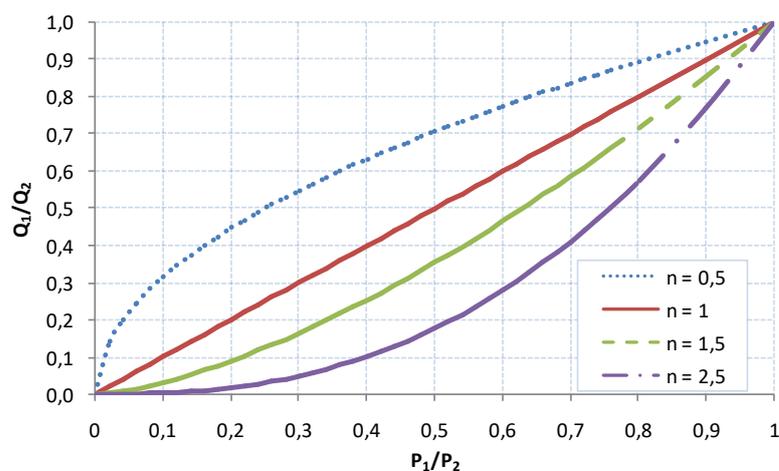
$$\frac{Q_{v1}}{Q_{v2}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{N1} \quad (1)$$

Onde: Q_v é a vazão do vazamento; P é a pressão no sistema; e $N1$ é o expoente que depende do tipo de material.

A Teoria FAVAD também apontou que furos em tubulações flexíveis aumentam de diâmetro conforme a pressão aumenta, influenciando o valor de $N1$. Estudos realizados por LAMBERT (2001) recomendam os valores do expoente $N1$:

- 0,5 para tubos que não se deformam facilmente (tubos de materiais metálicos).
- 1,0 para casos de desconhecimento do sistema.
- 1,5 para orifícios com perdas de águas indetectáveis e que são sensíveis a variação de pressão, independem do material dos tubos.
- Entre 1,5 e 2,5 para orifícios com grandes perdas de água e em tubulações plásticas (PVC, PEAD).

Bezerra (2009) analisa que um modo prático de avaliar o volume de vazamentos em setores de abastecimento é assumir uma linearidade entre a pressão e a vazão, ou seja, $N1 = 1$, geralmente, se obtém valores próximos aos reais. Todavia, sempre que possível o coeficiente deve ser determinado experimentalmente. A Figura 1 apresenta o gráfico da variação do volume perdido versus a variação da pressão para diversos valores do coeficiente $N1$.

Figura 1 – Relação da variação da vazão perdida em função da pressão

Fonte: Bezerra, 2009.

A *International Water Association* no gerenciamento de vazamentos verificou que o controle de pressão é a maneira mais fácil, rápida e menos dispendiosa de reduzir os vazamentos de água no Sistema de Distribuição (ARAÚJO *et al.*, 2006).

Segundo Menezes (2006), o controle de pressão na rede resulta em:

- Redução do volume perdido em vazamentos, economizando recursos de água e custo associado;
- Redução da frequência de rompimento de tubulações e consequentes danos que tem reparos onerosos, minimizando também as interrupções de fornecimento e os perigos causados ao público;
- Serviço com pressões mais estabilizadas ao consumidor, diminuindo a ocorrência de danos às instalações internas do usuário (tubulações, registros e boias);
- Redução dos consumos relacionados com a pressão na rede, como por exemplo, a rega de jardins utilizando aspersores.

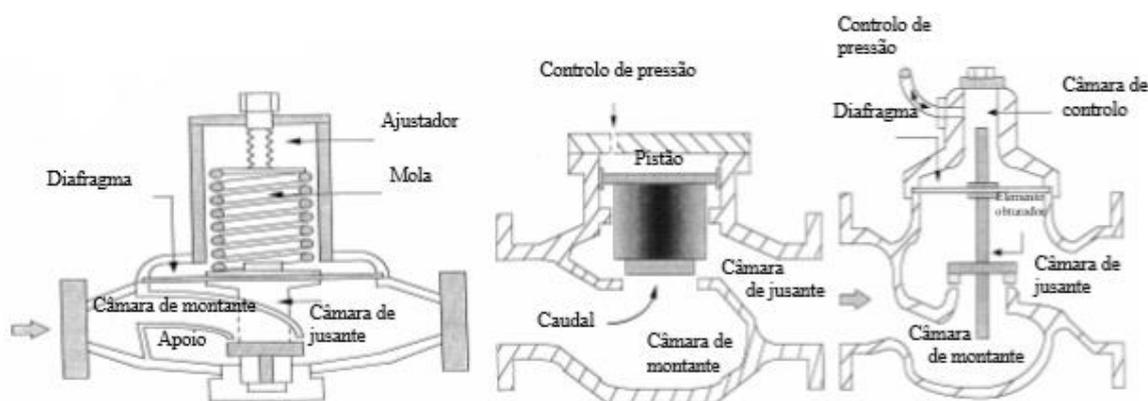
As principais ações para o controle de pressão em sistemas de distribuição de água são setorização do sistema de distribuição de água; instalação de válvulas redutoras de pressão e utilização de bombas com velocidade de rotação variável. Recentemente, pesquisadores estão buscando soluções para o controle 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 do sistema, 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 de obtenção de peças para reposição, facilidade e rapidez de aquisição (são produzidas em grande escala pela indústria), e serem equipamentos robustos.

As válvulas que são utilizadas em sistemas de abastecimento de água (SAA), para o controle de pressão, são chamadas, nos países de língua portuguesa, de válvulas redutoras de pressão (VRP). Ramos *et al.* (2004) sugerem que a alocação das VRP é a melhor alternativa para controlar a pressão em redes de distribuição de água. As VRP são dispositivos que tem como função principal reduzir, automaticamente, a pressão variável de montante a uma pressão limitada a jusante. Ou seja, as VRP resumem-se em obstáculos que provocam uma perda de carga localizada controlada, diminuindo a carga do escoamento quando necessário (OLIVEIRA, 2013).

De acordo com Bezerra (2009), o mecanismo de controle de uma VRP pode ser elétrico ou mecânico. No controle mecânico, a regulação previamente determinada é fixa, determinando assim uma pressão já estabelecida e independente da vazão e pressão de montante. Já no controle elétrico, a atuação da VRP é feita através de programas pré-estabelecidos, que permitem monitorar e controlar a vazão e a pressão, garantindo condições adequadas de abastecimento ao longo das 24h. Ramos *et al.* (2004) defenderam a existência de diversos tipos de VRP, definido por suas características, sendo as mais comuns – válvula de mola, de pistão e de diafragma (Figura 2).

Figura 2 – Diferentes tipos de VRP; da esquerda para a direita, VRP controladora por mola, VRP controlada por pistão, VRP controlada por diafragma.

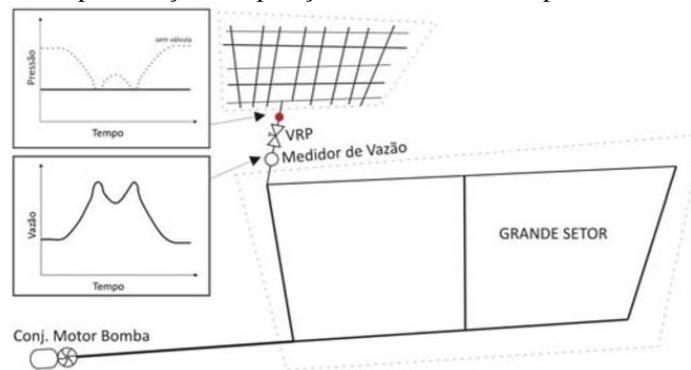


Fonte: Ramos *et al.* (2004).

Em sistemas de abastecimento de água, Bezerra (2009) apresenta os seguintes tipos de VRP:

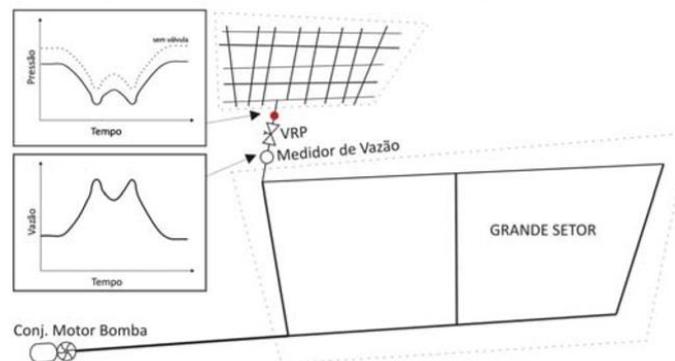
- VRP com pressão de saída fixa (sem controlador eletrônico): é utilizado quando o sistema a ser controlado possui pequenas variações na demanda, bem como perdas de cargas relativamente pequenas; os parâmetros de regulação são fixados por um circuito de pilotagem (Figura 3).
- VRP com pressão proporcional (sem controlador eletrônico): a pressão de jusante da VRP é proporcional a pressão de seu montante (Figura 4).
- VRP com modulação por tempo: é utilizado para controlar sistemas que possuem grande perda de carga, porém de perfil regular de consumo. Assim a VRP irá trabalhar com patamares de pressão de saída ajustadas para um ciclo de 24h (Figura 5).
- VRP com modulação por vazão: é usada em sistemas que possuem grande perda de carga e mudanças no perfil do consumo, que podem ser no tipo de uso, a sazonalidade ou na população (Figura 6).

Figura 3 – Representação de operação de uma VRP com pressão de saída fixa



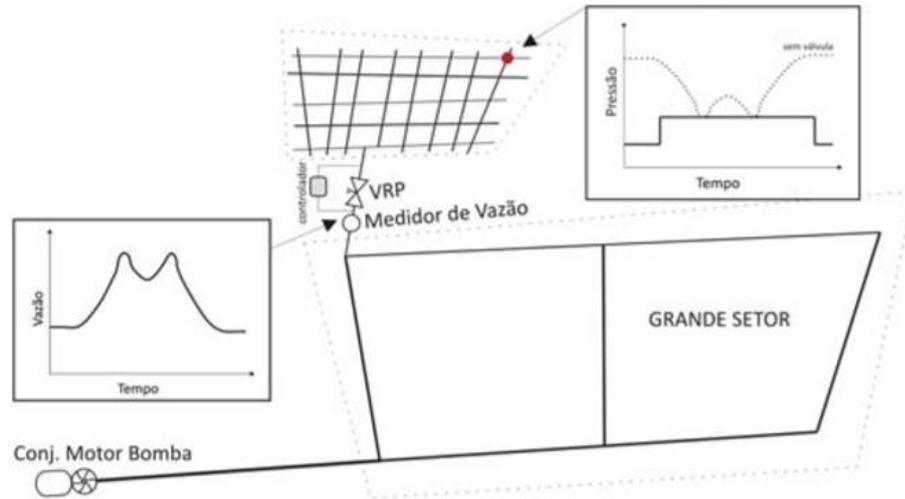
Fonte: Bezerra, 2009.

Figura 4 – Representação de operação de uma VRP com pressão de saída proporcional



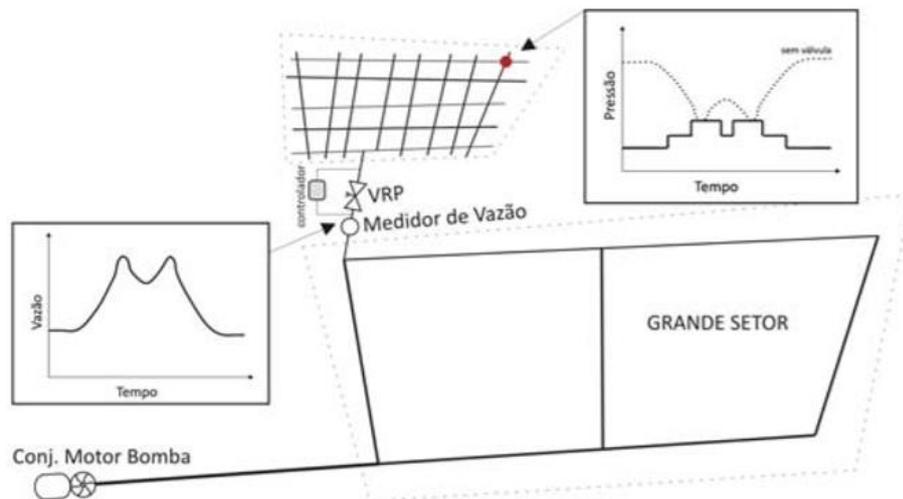
Fonte: Bezerra, 2009.

Figura 5 – Representação de operação de uma VRP com pressão de saída modulada por tempo com duas atribuições (4 horas e 22 horas), ciclo diário.



Fonte: Bezerra, 2009.

Figura 6 – Representação de operação de uma VRP com pressão de saída modulada pela vazão com três atribuições (vazão menor que 50% da máxima, vazão entre 50% e 80% da máxima, vazão acima de 80% da máxima), ciclo diário.



Fonte: Bezerra, 2009.

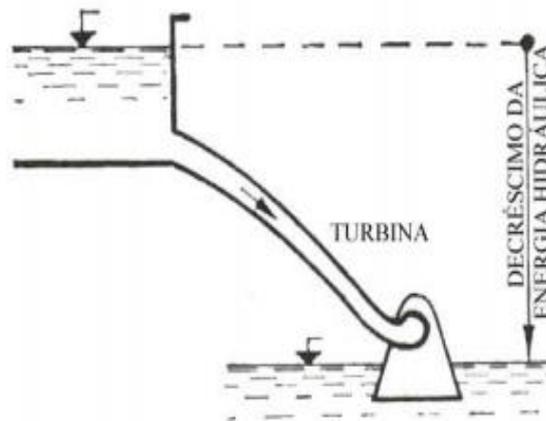
Ribeiro *et al.* (2017) apresentaram uma pesquisa, cujo objetivo foi avaliar o controle de pressão, com VRP, no SAA da cidade de Limeira, SP. No período avaliado, a cidade atingiu o menor índice de perda no País, mantendo o volume captado dos mananciais e aumentando significativamente as ligações de água nas duas últimas décadas, sem oscilações no fornecimento de água, mesmo em períodos de escassez.

3.3 MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Máquinas hidráulicas são os mecanismos utilizados na transformação de energia hidráulica em energia mecânica, ou vice-versa (STEVENAZZI, 1993 *apud* PRIETO, 2012). E podem ser divididas em:

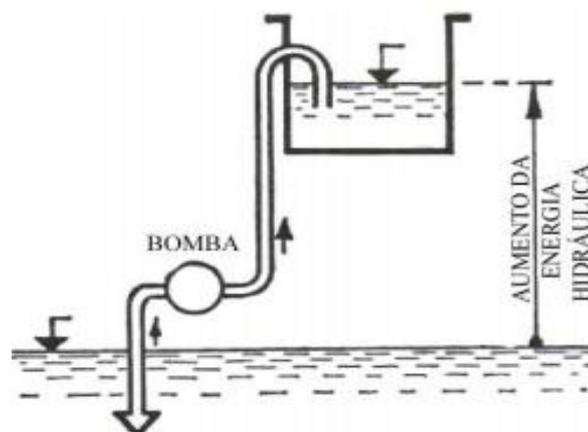
- Turbinas: são máquinas que convertem energia hidráulica em energia mecânica (Figura 7).
- Bombas: são máquinas que transformam energia mecânica de um agente exterior (motor) em energia hidráulica, a fim de elevar ou transportar o fluido (Figura 8).

Figura 7 – Representação esquemática de uma turbina.



Fonte: Prieto, 2012.

Figura 8 – Representação esquemática de uma bomba



Fonte: Prieto, 2012.

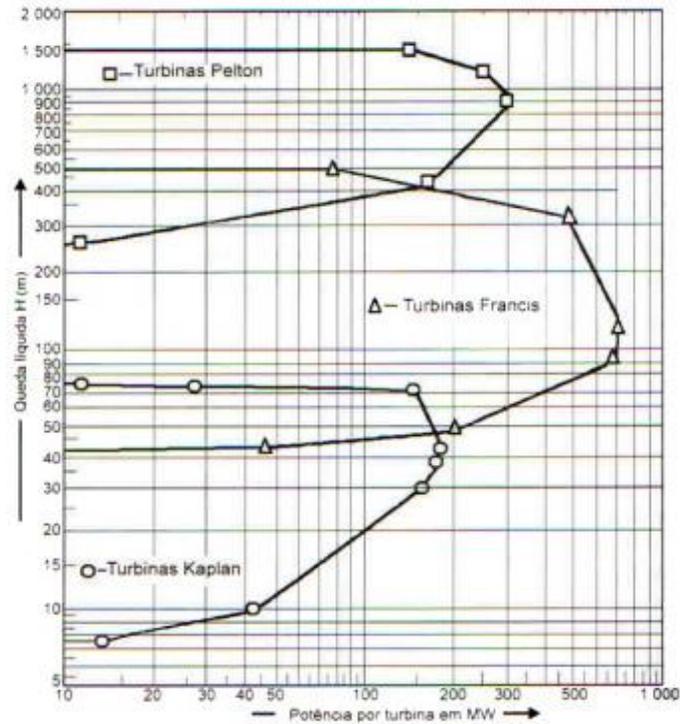
3.3.1 TURBINAS

As turbinas hidráulicas transformam a energia hidráulica em mecânica, que posteriormente é transformada em energia elétrica por uma máquina geradora acoplada ao eixo (SILVA *et al.*, 2016). As turbinas podem ser classificadas em dois grupos (PRIETO, 2012):

- Turbinas de ação: são também reconhecidas como turbinas a jato ou de impulsão. O escoamento por meio do rotor ocorre sem variação da pressão estática. Toda energia potencial da queda se transforma em energia cinética antes de encontrar o rotor. Por sua vez, esta energia cinética se transforma no rotor em energia mecânica, girando o eixo de rotação da turbina;
- Turbinas de reação: são turbinas em que o escoamento por meio do rotor ocorre com a variação da pressão estática, sendo esta maior que a atmosférica. A água entra com energia potencial de pressão, e dentro do rotor esta se transforma em energia cinética. Em algumas turbinas essa transformação ocorre no interior do rotor e outras externamente.

Há diversos modelos de turbinas hidráulicas no mercado que são capazes de cobrir uma vasta gama de condições operacionais. Esta diversificação abrange três tipos básicos de turbinas: Francis (turbina de fluxo radial), Kaplan (turbina de fluxo axial) e Pelton (turbina de fluxo tangencial) (CHADWICK; MORFETT, 1998). A Figura 9 ilustra o campo operacional de maneira simplificada das turbinas, conforme sua queda líquida e potência por turbina.

Figura 9 – Campo operacional das turbinas.



Fonte: Prieto, 2012.

3.3.2 BOMBAS HIDRÁULICAS

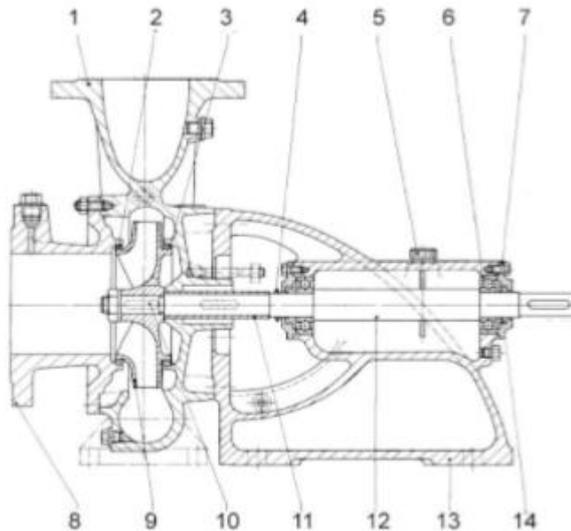
As bombas hidráulicas são máquinas geradoras, onde o líquido escoava continuamente. A transformação é realizada através da energia mecânica recebida no seu eixo, passando pela variação de energia cinética, sendo posteriormente convertida parcialmente em energia de pressão (VIANA, 2012). Os principais componentes, ilustrados na Figura 10, são: corpo espiral (1), anel de desgaste (2 e 3), anel centrifugador (4), indicador de nível de óleo (5), rolamento (6), tampa de mancal (7), tampa de sucção (8), rotor (9), chaveta (10), luva protetora do eixo (11), eixo (12), suporte de mancal (13) e anel de junta radial do eixo (14).

Segundo Viana (2012), o rotor é o órgão mais importante da bomba. E, portanto, as bombas hidráulicas são classificadas de acordo com o tipo de rotor (Figura 11), podendo ser:

- Rotor radial: O fluxo do líquido, ao passar pelo rotor, tem o sentido do raio, ou seja, o escoamento ocorre num plano perpendicular ao eixo. Opera com baixas vazões e grandes alturas manométricas;
- Rotor misto: O fluxo, ao passar pelo rotor, tem o sentido diagonal ou misto, ou seja, ocorre simultaneamente no sentido axial e radial. Opera com vazões e alturas manométricas médias;

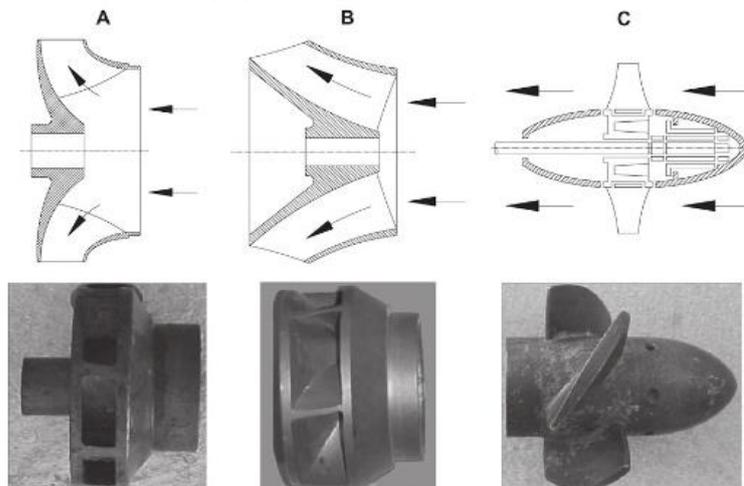
- Rotor axial: O fluxo do líquido tem o sentido do eixo. Opera com grandes vazões e pequenas alturas manométricas.

Figura 10 – Aspectos construtivos de uma bomba centrífuga.



Fonte: Adaptado de KSB, 2005

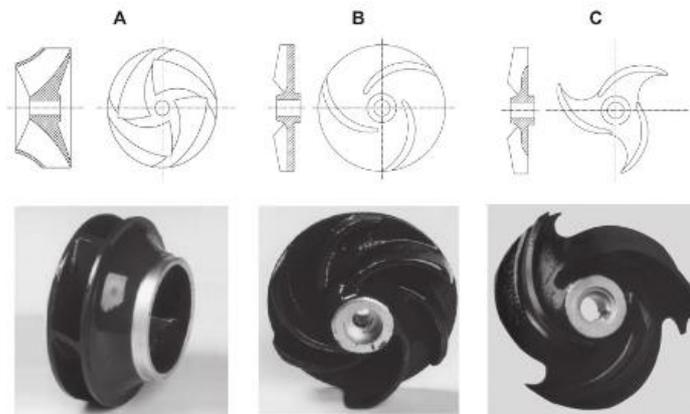
Figura 11 – Forma dos rotores. A – Radial: operam vazões pequenas e grandes alturas manométricas, B – Misto ou diagonal: operam vazões e alturas manométricas médias, C – Hélice ou axial: operam grandes vazões e pequenas alturas manométricas.



Fonte: Viana (2012).

Os rotores ainda podem ser fechados, semiabertos ou abertos, sendo esses dois últimos utilizados em líquidos sujos e viscosos. Além disso, os rotores fechados possuem rendimento maior que os demais. Na Figura 12 estão ilustrados os três rotores.

Figura 12 – Rotor fechado, semiaberto e aberto, A, B e C respectivamente.



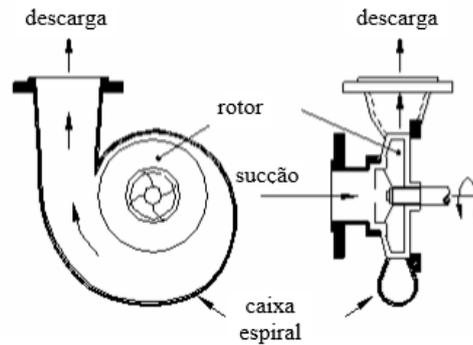
Fonte: Viana (2012).

3.4 BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS

As bombas funcionando como turbinas (BFT) surgiram como uma solução de baixo custo em geração de energia com potências inferiores a 200 kW em países desenvolvidos como França, EUA, Alemanha. O alto custo de geradores recai principalmente sobre as turbinas hidráulicas, devido à existência de poucos fabricantes e pelas especificidades de cada aproveitamento. Por outro lado, as bombas centrífugas são produzidas em série, utilizadas na agricultura (irrigação), no saneamento e na indústria. Consequentemente, os custos das bombas tendem a ser bem inferiores ao de uma turbina, com dimensões e potências semelhantes (VIANA, 2012).

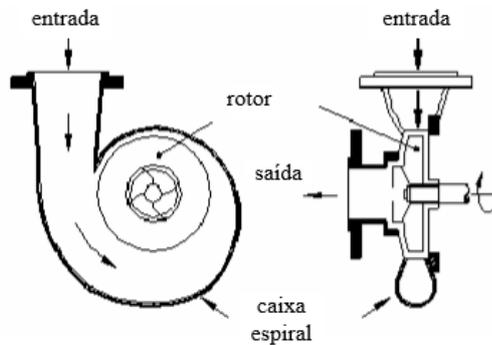
Para que uma bomba funcione como uma turbina é necessária que haja a inversão do sentido do fluxo do fluido, haverá, portanto, a inversão da rotação do rotor. A Figura 13 ilustra uma bomba centrífuga que está operando como bomba, cujo líquido entra na sucção em baixa pressão e o rotor transforma energia cinética em alta pressão. Já a Figura 14 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 (VIANA, 1987).

Figura 13 – Bomba funcionando como bomba BFB.



Fonte: Viana, 2012

Figura 14 – Bomba funcionando como turbina BFT.

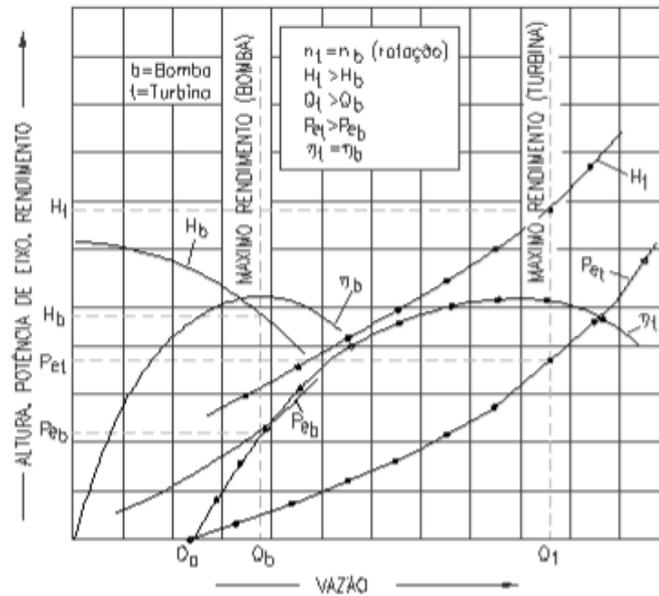


Fonte: Viana, 2012

No entanto, os ângulos das pás do rotor da bomba hidráulica são projetados de modo que aperfeiçoe a entrada de água na sucção. Com a inversão do fluxo do fluido, os ângulos das pás do rotor não são adequados, causando dessa forma perda no rendimento do conjunto. Para que o rendimento da BFT seja o mesmo de uma bomba funcionando como bomba (BFB), é necessário que a altura e a vazão da primeira sejam maiores que as da BFBs, para a mesma rotação. Em consequência, têm-se o aumento da potência de eixo (MEDEIROS, 2014).

A Figura 15 ilustra a curva de recepção da BFT e BFB. A vazão e a altura manométrica da BFT são maiores do que os valores correspondentes da bomba no máximo rendimento, resultando em uma potência de eixo maior para a BFT.

Figura 15 – Curvas de recepção da BFB e da BFT.



Fonte: Medeiros, 2014.

3.4.1 SELEÇÃO DE BFT – MÉTODO DE VIANA

Diversos estudos foram realizados para a melhor escolha da BFT em micro centrais hidrelétricas. Os métodos considerados mais práticos e que apresentam os melhores resultados são aqueles baseados na rotação específica da bomba (n_{qa}), onde se considera que uma bomba com a mesma rotação específica irá operar em condições de vazão e altura manométrica similar como turbina (LIMA, 2013). Neste conceito, destacam-se os trabalhos de Viana (1987) e Chapalaz (1992). O Método de Viana determina a altura manométrica e a vazão da BFT por meio das Equações 2 e 3, respectivamente.

$$H_b = c_H \cdot H_t \quad (2)$$

$$Q_b = c_Q \cdot Q_t \quad (3)$$

Onde H_b é a altura da bomba que será utilizada como turbina [m]; c_H é o coeficiente de altura; H_t é a altura disponível no aproveitamento da BFT [m]; Q_b é a vazão da bomba que será utilizada como turbina [m³/s]; c_Q é o coeficiente de vazão; e Q_t é a vazão disponível no aproveitamento da BFT [m³/s].

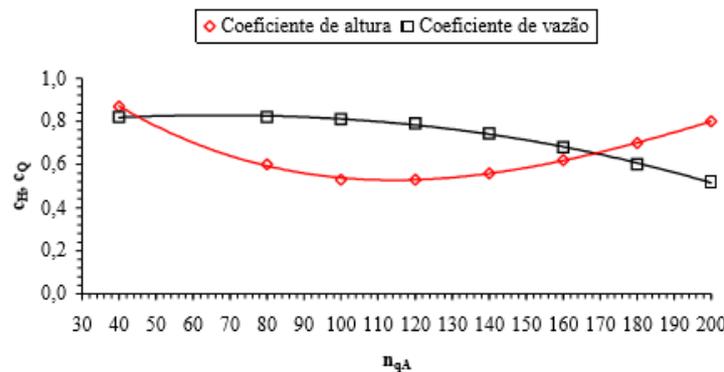
De posse destes dados e da rotação da BFT, calcula-se a rotação específica da máquina através Equação 4.

$$n_{qa} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{3/4}} \cdot 10^3 \quad (4)$$

Onde n_{qA} é a rotação específica da bomba ou da BFT no Sistema Internacional; n_t é a rotação da BFT [rps] e g é a aceleração da gravidade [m/s^2].

Viana (1987), baseados em resultados experimentais obtidos em duas bombas da fabricação nacional e retirados dos trabalhos de Kittredge (1961) e Buse (1981), levantaram os coeficientes de vazão C_Q e altura C_H em função da rotação específica n_{qA} da BFT na faixa de 40 a 200, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Coeficientes de altura e vazão.



Fonte: Viana (1987)

Determinados os coeficientes e de posse da altura e da vazão disponíveis no aproveitamento energético, calcula-se a altura manométrica e a vazão da bomba, através das equações 2 e 3. É importante salientar que, os catálogos dos fabricantes não levam em consideração as rotações de 1800 e 3600 rpm (velocidades síncronas dos motores de indução), pois as bombas operam abaixo destas, em função da velocidade dos motores assíncronos. Estas rotações situam-se em torno de 1750 e 3500 rpm. Há necessidade, no entanto, de fazer um ajuste na altura e na vazão da bomba a fim de se considerar a rotação encontrada nos catálogos. Isto pode ser feito, com boas aproximações, utilizando-se as Leis de Semelhança, através das equações 5 e 6.

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot H_b \quad (5)$$

$$Q_{ob} = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b \quad (6)$$

Onde H_{ob} é a altura manométrica referente à velocidade nominal da bomba [m]; n_{ob} é a velocidade nominal da bomba [rpm]; n_b é a velocidade da bomba [1800 rpm ou 3600 rpm]; H_b é a altura referente às velocidades de 1800 rpm ou 3600 rpm [m]; Q_{ob} é a vazão referente à velocidade nominal da bomba [m^3/s]; Q_b é a vazão referente às velocidades de 1800 ou 3600 rpm [m^3/s].

Realizados estes procedimentos, seleciona-se a bomba, através dos catálogos de fabricantes, que oferece o melhor rendimento possível, que, para a turbina será o mesmo da bomba, na mesma rotação.

3.4.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS BFT

Viana (2012) em seu livro citou algumas vantagens e desvantagens da operação de bombas como turbinas, entre as vantagens estão:

- As bombas tem custo muito menor que as turbinas, uma vez que seu mercado consumidor é muito amplo, ocorrendo, portanto produção em massa;
- A disponibilidade de bombas e suas peças de reposição é muito maior que o de turbinas, principalmente em países em desenvolvimento;
- As bombas são simples e robustas, não exigindo conhecimento técnico altamente qualificado para sua manutenção;
- As bombas e os motores podem ser adquiridos em conjunto, formando um grupo gerador completo;
- As bombas apresentam uma ampla faixa de tamanhos e potências, atendendo aos mais diversos tipos de aproveitamento hidrelétrico;
- O tempo de entrega das bombas é menor que o de turbinas;
- A instalação de grupos motobombas é mais simples que a de grupos geradores convencionais;
- Grupos motobombas, com acoplamento direto, reduzem as perdas na transmissão de potência através de correias, por exemplo.

As desvantagens do uso das BFT estão associadas ao fato da bomba hidráulica não ser produzida especificamente para geração de energia. O principal inconveniente é a não existência de sistemas de regulação de vazão. Esses sistemas tem a finalidade de manter a

rotação do grupo gerador praticamente constante, mesmo quando a carga (demanda) da rede varia.

A inexistência do sistema de regulação de velocidade de rotação nas BFT faz com que o equipamento, teoricamente, seja obrigado a operar com potência constante, não admitindo variações de carga. Além disso, deve-se tomar cuidado na definição da vazão de projeto, uma vez que o rendimento das BFT cai drasticamente quando essas não operam sob as condições para os quais foram selecionadas. Uma forma de se atender a aproveitamentos cuja variação da vazão apresenta grande amplitude ao longo do ano hidrológico é a utilização de várias BFT operando em paralelo.

4 REVISÃO DE LITERATURA

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 Borga (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.

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.

Pouliezos *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.

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.

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 m³ 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.

5 METODOLOGIA

Com vista à obtenção da solução para o problema proposto (i.e., utilização BFT para o controle de pressão e geração de energia), a metodologia foi constituída fundamentalmente por três componentes:

- *Software* para obtenção do equilíbrio hidráulico do SAA;
- Método de Viana (1987) para selecionar a primeira opção de BFT;
- Método de otimização para seleção final da BFT que busca a minimização do volume perdido por vazamentos e a maximização da geração de energia;

As simulações hidráulicas foram realizadas por meio do *software* EPANET 2.00.12. O EPANET 2.0 é responsável pela obtenção do equilíbrio hidráulico, possibilitando a análise da introdução da curva de perda de carga da VRP e da BFT, a avaliação comparativa em relação à redução de pressão e redução das perdas de água dos sistemas estudados.

5.1 SELEÇÃO DA BFT EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

O algoritmo foi desenvolvido e implementado no *software* Matlab, visando à otimização do sistema de distribuição de água, maximizando a produção de energia e redução de perdas de água, simultaneamente.

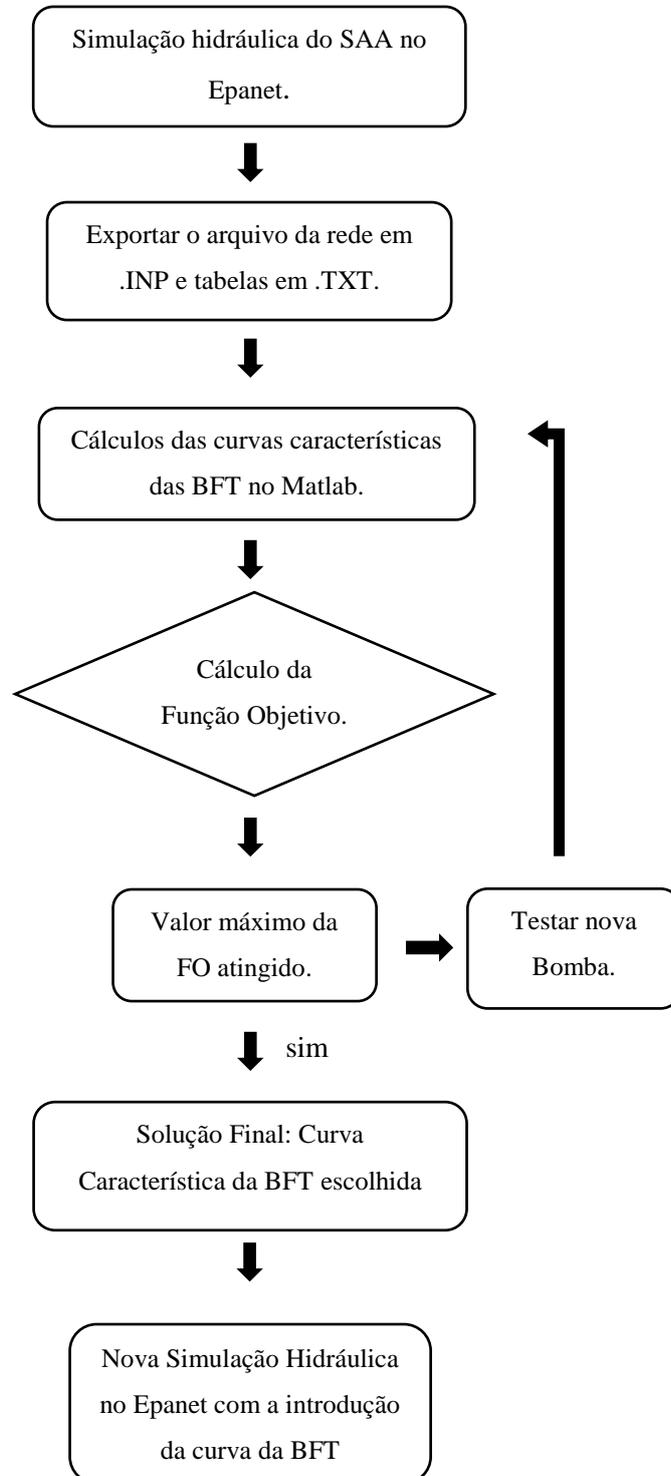
O sistema a ser otimizado foi simulado no *software* EPANET 2.0, calculando, dessa forma, os valores de pressões e de vazões para cada opção avaliada, que variam em cada intervalo de tempo. Foi necessário exportar a rede analisada em arquivo .INP (formato disponível de salvamento no EPANET) e nomeá-la com “rede”, e também foi necessário salvar as tabelas da rede em arquivo .TXT com os valores de pressão e vazão para cada intervalo de tempo, e nomeá-la com Pressao00h, Pressao01h.

Dessa forma, o modelo de otimização recebe as informações geradas pelo EPANET para cada avaliação, para definir uma solução ótima com base na função objetivo e suas restrições. O algoritmo seleciona a BFT e também gera a curva característica de perda de carga, para a análise do comportamento do sistema. Nesse modelo, a localização da BFT já é conhecida, esta deve ser inserida logo após o reservatório, na tubulação onde há maior vazão, e conseqüentemente vai produzir mais quantidade de energia.

Por fim, foi realizada uma nova simulação hidráulica no EPANET, utilizando uma válvula genérica, com a curva de altura manométrica em função da vazão turbinada, gerada

pelo modelo de otimização, para simular a perda de carga provocada pela BFT. O fluxograma do método de otimização está representado na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma do Procedimento de Seleção da BFT.



Fonte: Autora.

5.1.1 FUNÇÃO OBJETIVO

A seleção da BFT é baseada na maximização do benefício, definida pela redução do volume de vazamentos e a maximização da energia produzida. Assim, a função objetivo é escrita da seguinte forma (Equação 7).

$$FO = \sum_{i=1}^{24} \left(t_e \frac{\gamma Q_i H_i \eta}{1000} + t_a (Q_{v1} - Q_{v2}) \cdot 3600 \right) \quad (7)$$

Onde FO [€/dia] é a função objetivo a ser maximizada; t_e [€/kWh] é a tarifa de energia; γ [N.m⁻³] é o peso específico da água; Q_i [m³.s⁻¹] é a vazão da BFT no instante i ; H_i [m] é a variação de carga inserida pela BFT no instante i ; η [adimensional] é o rendimento da BFT no instante i ; t_a [€/m³] é a tarifa de água; Q_{v1} é a vazão de vazamento antes da BFT atuar no sistema no instante i e Q_{v2} é a vazão de vazamento após a introdução da BFT no sistema no instante i obtido através da Equação 1.

A primeira parcela da função objetivo corresponde ao valor econômico gerado pela energia produzida através da introdução da BFT em €/dia, enquanto a segunda parcela se refere ao valor econômico referente à economia de água que deixou de ser desperdiçada.

Como a redução da pressão está diretamente relacionada com a redução das perdas de água, é possível estimar a nova vazão de perdas por meio da equação sugerida por MAY (1994) (Eq. 1). Entretanto, para isso, é necessário calcular a pressão média da rede, através da Equação 8:

$$P_m = \frac{\frac{P_i \Sigma L_i}{2} + \frac{P_{i+1} \Sigma L_{i+1}}{2} + \dots + \frac{P_n \Sigma L_n}{2}}{L_T} \quad (8)$$

Onde P_m é a pressão média do sistema (mca); P_i corresponde à pressão do nó i (mca); L_i corresponde ao trecho que está conectado no nó i (m) e L_T corresponde ao somatório de todos os trechos do sistema (m).

O modelo tem duas restrições, a primeira estabelece que a pressão em cada um dos nós do sistema deve ser igual ou maior ao limite mínimo, adotou-se como valor de pressão mínima 10 mca, conforme estabelecido pela NBR 12218, como mostra a Equação 9.

$$P_i \geq P_{\min} \quad (9)$$

Onde P_n [mca] corresponde à pressão no nó i ; e P_{\min} [mca] corresponde à pressão mínima estabelecida por norma.

A segunda restrição se refere ao limite da vazão turbinada pela BFT. Como não se sabe qual é a verdadeira eficiência em que o dispositivo está atuando, devido à variação do consumo, por isso foi fixado um valor constante, foi necessário estabelecer que a vazão de maior eficiência da BFT é menor ou igual ao consumo máximo diário. Dessa forma, houve uma garantia de que a bomba selecionada só iria trabalhar com vazões de máxima ou próxima da máxima eficiência.

5.1.2 CURVA CARACTERÍSTICA DA BFT

Os fabricantes de bomba normalmente não fornecem as curvas característica de suas bombas funcionando como turbinas. Portanto, estabelecer uma correlação entre os desempenhos dos modos diretos (bomba funcionando como bomba) e reverso (bomba funcionando como turbina) é essencial para selecionar e prever o comportamento da máquina adequada.

Derakhshan e Nourbakhsh (2008) em seu estudo experimental notaram que as curvas características das BFT podem ser determinadas a partir do ponto de operação de melhor eficiência (Q_{pme} e H_{pme}) da bomba. Logo, as curvas de perdas de carga podem ser determinadas a partir da Equação 10:

$$H_i = H_{tb} \left(1.0283 \left(\frac{Q_i}{Q_{tb}} \right)^2 - 0.5468 \left(\frac{Q_i}{Q_{tb}} \right) + 0.5314 \right) \quad (10)$$

Onde H_i é a perda de carga hidráulica inserida pela BFT no instante i [m]; Q_i corresponde a vazão no instante i [m³/s]; H_{tb} é a altura manométrica da BFT no ponto de melhor eficiência [m]; e Q_{tb} é a vazão da BFT no ponto de melhor eficiência [m³/s].

Os valores de H_{tb} e Q_{tb} são calculados a partir do ponto de operação da bomba em seu ponto de melhor rendimento, proposto por William (1995), conforme as Equações 11 e 12.

$$H_{tb} = \frac{H_{pme}}{\eta_{m\acute{a}x}^{1.2}} \quad (11)$$

$$Q_{tb} = \frac{Q_{pme}}{\eta_{m\acute{a}x}^{0.8}} \quad (12)$$

Onde H_{pme} é a altura manométrica da bomba no ponto de melhor eficiência [m]; Q_{pme} é a vazão da bomba no ponto de melhor eficiência [m³/s].

Dessa forma, para a resolução do problema proposto, o ponto de operação de melhor eficiência da bomba (Q_{pme} e H_{pme}) e o rendimento máximo da bomba foram as variáveis de decisão. O modelo de bomba escolhido para a otimização foi a bomba KSB, cujo é bastante conhecida e fácil de ser encontrada, o que justifica a sua escolha, a Tabela 1 representa os pontos de operação de melhor eficiência para cada modelo de bomba, utilizado no algoritmo.

Tabela 1 – Pontos de operação de melhor eficiência da bomba KSB – Rotação 1750 rpm.

Q (m ³ /h)	H (m)	η (%)	Modelo	φ (mm)
6,0	9,6	60,0	25-150	147
8,0	20,0	38,0	25-200	209
11,5	7,6	56,0	32-125.1	144
13,0	13,0	50,0	32-160.1	176
9,7	18,0	42,0	32-200.1	203
10,5	31,6	34,0	32-250.1	260
15,0	8,5	65,0	32-125	139
15,5	11,0	55,0	32-160	176
17,2	19,8	55,0	32-200	209
16,4	31,0	46,0	32-250	260
27,5	8,0	74,0	40-125	139
30,0	13,4	70,0	40-160	174
26,5	20,0	58,0	40-200	209
30,0	29,0	55,0	40-250	260
31,5	52,0	43,0	40-315	333
50,0	7,7	74,0	50-125	142
51,0	12,0	70,5	50-160	174
47,0	21,0	69,5	50-200	219
47,0	30,4	64,0	50-250	260
54,0	47,5	61,5	50-315	320
73,0	7,6	78,0	65-125	141
72,0	12,5	81,0	65-160	172
73,0	21,5	79,0	65-200	219
75,0	28,0	68,0	65-250	260
100,0	45,0	65,0	65-315	320
128,0	12,3	83,0	80-160	172
120,0	21,0	81,5	80-200	219
115,0	29,0	71,5	80-250	266
165,0	52,0	75,0	80-315	332
170,0	71,0	71,0	80-400	404

180,0	11,4	80,0	100-160	185
180,0	19,0	79,5	100-200	219
190,0	29,0	82,0	100-250	265
224,0	51,0	78,0	100-315	332
220,0	71,0	73,0	100-400	404
300,0	18,0	86,0	125-200	218
327,0	27,5	86,0	125-250	265
330,0	50,0	82,0	125-315	332
360,0	80,0	78,0	125-400	417
440,0	13,2	83,5	150-200	218
500,0	45,0	85,5	150-315	328
535,0	75,0	83,0	150-400	413

Tabela 2 – Pontos de operação de melhor eficiência da bomba KSB – Rotação 3500 rpm.

Q (m ³ /h)	H (m)	η (%)	Modelo	ϕ (mm)
12,0	37,0	60,0	25-150	147
16,0	80,0	40,0	25-200	209
23,0	32,0	64,0	32-125.1	144
26,0	52,0	60,0	32-160.1	176
19,5	71,0	46,5	32-200.1	203
20,3	127,0	36,0	32-250.1	260
31,0	33,5	68,0	32-125	139
30,0	45,0	58,0	32-160	176
33,0	78,0	57,0	32-200	209
32,5	125,0	46,0	32-250	260
55,0	32,0	71,5	40-125	139
60,0	55,0	72,0	40-160	174
52,0	80,0	67,0	40-200	209
61,0	112,0	58,0	40-250	260
98,0	31,5	80,0	50-125	142
103,0	50,0	80,5	50-160	174
90,0	84,0	74,5	50-200	219
97,0	121,0	67,0	50-250	260
145,0	30,0	83,0	65-125	141
145,0	50,0	82,0	65-160	172
135,0	72,0	80,5	65-200	204
150,0	120,0	75,0	65-250	260
260,0	40,5	81,0	80-160	172
240,0	84,0	81,5	80-200	219
233,0	117,0	77,5	80-250	266
300,0	47,5	81,5	100-160	185
365,0	77,0	82,5	100-200	219

Fonte: Autora.

Sendo assim, tem-se um problema de otimização discreta, de modo que a bomba selecionada vai ser aquela que maximiza a função objetivo, dentro dos limites de restrições. Como a BFT tem local fixado no trecho que sucede o reservatório, a redução de pressão será constante para todos os nós, tornando o problema de cálculo hidráulico mais simples. O código deste modelo encontra-se no Apêndice A.

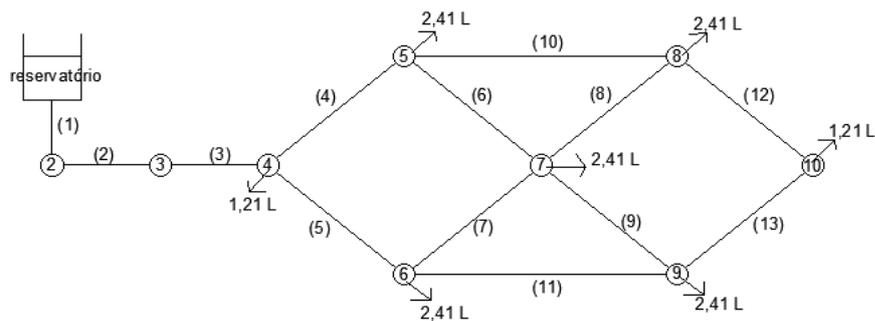
A fim de comparar os resultados do modelo proposto, foi aplicado o Método de Viana (1987) para selecionar outra BFT, e também foi utilizado a VRP no sistema de abastecimento de água em estudo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ESTUDO DE CASO

Para avaliar o método proposto, utilizou-se a rede de distribuição de água fictícia apresentada por Gomes (2011) (Figura 18). As tubulações possuem 0,01 mm de rugosidade, a cota topográfica dos nós é igual à zero, e o nível do reservatório é 50 m. Os demais dados estão descritos na Tabela 3. Esta rede está sujeita à variação da demanda apresentada pela Figura 19. Adicionalmente, considerou-se que todos os trechos possuem uma parcela de vazamento com índice de 30% de perdas de água.

Figura 18 – Esquema da rede de distribuição de água.

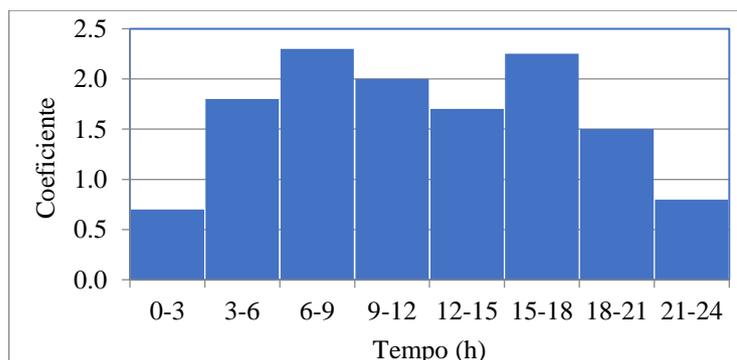


Fonte: Adaptado de Gomes, 2011.

Tabela 3 – Dados da rede de distribuição de água.

ID Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
(1)	1	250
(2)	250	150
(3)	250	150
(4)	500	125
(5)	500	125
(6)	500	100
(7)	500	100
(8)	500	100
(9)	1000	100
(10)	1000	100
(11)	500	100
(12)	500	80
(13)	500	80

Fonte: Gomes (2011).

Figura 19 – Coeficiente de demanda dos nós da Rede Exemplo.

Fonte: Autora.

O preço de venda unitário de energia foi considerado constante e igual a 0,1 €/kWh. A eficiência da BFT varia dependendo do consumo, de acordo com a curva característica da bomba selecionada, para simplificar o modelo foi considerado um valor constante conservador de 65%. O custo unitário da água foi considerado de 0,3 €/m³, valor também considerado por Fecarotta e McNabola (2017).

Foi utilizado o *software* EPANET 2.0 para o equilíbrio hidráulico da rede. Na Tabela 4, têm-se os valores referentes às pressões do sistema durante o intervalo de 24 horas. Considerando que, inicialmente, em todos os trechos há uma parcela de vazamento com índice de 30% de perdas de água, o volume de água perdida durante a distribuição é de 611,84 m³/dia.

Tabela 4 – Pressões em cada intervalo de tempo da Rede Fictícia.

Tempo (h)	Pressão (mca)								
	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
0 – 3	50,00	49,47	48,95	48,32	48,32	48,03	47,94	47,94	47,86
3 – 6	50,00	47,03	44,13	40,71	40,71	39,14	38,69	38,69	38,29
6 – 9	50,00	45,39	40,78	35,44	35,44	33,00	32,31	32,31	31,69
9 – 12	50,00	46,44	42,88	38,73	38,73	36,83	36,30	36,30	35,81
12 – 15	50,00	47,36	44,71	41,63	41,63	40,21	39,81	39,81	39,44
15 – 18	50,00	45,57	41,15	36,01	36,01	33,67	33,01	33,01	32,41
18 – 21	50,00	47,90	45,80	43,34	43,34	42,20	41,88	41,88	41,59
21 – 24	50,00	49,33	48,66	47,87	47,87	47,49	47,39	47,39	47,29

Fonte: Autora.

A Figura 20 representa o mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia no instante 00h, representando os maiores valores de pressão e conseqüentemente menores consumos. Percebe-se que as pressões são altas e podem ser reduzido através de dispositivos de controle de pressão, como BFT, proposto nesse trabalho.

Figura 20 – Mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia de Gomes (2011) às 00h.

Fonte: Autora.

6.2 REDE FICTÍCIA COM VRP

A Tabela 5 mostra os valores correspondentes às pressões dos nós da rede fictícia com a atuação de uma VRP no sistema. O dispositivo foi instalado no trecho 2 e ajustado de modo que a pressão do nó crítico da rede (nó 10) correspondesse à pressão mínima igual a 10 mca (de acordo com a recomendação da NBR 12218).

Tabela 5 – Pressões dos nós da rede fictícia após a introdução da VRP.

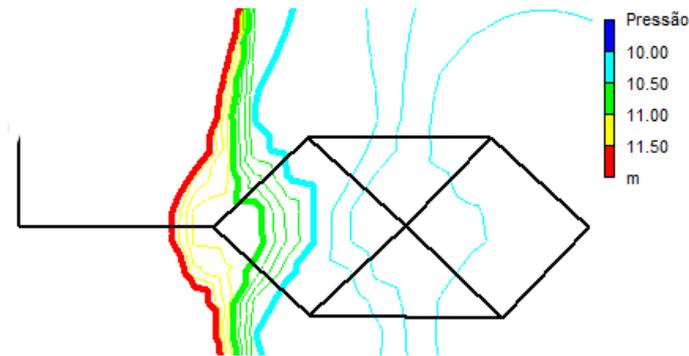
Tempo (h)	Pressão (mca)								
	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
0 – 3	50,00	11,61	11,08	10,46	10,46	10,16	10,08	10,08	10,00
3 – 6	50,00	18,78	15,85	12,42	12,24	10,85	10,41	10,41	10,00
6 – 9	50,00	23,71	19,10	13,75	13,75	11,32	10,63	10,63	10,00
9 – 12	50,00	20,63	17,07	12,92	12,92	11,03	10,49	10,49	10,00
12 – 15	50,00	17,92	15,28	12,19	12,19	10,77	10,37	10,37	10,00
15 – 18	50,00	23,17	18,75	13,61	13,61	11,26	10,60	10,60	10,00
18 – 21	50,00	16,31	14,21	11,75	11,75	10,62	10,29	10,29	10,00
21 – 24	50,00	12,04	11,37	10,58	10,58	10,20	10,10	10,10	10,00

Fonte: Autora.

A utilização da VRP resultou em uma redução no índice de perdas para 3%, com um volume de água perdido diário de 61,38 m³, que corresponde a uma redução potencial de 550,46 m³. Porém com a sua utilização, toda a energia é dissipada.

Considerando o custo unitário da água de 0,3 €/m³, o valor econômico desse cenário é de 18,4 €/dia. A Figura 21 representa o mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia no instante 00h. Com a atuação da VRP automática, o sistema permanece com a pressão mínima no nó crítico em todo o intervalo de tempo.

Figura 21 – Mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia de Gomes (2011) às 00h com a atuação da VRP.



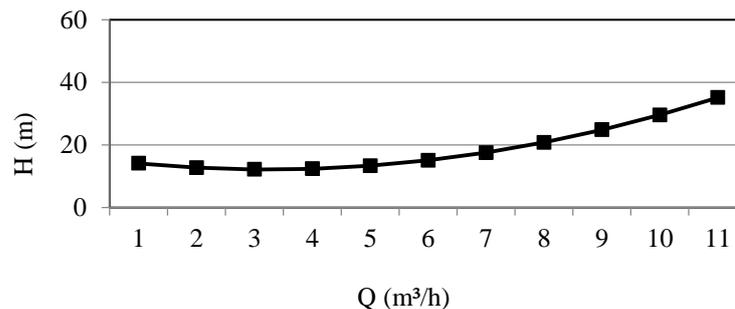
Fonte: Autora.

6.3 REDE FICTÍCIA COM BFT SELECIONADA COM O MÉTODO DE VIANA.

Para a seleção da BFT, primeiramente, determinou-se a rotação específica da máquina a partir da Equação 4 ($n_{qa} = 66,04$ rps), para isso utilizou-se a vazão média do sistema ($Q_m = 23,605$ L/s) e altura manométrica média (29,29 m). Com isto, a partir da Figura 16, foi possível obter os valores do coeficiente de altura ($c_H = 0,69$) e do coeficiente de vazão ($c_Q = 0,82$), e desse modo determinou-se o ponto de operação ($Q = 68$ m³/h, $H = 19$ m) da bomba por meio das Equações 3 e 4, lembrando de fazer a correção com as equações 6 e 7. A bomba comercial escolhida foi a KSB 65x200, com rotor de 211 mm e possui um rendimento de 79% para as condições de operação, cujo catálogo encontra-se no Anexo A.

Utilizou-se a Equação 11 para determinar a curva da perda de carga em função da vazão turbinada (Figura 22), através do ponto de operação de melhor eficiência ($Q_{pme} = 19,44$ L/s e $H_{pme} = 20$ m). Em seguida foi realizada uma nova simulação no *software* EPANET 2.0, onde foi utilizada uma válvula genérica para simular a perda de carga provocada pela BFT no trecho 2. A Tabela 6 mostra os valores correspondentes às pressões de cada nó da rede de distribuição de água com a utilização da BFT no sistema.

Figura 22 – Curva característica da BFT – Perda de carga em função da vazão turbinada.



Fonte: Autora.

Tabela 6 – Pressões dos nós da rede de distribuição de água com BFT.

Tempo (h)	Pressão (mca)									Estado da BFT
	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10	
0 – 3	50,00	36,53	36,01	35,38	35,39	35,10	35,01	35,01	34,93	Ligada
3 – 6	50,00	15,31	12,41	8,99	9,00	7,43	6,98	6,98	6,58	Desligada
6 – 9	50,00	-3,17	-7,78	-13,12	-13,12	-15,56	-16,25	-16,25	-16,87	Desligada
9 – 12	50,00	8,61	5,05	0,90	0,91	-0,99	-1,52	-1,52	-2,01	Desligada
12 – 15	50,00	18,40	15,75	12,67	12,67	11,25	10,85	10,85	10,48	Ligada
15 – 18	50,00	-1,08	-5,5	-10,64	-10,64	-12,98	-13,64	-13,64	-14,24	Desligada
18 – 21	50,00	23,82	21,72	19,26	19,26	18,12	17,80	17,80	17,51	Ligada
21 – 24	50,00	35,73	35,06	34,27	34,27	33,89	33,79	33,79	33,69	Ligada

Fonte: Autora.

Com a utilização dessa BFT, pode-se perceber que durante o período de 3 à 12h e 15 à 18h, as pressões dos nós ficaram abaixo da pressão mínima, apontando que nesses períodos a BFT deve ficar desligada. Dessa forma, a Tabela 7 mostra os valores correspondentes às pressões de cada nó da rede com a utilização da BFT no sistema, considerando o seu desligamento.

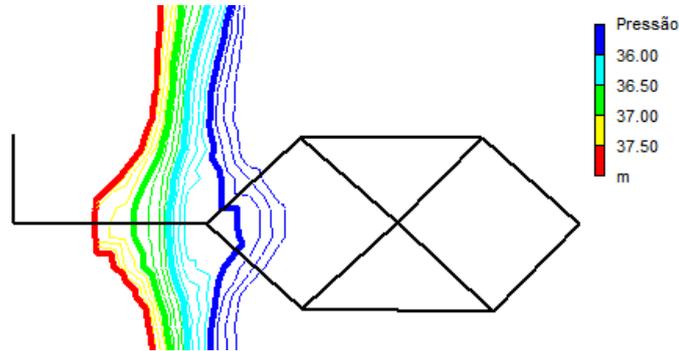
Tabela 7 - Pressões dos nós da rede de distribuição de água com BFT considerando seu desligamento.

Tempo (h)	Pressão (mca)								
	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
0 – 3	50,00	36,53	36,01	35,38	35,39	35,10	35,01	35,01	34,93
3 – 6	50,00	47,03	44,13	40,71	40,71	39,14	38,69	38,69	38,29
6 – 9	50,00	45,39	40,78	35,44	35,44	33,00	32,31	32,31	31,69
9 – 12	50,00	46,44	42,88	38,73	38,73	36,83	36,30	36,30	35,81
12 – 15	50,00	18,40	15,75	12,67	12,67	11,25	10,85	10,85	10,48
15 – 18	50,00	45,57	41,15	36,01	36,01	33,67	33,01	33,01	32,41
18 – 21	50,00	23,82	21,72	19,26	19,26	18,12	17,80	17,80	17,51
21 – 24	50,00	35,73	35,06	34,27	34,27	33,89	33,79	33,79	33,69

Fonte: Autora.

Com isto, o índice de perdas foi reduzido para 21,85%, correspondendo ao volume perdido de água de 445,67 m³/dia, redução potencial de 166,75 m³ e 29,7 kWh/dia de energia gerada. E, o valor econômico gerado por essa BFT é de 52,82 €/dia. A Figura 23 representa o mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia no instante 00h, após a introdução da BFT, selecionada com o método de Viana.

Figura 23 – Mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia de Gomes (2011) às 00h com a atuação da BFT (selecionada pelo método de Viana).

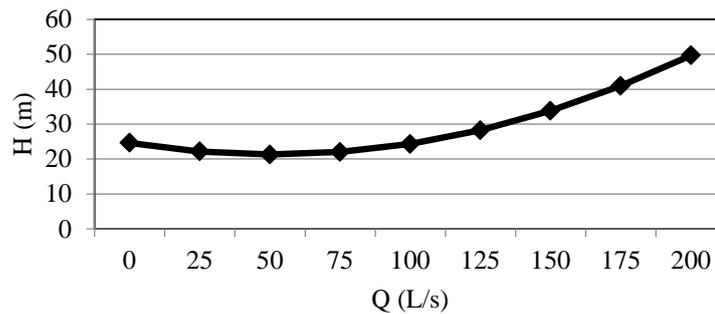


Fonte: Autora.

6.4 REDE FICTÍCIA OTIMIZADA

Ao realizar a otimização no *software* Matlab, obteve-se a seleção da bomba, KSB 80x200, com rotor de 219 mm. O valor do ponto ótimo do equipamento funcionando como bomba é $Q_{pme} = 33,28$ L/s e $H_{pme} = 21$ m. Como resultado, o Matlab gera em arquivo .CRV a curva característica da BFT selecionada, apresentado na Figura 24, que por sua vez, deve ser inserida no EPANET para análises hidráulicas. A Tabela 8 mostra as pressões nos nós da rede de distribuição de água analisada após a utilização otimizada da BFT no sistema.

Figura 24 – Curva Característica da BFT otimizada – Perda de carga em função da vazão turbinada.



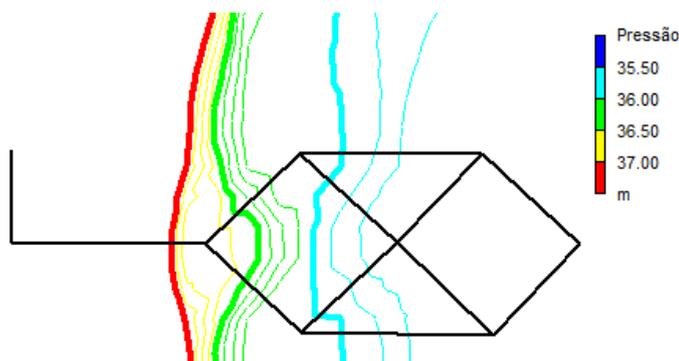
Fonte: Autora.

Tabela 8 – Pressões dos nós da rede fictícia com otimização da BFT.

Tempo (h)	Pressão (mca)								
	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
0 – 3	50,00	37,15	36,63	36,00	36,00	35,71	35,62	35,62	35,54
3 – 6	50,00	30,32	27,42	24,00	24,00	22,43	21,98	21,98	21,58
6 – 9	50,00	23,68	19,07	13,73	13,73	11,29	10,60	10,60	10,00
9 – 12	50,00	27,96	24,40	20,25	20,25	18,35	17,82	17,82	17,33
12 – 15	50,00	31,43	28,78	25,70	25,70	24,28	23,88	23,88	23,51
15 – 18	50,00	23,17	20,03	14,89	14,89	12,55	11,89	11,89	11,29
18 – 21	50,00	33,30	31,20	28,74	28,74	27,60	27,28	27,28	26,99
21 – 24	50,00	36,99	36,32	35,53	35,53	35,15	35,05	35,05	34,95

Fonte: Autora.

Com a utilização da BFT o índice de perdas foi reduzido para 9,2%, correspondendo ao volume perdido de água de 185,42 m³/dia, redução potencial de 424,42 m³, 81,92 kWh/dia de energia gerada e valor econômico gerado de 135,52 €/dia, melhor cenário analisado. A Figura 25 representa o mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia no instante 00h, após a introdução da BFT, selecionada com o modelo de otimização proposto nesse trabalho.

Figura 25 – Mapa de isolinhas de pressão da rede fictícia de Gomes (2011) às 00h com a atuação da BFT (selecionada pelo método de Otimização).

Fonte: Autora.

Na Tabela 9 estão descritos os resultados obtidos para cada método utilizado nesse trabalho, ou seja, atuação da VRP, da BFT selecionada com o método de Viana e da BFT selecionada com o método de otimização proposto por este trabalho. A atuação da VRP faz com que a rede trabalhe com seus valores mínimos de pressão, porém não gera energia, como a BFT, mostrando que há desperdícios de energia no SAA. Observa-se que o método de otimização se mostrou eficaz com alta geração de energia e redução de perdas similar se comparada com a utilização da VRP.

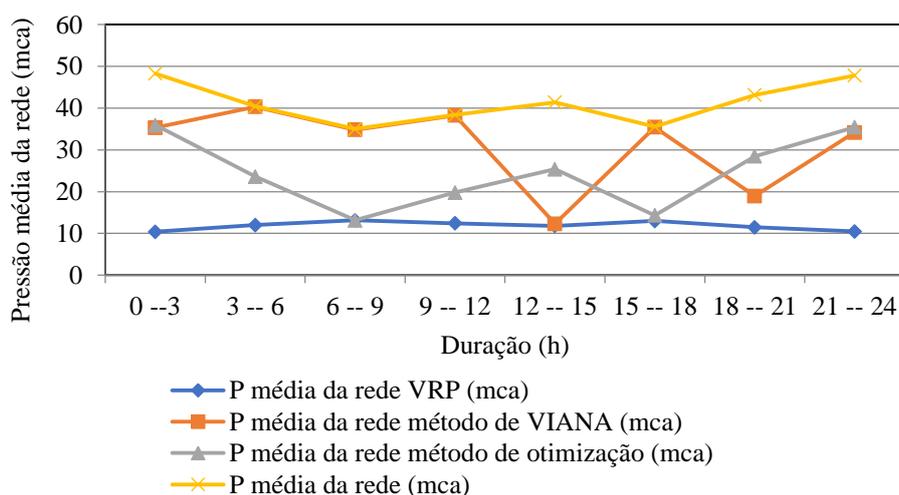
Tabela 9 – Resumo dos resultados obtidos para cada método utilizado.

Resultados	VRP	Método de Viana	Método de otimização
Função Objetivo (€/dia)	18,84	52,82	135,52
Energia (kWh/dia)	-	29,70	81,92
Redução de perdas (m ³ /dia)	550,46	166,75	424,42
Índice de perda (%)	3,00	21,85	9,20

Fonte: Autora.

Lima 2017, em sua tese, também utilizou a rede fictícia de Gomes (2011) para analisar seu método de seleção de BFT. Em seus resultados constatou em 78 kWh/dia de energia produzida, valor bem próximo da energia produzida neste trabalho, porém a redução de perdas foi de 62,5 m³/dia, valor bastante inferior aos resultados desse trabalho, contudo justificável pelo período de tempo que a BFT passa desligada.

A Figura 26 ilustra a variação da pressão média da rede em função do tempo. Essa variação ocorre devido à variação da demanda no decorrer do tempo. Com a utilização da BFT, selecionada através do método de Viana, nos períodos em que a pressão não é atendida, a BFT deve permanecer desligada, comprometendo a eficiência hidráulica e a geração de energia. Conforme o esperado, o método de otimização mostrou-se mais eficaz na redução de perdas de água e na geração de energia.

Figura 26 – Comportamento da pressão média da Rede Exemplo.

Fonte: Autora.

7 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões e considerações finais deste trabalho assim como algumas perspectivas (sugestões) para trabalhos futuros referentes a este tema.

7.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

A gestão da pressão é um dos métodos mais eficazes para reduzir as perdas e o consumo de água em sistemas de abastecimento de água. A pesquisa demonstrou que o excesso de pressão nestes sistemas pode ser utilizado para a geração não convencional de energia através de bombas funcionando como turbinas (BFT), que além de fazer o aproveitamento energético, contribui para a redução de perdas em SAA.

Esse trabalho apresenta um modelo para otimização de redes de distribuição de água, que utiliza o Matlab e o EPANET 2.0 para a seleção ótima da BFT. O modelo desenvolvido possibilitou o controle satisfatório da pressão no sistema avaliado e maximizou a geração de energia elétrica da BFT, simultaneamente.

Ainda que as BFT apresentem comportamento de queda de pressão similar às VRP, não é possível assegurar uma pressão de saída constante, fazendo com que o volume de vazamentos seja elevado em períodos de baixo consumo. Assim, a atratividade do investimento será dependente da tarifa de energia, muitas vezes superior aos custos de produção de água em locais que operem por gravidade, o que pode viabilizar a implantação da micro central. Nestas situações e razões, o método apresentado pode ser uma ferramenta de grande utilidade para a definição de soluções para controle de pressão e geração de energia em redes de abastecimento 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.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros podem contribuir na ampliação das análises realizadas nesta pesquisa, de forma a ampliá-las para casos mais gerais. Assim, cita-se a seguir algumas propostas para elaboração de trabalhos futuros:

- Aprimorar os métodos de obtenção das curvas teóricas das BFT para melhorar a previsão de seu comportamento hidráulico;
- Aplicar técnicas para a localização ideal das BFT em SAA.

REFERÊNCIAS.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES. **Perdas em sistemas de abastecimento de água:** Diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate. São Paulo-SP, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12218:** Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro-RJ, 1994.
- ARAÚJO, L.S.; RAMOS, H.; COELHO, S.T., 2006. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. **Water Resources Management**, v. 20, p. 133-149, 2006.
- BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A.; GOMES, H. P.; SALVINO, M. M. Energy Savings in Pumping Systems: Application of a Fuzzy System. **Ciência & Engenharia**, v. 24, p. 71-78, 2015.
- BEZERRA, S. T. M. **Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia.** 164 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009. Cap. 3. 2009.
- CARRAVETTA, A.; DEL G. G.; FECAROTTA, O.; RAMOS, H. Pat design strategy for energy recovery in water distribution networks by electrical regulation. **Energies**, v. 6, n. 1, p. 411-424, 2013.
- _____. Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy. **Water Res. Manag.**, n. 26, p. 3947-3959, 2012.
- CARRAVETTA, A.; FECAROTTA, O.; RAMOS, H. Numerical simulation on pump as turbine: Mesh reliability and performance concerns. **Research Gate**, jun. 2011.
- 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.
- CARTER, NICOLE. **Energy's water demand:** trends, vulnerabilities, and management. Congressional Research Service, Washington, D.C., USA, 2010.
- CHADWICK, A; MORFETT, J. **Hidráulica em Engenharia Civil e Ambiental.** Lisboa: Instituto Piaget, 1998.
- 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.
- CORRÊA, S. S.; SILVA, L. C.; BEZERRA, S. T. M.; ALVES, I. M.; DUARTE, A. D.; COELHO, I. C. L. Análise dos impactos ambientais proporcionados pelas perdas de água em sistemas de distribuição de água. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, 2017.

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.

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.

DUTRA, J. B. A. **Eficiência energética no controle da vazão em sistemas de bombeamento de água**. Paraíba do Sul, 2005. Disponível em: <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/APOSTILA_MH/eficiencia_bombeamento_CURVA%20DA%20INSTALA__O.pdf>. Acesso em: 23 Out. 2017.

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.

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.

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.

FONTANA, N.; GIUGNI, M.; GLIELMO, L.; MARINI, G. Real time control of a prototype for pressure regulation and energy production in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, n. 7, jun, 2016.

FONTANA, N.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D. Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 138, mai. 2012.

GIUGNI, M.; FONTANA, N.; PORTOLANO, D (2009). Energy saving policy in water distribution networks. *Renewable Energy Power Quality Journal*, v. 7, n. 487, p. 1-6, 2009.

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.

GOMES, Heber Pimentel. **Eficiência Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos**. 2ª Ed. UFPB, 2009.

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.

GUANAIS, A. L. S. R. **Avaliação Energética e das Emissões de Gases de Efeito Estufa do Sistema Integrado de Abastecimento de Água de Feira de Santana**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana-BA, 2015.

HUNAIDI, O.; CHU, W.; Wang, A.; Guan, W. Detecting Leaks in Plastic Pipes. *Journal of the American Water World Association*, v. 92, n. 2, p. 82-94, 2000.

HUSSEY, K.; PITTOCK, J. The Energy-Water Nexus: Managing the Links between Energy and Water for a Sustainable Future. **Ecology And Society**, v. 17, n. 1, p.17-31. 2012

JAFARI, R.; KHANJANI, M.; ESMAEILIAN, H. R. Pressure Management and Electric Power Production Using Pumps as Turbines. **Journal American Water Works Association**, 2015.

JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. E. Agua y Energía: Aprovechando las Oportunidades de Eficiencia de Agua y Energia aún no Exploradas en los Sistemas Municipales de Água. **Alliance to Save Energy**. Washington-USA, 2002.

KRAMER, M.; TERHEIDEN, K.; WIEPRECHT, S. Pumps as Turbines for Efficient Energy Recovery in Water Supply Networks. **Renewable Energy**, v. 122, p. 17-25, 2018.

LAMBERT, A. **What do We Know About Pressure: Leakage Relationships in Distribution Systems?**. In: *Proceedings of IWA Specialised Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management*. Brn., República Checa (apud Delgado *et al.*, 2008).

LIMA, G. M. **Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá. 2013.

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.

LIMA, G. M.; LUVIZOTTO, E.; BRENTAN, B. M (2017). Selection and location of pumps as turbines substituting pressure reducing valves. **Renewable Energy**. 2017.

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.

MARCHIS, M.; MILICI, B.; VOLPE, R.; MESSINEO, A. Energy Saving in Water Distribution Network through Pump as Turbine Generators. Economic and Environmental Analysis. **Energies**, v. 9, n. 877, 15p, 2016.

MAY, J., **Pressure Dependent Leakage**. World Water and Environmental Engineering, Out. 1994.

MEDEIROS, D. M. **A utilização de bombas funcionando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 2014.

MENEZES, C. E. **Controle de Pressão e Combate às Perdas Físicas no Sistema de Abastecimento de Água**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, F. M. R. **Redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água: Otimização das pressões numa grande rede de distribuição de água – aplicação ao caso do**

Porto. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto, 2013.

PELLI, T.; HITZ, H. U. Energy Indicators and Savings in Water Supply. **Journal AWWA**, v. 92, p. 55-62, 2002.

POULIEZOS, A.; KANELLOS, F. D.; PAPAETHIMIOU, S.; KATSIGIANNIS, Y. A. Energy Management System for Water Distribution Systems: Application to Crete. **Trivent Publishing**, 2016.

PRIETO, A. F. G. **Geração de Energia Hidrelétrica: Estudo de alternativa sem o barramento do fio**. 2012. 151 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RAMOS, H.; BORGA, A. Pumps as turbines: An Unconventional Solution to Energy Production. **Urban Water**, v. 1, n. 3, p. 261-3, 1999.

RAMOS, H.; COVAS, D.; ARAÚJO, L. Válvulas Redutoras de Pressão e Produção de Energia. In: **Anais do 7º Congresso da Água**. LNEC, Lisboa, 2004.

RASUL, G.; SHARMA, B. The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaptation to climate change. **Climate Policy**, p. 682-702. abr. 2016.

RIBEIRO, L. C. L. J.; ANDRADE, J. G. P.; ZAMBON, A. G. Gestão de sistema de abastecimento de água através de ações para redução de perdas. **Revista Ibero-americana de Ciencias Ambientais**, Campinas, v. 8, n. 2, jan. 2017.

SANTOS, F. D. T. **Avaliação do potencial energético associado a uma válvula redutora de pressão – caso de estudo**. Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.

SILVA, L. A. da; GARCETE, M. E. H.; ASSIS, M. G. de. **Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema Piloto de Microgeração Hidroenergética da rede Abastecimento de Água de Curitiba**. 154 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Curitiba, Curitiba, 2016.

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

VENKATESH, G.; BRATTEBØ, H. Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway). **Energy**, v. 36, p. 792-800, 2011.

VIANA, A. N. C. **Bombas Funcionando como Turbinas**. Rio de Janeiro: Synergia. 192 p. 2012.

VIANA, A.N.C. **Comportamento de Bombas Centrifugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas**; Dissertação de Mestrado; EFEI; Itajubá Dezembro, 1987.

WILLIAMS, A (1995). **Pumps as Turbines – A User Guide**. Intermediate Technology Publications. Londres, 1995.

Wu, Z.Y.; Sage, P.; Turtle, D. Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136. 2009.

APÊNDICE A – CÓDIGO IMPLEMENTADO NO MATLAB PARA A OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DE BFT EM SAA.

A.1) CÓDIGO PRINCIPAL

```

%-----%
%----- UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO -----%
%----- NÚCLEO DE TECNOLOGIA -----%
%----- ENGENHARIA CIVIL -----%
%-----%
%----- TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO -----%
%-----%
%----- SABRINA DA SILVA CORRÊA -----%
%-----%

clc, close, clear all

%DADOS DE ENTRADA NECESSÁRIOS

num_tre = 13; % Usuario precisa informar a quantidade de trechos
ind_perda = 30; % indice de perdas no sistema em %
tarifa_energia = 0.1; % taria de energia euros/KWh
custo_agua = 0.3; % custo da agua tratada em euros/m³
pressao_minima = 10; % pressão minima adotada pela ABNT 10 mca

fr = fopen('rede.INP','r');
lixo = fscanf(fr,'%c',[105]);
dados = fscanf(fr,'%e',[7,num_tre]);
dados=dados'
lixo = fscanf(fr,'%c',[28]);
lixo = fscanf(fr,'%c',[43]);

maximo1 = max(dados(:,2));
maximo2 = max(dados(:,3));
max_no = max(maximo1,maximo2); % determina o numero total de nos da rede
coordenadas = fscanf(fr,'%e',[3,max_no]);
coordenadas =coordenadas'; % coordenadas dos nos da rede

% o primeiro no esta na ultima posicao tem que fazer uma troca
antigo = coordenadas(max_no,:)
for i =1:(max_no-1)

    coordenadas(max_no-i+1,:) = coordenadas(max_no-i,:);
end
coordenadas(1,:) = antigo
fclose(fr);

nome = 'Pressao00h.txt'
% Leitura do arquivo que contém as pressões
fr = fopen(nome,'r');
k = 1; % Corresponde ao primeiro arquivo

vazao = zeros(1,k);% anota a vazao de cada arquivo de tempo
pressao=zeros(max_no,8);% sao lido 8 arquivos (de 3h em 3h)

```

```

lixo = fscanf(fr, '%c', [226]);
for i = 1:(max_no-1)
    lixo = fscanf(fr, '%c', [4]);
    dados2 = fscanf(fr, '%e', [5]);
    pressao(i+1,k) = dados2(3);
end
lixo = fscanf(fr, '%c', [20]);
dados2 = fscanf(fr, '%e', [5]);
vazao(k) = abs(dados2(1));
fclose(fr);

arquivo = {'Pressao00h.txt'; 'Pressao03h.txt'; 'Pressao06h.txt';
'Pressao09h.txt'; ...
'Pressao12h.txt'; 'Pressao15h.txt'; 'Pressao18h.txt'; 'Pressao21h.txt'}

nome = 'Pressao03h.txt';
k = 2; % Corresponde ao arquivo
[pressao, vazao]=leitor_horario(nome, k, max_no, pressao, vazao);
nome = 'Pressao06h.txt';
k = 3; % Corresponde ao arquivo arquivo
[pressao, vazao]=leitor_horario(nome, k, max_no, pressao, vazao);
nome = 'Pressao09h.txt';
k = 4; % Corresponde ao arquivo arquivo
[pressao, vazao]=leitor_horario(nome, k, max_no, pressao, vazao);
nome = 'Pressao12h.txt';
k = 5; % Corresponde ao arquivo arquivo
[pressao, vazao]=leitor_horario(nome, k, max_no, pressao, vazao);
nome = 'Pressao15h.txt';
k = 6; % Corresponde ao arquivo arquivo
[pressao, vazao]=leitor_horario(nome, k, max_no, pressao, vazao);
nome = 'Pressao18h.txt';
k = 7; % Corresponde ao arquivo arquivo
[pressao, vazao]=leitor_horario(nome, k, max_no, pressao, vazao);
nome = 'Pressao21h.txt';
k = 8; % Corresponde ao arquivo arquivo
[pressao, vazao]=leitor_horario(nome, k, max_no, pressao, vazao);

vazao_max = max(vazao);

% Calculo da pressão média da rede
for no = 2:fim
    soma = 0;
    for i = 1:num_tre
        if conec (i,1) == no || conec (i,2) == no % relaciona a conectividade
dos nós com seus respectivos trechos
            trecho = dados (i,4);
            soma = soma + trecho;
        end
    end
    L(no,1) = soma/2;
end

comp_total = sum(dados(:,4));
pressao_media = zeros(1,k); % Calculo da pressão média para todos os
usuários
for j=1:k
    for i=1:max_no

```

```

    multi(i,j) = pressao(i,j)*L(i,1);
    pressao_media(1,j) = pressao_media(1,j) + multi(i,j);

    end
    pressao_media(1,j) = pressao_media(1,j)/comp_total;
end

% Calculo das perdas no sistema antes da BFT
vazao_vaz = vazao*ind_perda/100; %vazao de vazamento em L/s
volume_perda = vazao_vaz*(24/k)*3600/1000; %vetor do volume de perda de
água por dia
volume_perda = sum(volume_perda); %volume de perda de água em m³/dia

% armazenando os catálogos de bombas KSB ETA
% col1 vazão (L/s) col2 Hm (m) col3 rendimento (%) col4 limite inferior do
% tamanho da bomba col5 limite superior do tamanho da bomba col6 rotor
% (mm) col7 rpm da bomba

BOMBA=load('bombas.txt');
[linhas,lixo]=size(BOMBA);

Qpme_ot = BOMBA(1,1);
Hpme_ot = BOMBA(1,2);
rend_max_ot = BOMBA(1,3);
FO_ot = 0;
deltaV_ot = 0;
flag=1;
clc

for i=1:linhas
% Variáveis de decisão
% estimativa inicial
Qpme = BOMBA(i,1); %variável de decisão, vazão do ponto de melhor
eficiencia
Hpme = BOMBA(i,2); %variável de decisão, altura manométrica do ponto de
melhor eficiência
rend_max = BOMBA(i,3);%81.5; %variável de decisão, rendimento máxima da
bomba %
Qtb = Qpme/(rend_max/100)^(0.8); %L/s
Htb = Hpme/(rend_max/100)^(1.2); %L/s

for j=1:k
    deltaH(1,j) = Htb*(1.0283*((vazao(1,j)/Qtb)^2) -
0.5468*(vazao(1,j)/Qtb) + 0.5314); %Excesso de pressão que será convertida
em energia elétrica
    pressao_nova(1,j) = pressao_media(1,j) - deltaH(1,j); %Pressão média do
sistema após a introdução da BFT.
    vazao_vaz_novo(1,j) =
vazao_vaz(1,j)*((pressao_nova(1,j)/pressao_media(1,j))^2); %Vazao de
vazamento após a introdução da BFT
    volume_perda_novo(1,j) = vazao_vaz_novo(1,j)*24/k*3600/1000; %novo
volume de perda de água m³ por dia
end

volume_perda_novo = sum(volume_perda_novo); %novo volume de perda de água
em m³/dia
ind_perda_novo = ind_perda*volume_perda_novo/volume_perda; %novo índice de
perda %

```

```

% FUNÇÃO OBJETIVO
peso_esp_agua = 10000; % peso especifico da agua em N/m³
rend = 65; % rendimento adotado
for j=1:k
    Pot(1,j) = vazao(1,j)/1000*deltaH(1,j)*rend/100*peso_esp_agua/1000;
    %potencia(kW)em cada intervalo de tempo
    Pot(1,j) = Pot(1,j)*24/k; %potencia(kWh)em cada intervalo de tempo
end

P = sum(Pot);
deltaV = volume_perda - volume_perda_novo;

FO= (tarifa_energia*P + custo_agua*deltaV);

pressao_min_bomb=min(pressao_nova);
vazao_max = max(vazao);
vazao_max = vazao_max*1.1; % limite de vazão máxima considerando até 10%
de vazões maiores que a máxima

if FO>FO_ot && pressao_min_bomb>=pressao_minima && Qpme <= vazao_max ;
    FO_ot=FO;
    Qpme_ot = Qpme;
    Hpme_ot = Hpme;
    rend_max_ot = rend_max;
    deltaV_ot = deltaV;
    deltaH_ot = deltaH;
    flag=i;

end
end

%IMPRESSÃO DE RESULTADOS
fprintf('SELEÇÃO DE BFT PARA SAA');
fprintf('\n-----\n\n');
% imprimindo na tela a bomba escolhida
fprintf('BOMBA SELECIONADA:\n');
fprintf('TAMANHO: %.1f-%.1f\n',BOMBA(flag,4),BOMBA(flag,5));
fprintf('DIAM. ROTOR(mm): %d\n',BOMBA(flag,6));
fprintf('RPM: %d\n',BOMBA(flag,7));
fprintf('Valor da função objetivo(maximização do lucro em Euros):
%.2f\n',FO_ot);
fprintf('Redução de volume desperdiçado (m3): %.2f\n',deltaV_ot);
fprintf('Potência da BFT (kW): %.2f\n',P);
fprintf('-----\n\n');
% curva de perda de carga BFT
vazao;
deltaH_ot;

for i = 1:k-1
    for j = 1:k-i
        if vazao(j)>vazao(j+1) %verdadeiro quando rpeciso trocar
            bolha = vazao(j);
            vazao(j)=vazao(j+1);
            vazao(j+1)=bolha;
            bolha = deltaH_ot(j);
            deltaH_ot(j) = deltaH_ot(j+1);
            deltaH_ot(j+1) = bolha;
        end
    end
end
end

```

```

end
%escrevendo no arquivo.CRV a curva de eprda de carga para ser lida pelo
%EPANET
fw = fopen('curva_perda_01.CRV','wt');

fprintf(fw,'Curva de Dados do EPANET\n');
fprintf(fw,'PERDAS\n');
fprintf(fw,'Curva BFT\n');
for i = 1:k
    fprintf(fw,'%f %f\n',vazao(i),deltaH_ot(i));
end

fclose(fw);

```

A.2) FUNÇÃO AUXILIAR

```

function[pressao,vazao]=leitor_horario(nome,k,maximo,pressao,vazao)

fr = fopen(nome,'r');
lixo = fscanf(fr,'%c',[227]);

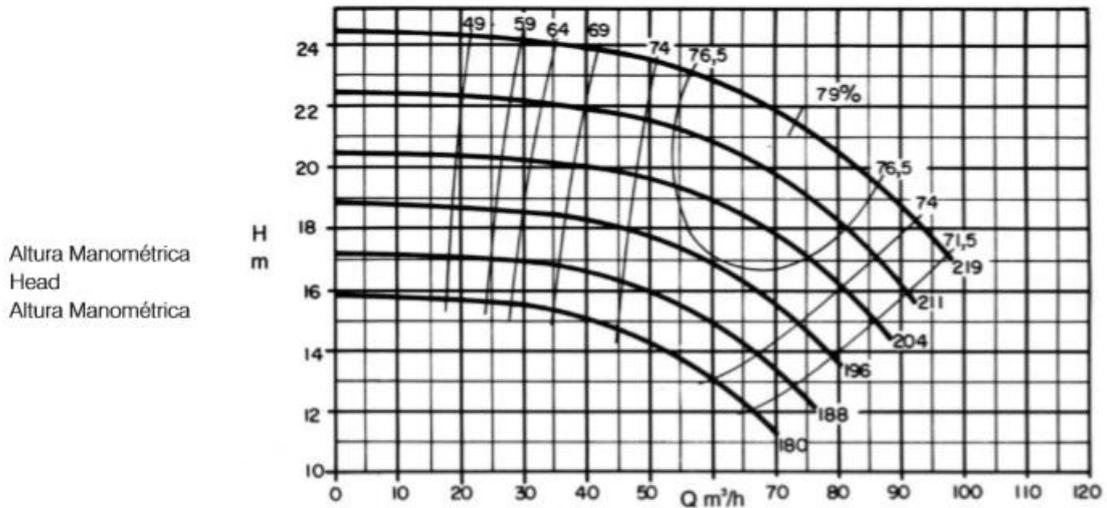
for i = 1:(maximo-1)
    lixo = fscanf(fr,'%c',[4]);
    dados2 = fscanf(fr,'%e',[5]);
    pressao(i+1,k) = dados2(3);
end
lixo = fscanf(fr,'%c',[20]);
dados2 = fscanf(fr,'%e',[5]);
vazao(k) = abs(dados2(1));
fclose(fr);

end

```

ANEXO A – CATÁLOGOS DE BOMBAS KSB

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V	Tamanho Size Tamaño	65-200	
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	1750 rpm	



Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V	Tamanho Size Tamaño	80-200	
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	1750 rpm	

