



**UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI**  
**Bacharelado em Engenharia Hídrica**

**Lucas Eduardo Freitas Xavier**

**BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA: uma alternativa de geração de energia  
para o sistema de abastecimento de água em Teófilo Otoni (MG)**

**TEÓFILO OTONI**

**2019**



**Lucas Eduardo Freitas Xavier**

**BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA: uma alternativa de geração de energia  
para o sistema de abastecimento de água em Teófilo Otoni (MG)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Hídrica da Universidade  
Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
(UFVJM), como parte dos requisitos exigidos para a  
conclusão do curso.

Orientador: Prof. Dr. Francisco César Dalmo

**TEÓFILO OTONI**

**2019**



**Lucas Eduardo Freitas Xavier**

**BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA: uma alternativa de geração de energia  
para o sistema de abastecimento de água em Teófilo Otoni (MG)**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia  
Hídrica da Universidade Federal dos Vales do  
Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, como pré-  
requisito para obtenção do título de bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Francisco César Dalmo

Data de aprovação \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Francisco César Dalmo  
Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM

---

Prof. Msc. Alcino de Oliveira Costa Neto  
Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM

---

Prof. Dr. Luan Brioschi Giovanelli  
Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM

---

Eng. Eder Portella Loyola  
Engenheiro - COPASA

**TEÓFILO OTONI**

**2019**



*“You'll never walk alone”*

*“Você nunca caminhará sozinho”*

*(Richard Rodgers e Oscar Hammerstein II)*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que em sua infinita bondade me sustentou e me capacitou para chegar até aqui, sem Ele nada disso seria possível. À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), pelo corpo docente, administração e direção que sempre fizeram um excelente trabalho contribuindo diretamente para minha formação pessoal e profissional. Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco César Dalmo pelo acompanhamento, incentivo e conhecimento transmitido, este trabalho também pertence a ele que nunca mediu esforços para me auxiliar. A minha querida mãe Claudiane, a minha namorada Thamara, família e amigos pelo aconchego, em especial aos amigos da Turma da Madrugada (João Victor, Luiz, Arthur e João Pedro) por toda amizade. Obrigado por sempre estarem ao meu lado e entenderem minhas ausências. E a todos que contribuíram para eu chegar até aqui, o meu muito obrigado.



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo fazer um estudo preliminar para estimar a geração de energia elétrica a partir da implantação de uma bomba funcionando como turbina (BFT) no sistema de abastecimento de água da cidade de Teófilo Otoni e avaliar sua viabilidade técnica. No estudo, foram utilizadas informações do novo projeto de ampliação do sistema de abastecimento de água (SAA) adotado pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). Primeiramente definiu-se o local para implantação da BFT a partir das características topográficas e de vazão aduzida pela COPASA. Na sequência, foi utilizado um método para seleção da BFT e cálculo de geração de energia elétrica. Na última etapa estimou-se a quantidade gerada de energia elétrica pela BFT cujo valor foi comparado com o consumo de energia elétrica do sistema de boosters e com o consumo de energia elétrica total do SAA. Diante dos resultados, constatou-se que a quantidade de energia elétrica gerada pela BFT supre toda a demanda dos boosters. Verificou-se ainda que se a energia oriunda da BFT for abatida da demanda total do SAA, a economia da COPASA seria de aproximadamente 55,45%. Por fim, o presente estudo indicou uma redução no consumo e na conta de energia elétrica para o sistema analisado, e em estudos futuros, indica-se a análise das perdas de carga no sistema para aprimorar os resultados.

**Palavras Chave:** Bombas funcionando como turbina, geração de energia, microgeração.



## ABSTRACT

This work has as objective to make a preliminary study to estimate the power generation from the implantation of a pump working as a turbine (BFT) in the water supply system of Teófilo Otoni city and to evaluate its viability. In the study, was used informations from the new project to expand the water supply system (SAA) adopted by the Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). Firstly, was defined the place for implantation of the BFT from the topographic and adduced flow characteristics by COPASA. In the sequence, was used a method to select the BFT and its power generation. In the last step, the amount of energy generated by the BFT was estimated, the value of which was compared to the energy expenditure of the boosters system and to the total energy expenditure SAA. In view of the results, it was verified that the amount of energy generated by BFT suppresses all the demand of boosters. It was also verified that if BFT's energy is discounted from the total demand of the SAA, the COPASA's economy would be approximately 55.9%. Finally, the present study indicated a reduction in the consumption and in the energy account for the analyzed system, and in future studies, it is indicated the analysis of the losses of load in the system to improve the results.

**Keywords:** Pumps working as a turbine; power generation; microgeneration.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Usina de Marmelos .....	21
Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira por Fonte (%).....	22
Figura 3 – Geração Hidrelétrica Brasileira (%).....	23
Figura 4 – Croqui de um Sistema de Abastecimento de Água.....	25
Figura 5 – Bomba Funcionando como Bomba - BFB .....	29
Figura 6 – Bomba Funcionando como Turbina – BFT .....	29
Figura 7 – Distribuição dos custos de investimentos para centrais de pequeno e grande porte .....	30
Figura 8 – Índice de Consumo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água (kWh.m <sup>-3</sup> ) em função do tempo.....	32
Figura 9 – Croqui das Características dos trechos da Adutora de Água Bruta Todos os Santos – Teófilo Otoni/ MG.....	36
Figura 10 – Pré-seleção da BFT .....	38
Figura 11 – Relação entre rotação específica da bomba funcionando como turbina e bomba.....	39
Figura 12 – Máximo rendimento da bomba em função de sua rotação específica e vazão nominal.....	40
Figura 13 – Coeficientes de Altura.....	41
Figura 14 – Coeficientes de Vazão.....	41
Figura 15 – Curva característica da bomba KSB-MEGANORM 250-500.....	44



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de Energia Elétrica do Sistema de Abastecimento de Água da Cidade de Teófilo Otoni – 2008-2018.....	46
Tabela 2 – Tarifa de Consumo de Energia fornecida pela Cemig no setor Demais Classes - 2019 .....	47
Tabela 3 – Parâmetros da seleção da BFT selecionada no catálogo de bombas .....	48
Tabela 4 – Quantidade de energia consumida pelos boosters no projeto de ampliação do SAA feito pela COPASA em Teófilo Otoni MG – 2012 .....	48
Tabela 5 – Consumo e produção de energia anual .....	49
Tabela 6 – Consumo e produção de energia mensal .....	49
Tabela 7 – Consumo e produção de energia diário .....	49
Tabela 8 – Economia da COPASA considerando o abatimento do consumo dos Boosters pela BFT .....	50
Tabela 9 – Economia média anual com a implantação da BFT de maneira completa .....	50



## LISTA DE SIGLAS

AAB	Adutora de Água Bruta
BFT	Bomba funcionando como turbina
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
UHE	Usina Hidrelétrica



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
2.1	Microgeração de Energia no Brasil .....	21
2.2	Sistema de Abastecimento de Água .....	25
2.2.1	<i>Captação</i> .....	25
2.2.2	<i>Estação de Tratamento</i> .....	26
2.2.3	<i>Estação Elevatória</i> .....	26
2.2.4	<i>Reservatórios</i> .....	26
2.2.5	<i>Adutoras</i> .....	27
2.2.6	<i>Redes de Distribuição</i> .....	27
2.3	Bombas Funcionando como Turbinas .....	27
2.3.1	<i>Histórico</i> .....	27
2.3.3	<i>Método de Seleção de BFTs</i> .....	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>35</b>
3.1	Descrição do Local .....	35
3.1.1	<i>Método de Seleção proposto por Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992)</i> .....	37
3.1.1.1	<i>Passo 1</i> .....	37
3.1.1.2	<i>Passo 2</i> .....	38
3.1.1.3	<i>Passo 3</i> .....	39
3.1.1.4	<i>Passo 4</i> .....	40
3.1.1.5	<i>Passo 5</i> .....	40
3.1.1.6	<i>Passos 6</i> .....	41
3.1.1.7	<i>Passo 7</i> .....	42
3.1.1.8	<i>Passo 8</i> .....	42
3.1.1.9	<i>Passo 9</i> .....	43
3.1.1.10	<i>Passo 10</i> .....	43
3.1.1.11	<i>Passo 11</i> .....	44
3.1.2	<i>Cálculo de Energia dos Boosters</i> .....	45
3.1.3	<i>Cálculo de Energia de todo SAA da Cidade de Teófilo Otoni</i> .....	46
3.1.4	<i>Tarifa da CEMIG</i> .....	46

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia sempre foi um elemento essencial na vida e no desenvolvimento da sociedade. O setor energético passou a procurar novas formas de geração de energia devido às questões ambientais e econômicas. Uma das opções encontrada, foi implementar uma geração de energia em pequena quantidade, próxima ao local de consumo. Esse tipo de produção de energia é conhecido como microgeração. Essa tecnologia, baseada em uma fonte renovável e tecnicamente dominada sofre entraves de ordem técnica, econômica e regulatória, principalmente, em função do seu alto custo inicial de implantação, considerado alto em relação a outras fontes de geração de energia.

Todavia, a microgeração pode trazer grandes benefícios a vários setores da economia, desde que essa energia gerada seja consumida localmente e devolvida de certa forma para o bem da população. O que melhor impulsiona os benefícios é quando a fonte de energia está sendo desperdiçada e não utilizada no processo. Para o caso do sistema de abastecimento público de água, essa perda é fruto do controle de pressão nas tubulações, seja elas por válvulas redutoras de pressão ou por reservatórios.

Devido a existência de componentes essenciais locais (tubulações, válvulas e câmara de carga), os custos para a geração de energia hidroelétrica em um sistema de abastecimento são reduzidos. Entretanto, os custos de equipamentos de geração, que são o conjunto turbina e gerador se tornam inviáveis devido a uma baixa potência disponível, geralmente, encontrada nesses locais. Além disso, de acordo com Singh (2005), as turbinas convencionais, normalmente utilizadas em microssistemas de geração hidroelétrica, são fabricadas de maneira específica de acordo com cada projeto. Isso faz com que apresentem um custo elevado diante do custo total do sistema, principalmente, no caso de microssistemas com menos de 20kW de potência instalada.

Contudo, conforme os estudos de Viana (1987), é viável a utilização de bombas funcionando como turbina (BFT) como uma alternativa de geração hidrelétrica frente ao sistema de turbinas e geradores convencionais. Os estudos de BFT podem ser uma opção para o incremento de energia gerada pelas concessionárias de energia elétrica ou para uso de autoprodutores, pequenas comunidades e empreendimentos.

Preende-se, com esse trabalho, analisar a utilização das BFTs para geração de energia hidroelétrica em uma situação real. Para tanto, será utilizado um método de seleção de BFT desenvolvido por Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992), em que serão utilizadas as características do sistema de abastecimento de água da cidade de Teófilo Otoni (MG) sem

prejudicá-lo.

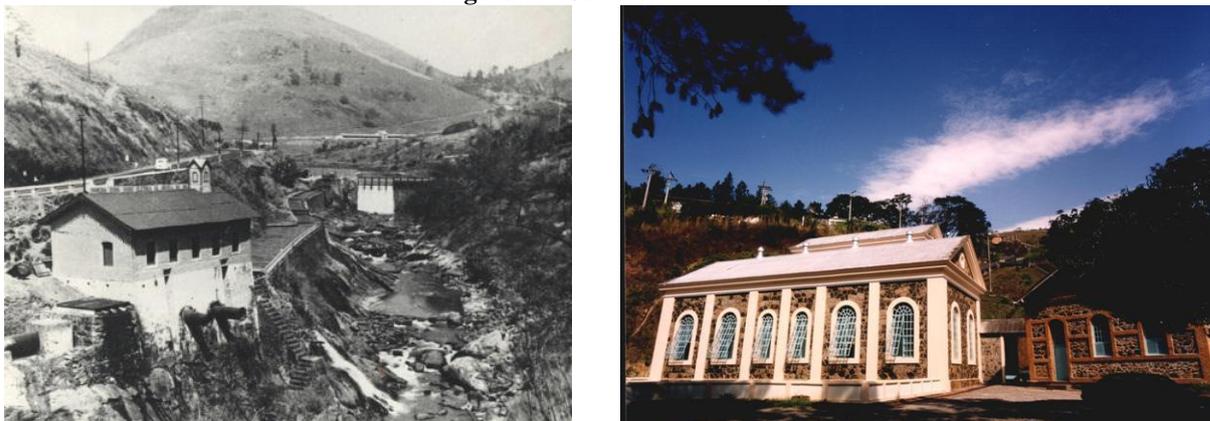
Os objetivos do presente trabalho é estimar a geração de energia elétrica através de uma bomba funcionando como turbina na modernização e ampliação do novo sistema de abastecimento de água feito pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) na cidade de Teófilo Otoni, utilizando o método desenvolvido por Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992) e avaliar a viabilidade técnica de sua implantação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Microgeração de Energia no Brasil

No Brasil existe uma quantidade enorme de recursos naturais, destacando-se os recursos hídricos. Por conter grandes rios, aliados a antigos governos, tornou-se o Brasil, impulsionado devido suas características uma das maiores matrizes elétricas no setor de energias renováveis do planeta, por meio da geração de energia hidroelétrica. A título de curiosidade, a primeira central hidrelétrica brasileira foi instalada em 1883, em um afluente do rio Jequitinhonha, município de Diamantina – MG (HISTÓRIA, 2003), e em 1889, era inaugurada em Juiz de Fora a Usina de Marmelos (Figura 1), sendo considerada o grande marco da hidroeletricidade brasileira que a partir daí, vários outros empreendimentos do setor elétrico foram surgindo e evoluindo até os dias atuais.

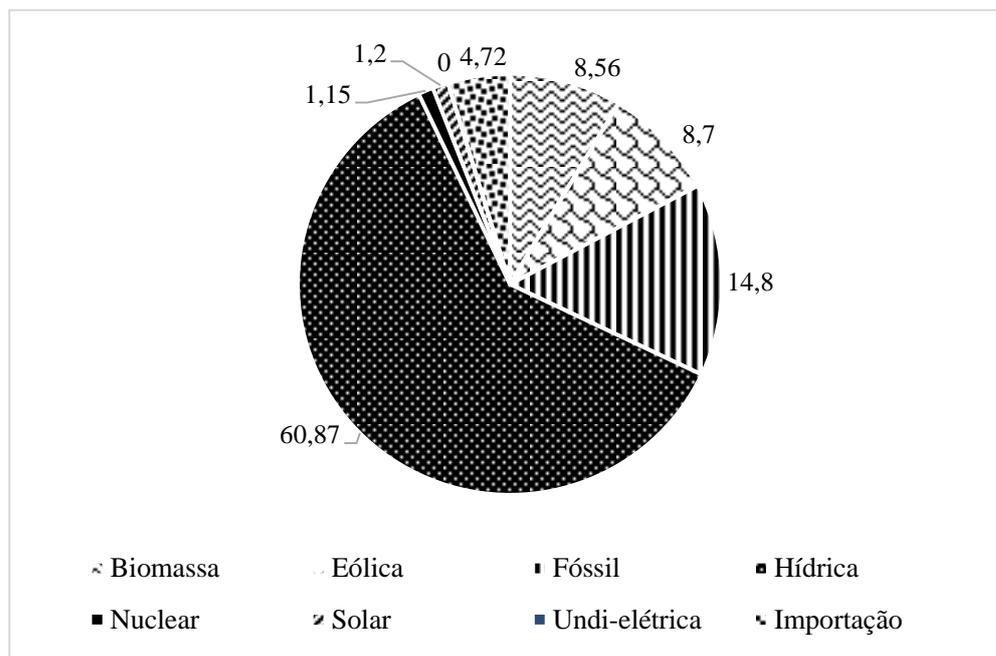
**Figura 1 – Usina de Marmelos**



Fonte: cemig.com.br.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANNEE, 2019), o Brasil possui atualmente um total de 7.451 empreendimentos em operação, totalizando 165.466.941 kW de potência instalada. Está previsto para os próximos anos uma adição de 84.286.220 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 205 empreendimentos atualmente em construção e mais 371 em empreendimentos com construção ainda não iniciada. A Figura 2 apresenta a seguinte distribuição entre as fontes de energia empregadas no Brasil segundo a ANNEE (2019).

**Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira por Fonte (%)**



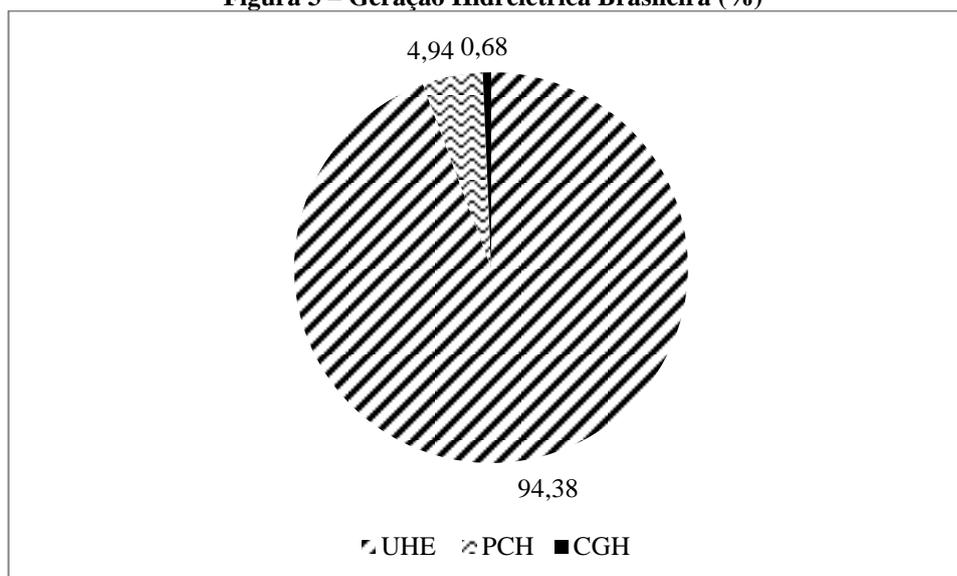
Fonte: ANNEL, 2019.

A forma com que o Brasil trata a hidroeletricidade vem sofrendo algumas mudanças, porém a intensidade de sua utilização continua a mesma. Apesar dos grandes projetos de usinas realizados no Brasil, os grandes empreendimentos vêm dando espaço para as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). A principal explicação para essa tendência é devido aos impactos ambientais causados pelos grandes reservatórios frente as PCHs. Dentro das classificações, são consideradas PCHs as usinas cuja a potência instalada se encontra na faixa de 5.000 a 30.000 kW (BRASIL, 2016).

Em termos de pequena geração de energia que são menores que as PCHs, existem as minicentraís, com potência instalada entre 100 e 5.000 kW e as microcentrais (MCHs), com capacidade inferior a 100 kW (BRASIL, 2016).

Na Figura 3 é apresentada a composição do parque hidrelétrico brasileiro, de acordo com os tipos de centrais.

**Figura 3 – Geração Hidrelétrica Brasileira (%)**



Fonte: ANNEL, 2019.

As PCHs (4,94%), sem dúvidas não geram a grande parte da energia hidrelétrica brasileira, porém a perspectiva de que esses números cresçam é alta devido às vantagens desses sistemas de geração não causarem grandes impactos ambientais. No caso das CGHs (Centrais Geradoras Hidrelétricas), um dos problemas para a sua disseminação é o seu custo inicial de instalação. Entretanto, quando se avalia o ciclo de vida de uma central hidrelétrica, o investimento inicial é suprimido por várias vantagens, tanto de ordem econômica como ambiental.

Além disso, outro problema de sua expansão é a legislação do setor elétrico brasileiro, que dificulta a comercialização de energia gerada em centrais com capacidade inferior a 1 MW, tornando esse empreendimento pouco atrativo para as empresas privadas.

Conforme Lima (2013), o desenvolvimento do setor elétrico em sua maior parte decorre da produção de energia nas grandes usinas, sejam elas hidrelétricas, eólicas ou térmicas. A energia passa por linhas de transmissão que podem atingir longas distâncias até chegar aos centros de carga, nos quais a energia irá ser distribuída para as residências, comércios e indústrias. Segundo Walter *et al.* (2000) este modelo tem sido adotado devido aos seguintes fatores:

- Redução dos custos de unidades de capital através da economia;
- Redução dos impactos e riscos próximos aos centros de maior densidade demográfica;
- Influência dos grandes empreendedores do setor elétrico;
- Confiabilidade nos sistemas de transmissão em alta tensão.

O modelo de microgeração é discutido devido a questões técnicas e ambientais. Ademais, o desenvolvimento econômico juntamente com o crescimento populacional exige uma demanda por energia cada vez maior, com isso, a implantação de novas usinas. Nesse contexto surge a geração distribuída. Não existe um consenso quanto à potência nem as fontes de energia incluídas na geração distribuída, mas grande parte das definições estabelecem que as unidades geradoras sejam de porte pequeno e que estejam próximas ao centro de carga (INEE, 2012). Assim, a produção de energia final passa a ser realizada por consumidores finais, podendo ou não serem ligadas na rede.

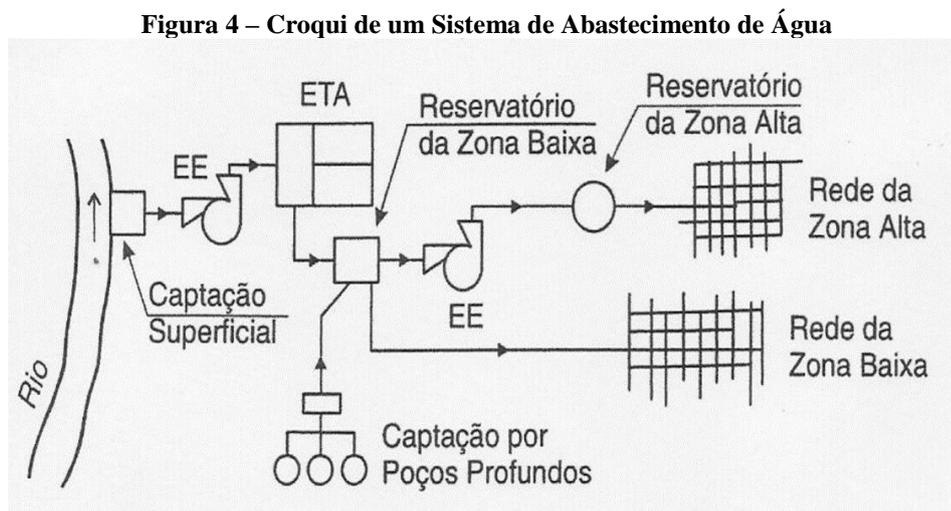
Todavia, são necessários incentivos financeiros para que o investimento na microgeração apresente viabilidade econômica, estimulando o investimento nessas tecnologias. Os principais exemplos de geração distribuída estão relacionados com os painéis fotovoltaicos, que convertem energia solar em energia elétrica. Diversos países criaram políticas de incentivo para que os consumidores pudessem instalar painéis em suas casas. Entre os destaques estão países como Alemanha, Espanha e Portugal.

Apesar de tudo, os maiores benefícios da microgeração são aqueles em que é possível a recuperação de energia de um determinado processo. Em muitos casos esta recuperação é feita devido ao excesso de pressão, como em sistemas de resfriamento (BANSAL e MARSHALL, 2010), sistemas de tratamento de água através de osmose reversa (SUN *et al.*, 2008; E AL-ZAHRANI *et al.*, 2012) e sistemas de abastecimento de água com captações por gravidade ou VRP (Válvulas Redutoras de Pressão) (RAMOS *et al.*, 2010), ou pela recuperação de calor (STERNLICHT, 1982). Esses casos são mais específicos e encontrados em indústrias, e por isso não estão presentes em grande quantidade como os painéis fotovoltaicos e as microturbinas eólicas e nem são alvo de programas de incentivo.

Segundo Lima (2013), em abril de 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através da resolução 482, estabeleceu as condições gerais de acesso de micro e minigeradores aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Além disso, devido aos prazos estabelecidos para aprovação das concessionárias em 2013, as primeiras micros e minicentrals já se beneficiam do sistema de compensação, ou seja, há em que se justificar um estudo de microgeração em sistemas de abastecimento, casando adequadamente com a geração distribuída.

## 2.2 Sistema de Abastecimento de Água

De acordo com Gomes (2009), um sistema de abastecimento de água é composto por equipamentos, obras e serviços capazes de atender, em quantidade e qualidade suficientes, às necessidades domésticas, industriais e públicas. Normalmente, os sistemas de abastecimento de água possuem sete unidades básicas: captação, estação de tratamento (ETA), estação elevatória (EE), reservatórios, adutoras e rede de distribuição, conforme Figura 4.



Fonte: TSUTIYA, 2006.

### 2.2.1 Captação

De acordo com Netto e Fernández (2018), a captação de água bruta é feita pelos mananciais naturais de água, e esses mananciais podem ser classificados em dois grandes grupos, que pode ser tanto superficial (córregos, rios, lagos, represas) ou subterrânea (fontes, bicas d'água, etc). A água desses mananciais deverá preencher requisitos mínimos no que tange a qualidade das mesmas no ponto de vista físico, químico, biológico e bacteriológico, assim no que se diz respeito aos aspectos quantitativos: se o manancial é capaz de suprir a comunidade por um período considerado razoável do ponto de vista técnico e econômico.

### ***2.2.2 Estação de Tratamento***

A água sem tratamento pode causar problemas a saúde humana. Como nem toda a água presente na natureza está em condições para consumo imediato, a água deverá passar por um tratamento até que se encontre em condições de consumo e seja classificada como água potável. As estações de tratamento são os locais nos quais a água bruta captada torna-se perfeitamente em condições de consumo devido à melhoria de suas características físicas, químicas e organolépticas (LIMA, 2013).

### ***2.2.3 Estação Elevatória***

A estação elevatória é responsável por fazer o recalque ou o bombeamento da água. É comum em sistemas de abastecimento também encontrar elevatórias tipo booster, que se destinam a aumentar a pressão de redes de distribuição (ALBUQUERQUE, 2007). A aplicação de elevatória do tipo booster ocorre, principalmente, quando as tubulações que já estão desgastadas devido ao tempo, aumentam a rugosidade, ou simplesmente quando se necessita bombear uma maior vazão entre as áreas de consumo.

### ***2.2.4 Reservatórios***

Os reservatórios têm função de armazenar a água e garantir a pressão nas canalizações, como também regularizar a vazão, ou seja, se manter como um local que fornece segurança ao abastecimento. Os reservatórios atendem variações de consumo e horário, ou seja, ele é usado também para garantir que o horário de maior demanda não ocorra a falta de água.

Os reservatórios podem ser classificados como de zona alta se estiverem topograficamente a montante das estações elevatórias, ou seja, essas zonas precisam de conjuntos motobombas para distribuição do abastecimento. Já os reservatórios de zona baixa estão a jusante das estações elevatórias e estes reservatórios são abastecidos geralmente apenas pela gravidade (LIMA, 2013).

### **2.2.5 Adutoras**

Segundo Netto e Fernández (2018), adutoras são canalizações principais destinadas a conduzir água entre as unidades de um sistema público de abastecimento que antecedem a rede de distribuição. Elas interligam a captação e tomada de água à estação de tratamento de água, e esta aos reservatórios de um mesmo sistema.

### **2.2.6 Redes de Distribuição**

A rede de distribuição é a fase final de um sistema de abastecimento de água, na qual se procede o fornecimento de água potável a toda população. A distribuição é realizada por intermédio de regras da rede, que devem ser dimensionadas dentro dos padrões (caudal, pressão e diâmetro) de modo a permitir o fornecimento de água às instalações dos edifícios (prédios, moradias, escolas, hospitais, etc) em excelente quantidade, pressão adequada e qualidade desejável. Assim como em muitos outros sistemas, a rede de distribuição deve aplicar critérios de decisão e medidas preventivas, para que preservem toda a qualidade da água conferidas na fase do tratamento (LIMA, 2013).

## **2.3 Bombas Funcionando como Turbinas**

### **2.3.1 Histórico**

Nos últimos 70 anos a utilização de bombas funcionando como turbinas tem sido alvo de pesquisas. De acordo com Alves (2010) tudo começou quando engenheiros alemães acidentalmente descobriram que bombas operavam eficientemente como turbinas num dado momento em que tentavam levantar as características de operação de bombas.

A partir daí, entre os anos 50 e 60, começou-se a desenvolver o conceito de usinas reversíveis nos países desenvolvidos. Neste meio, as BFTs encontraram uma de suas importantes aplicações que sustentaram suas pesquisas por um certo tempo. Entretanto, as capacidades das poucas unidades eram da ordem de 50 kW a 100 kW.

Seguindo os estudos de Alves (2010), nos anos seguintes as BFTs foram muito aplicadas nas indústrias químicas e já não estavam apenas sendo utilizadas para reduzir pressões, mas também em alguns casos para recuperar energia durante o processo. Em redes

de distribuição de água, aplicações semelhantes foram encontradas na época para essa tecnologia.

A partir disso, os fabricantes de bombas passaram a se interessar por sua aplicação como turbinas. Devido ao trabalho árduo e oneroso de testar todas as bombas na sua operação como turbina, fabricantes e pesquisadores trabalharam na tentativa de caracterizar o comportamento da BFT baseando em suas características funcionando como bomba. Muitas dessas técnicas foram publicadas.

Entre os primeiros que contribuíram estão Stepanoff (1957) e Kittredge (1961). Mais tarde, outras técnicas surgiram com Gopalakrishnan (1986), Sharma (1985), Schmiedl (1988), Grover (1984), Williams (1995) e Alatorre-Frenk (1994).

Existe uma incerteza associada às metodologias de caracterização de comportamento de BFTs, apesar disso, elas serviram de ponta pé inicial para disseminação da tecnologia.

Os primeiros estudos sobre BFTs no Brasil foram desenvolvidos por Viana (1987), na então Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), conhecida atualmente como Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

### ***2.3.2 Funcionamento e Características das BFTs***

Para Alves (2010), pequenas e microcentrais são áreas atrativas para a aplicação de BFTs porque elas substituem as turbinas que possuem um preço muito elevado. Geralmente tratam-se de sistemas de energia elétrica descentralizados, isolados da rede elétrica convencional, e com características inferiores a 100 kW.

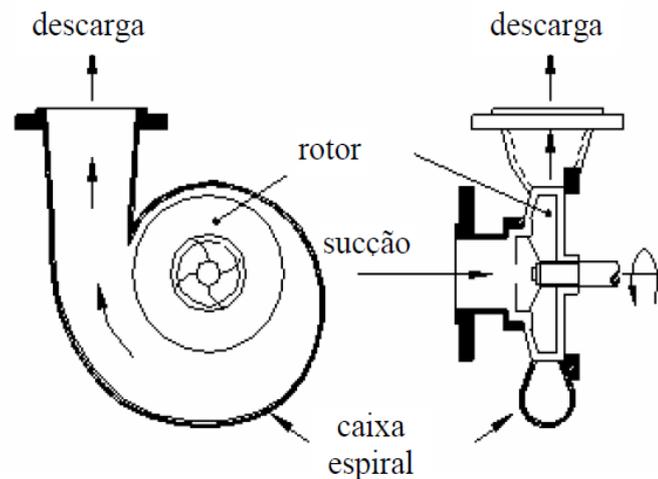
Devido ao enorme mercado de bombas, elas se tornam uma alternativa facilmente encontrada mais barata e confiável, principalmente em se tratando de manutenção, onde apresentam muitas vantagens em relação às turbinas que são fabricadas por encomenda.

Alguns estudos realizados, como os de Balarim *et al.* (2004) e Lopes (2003), indicam que a bomba hidráulica funcionando como turbina é economicamente viável para aplicações em sistemas de pequeno porte, limitados a um patamar em torno de 150 kW de potência.

Segundo Viana (1987), quando os processos construtivos e hidráulicos de bombas e turbinas são analisados, percebe-se que estes equipamentos são bastante semelhantes, desempenhando, porém, processos opostos, ou seja, bombas são máquinas geratrizes, que convertem a energia mecânica (do eixo), fornecida pelo motor, primeiramente em energia

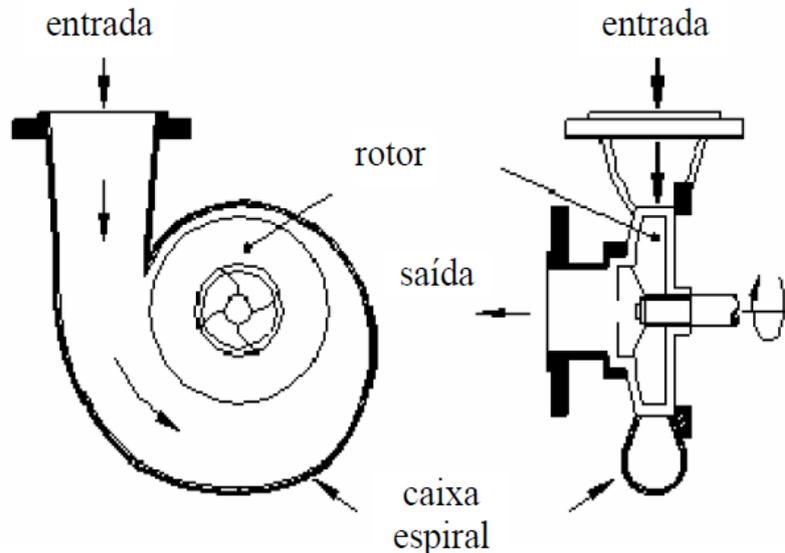
cinética (de velocidade) e, finalmente, em energia de pressão. Já uma turbina realiza o processo oposto, convertendo a energia hidráulica disponível em potência de eixo, sendo considerada uma máquina motriz. O mesmo acontece quando a comparação é feita entre máquinas elétricas motoras e geradoras. Para que a bomba opere como turbina é necessário que se inverta o sentido do fluxo do fluido, cuja consequência é a inversão da rotação do rotor, como pode ser visto nas Figuras 5 e 6.

**Figura 5 – Bomba Funcionando como Bomba - BFB**



Fonte: VIANA, 1987.

**Figura 6 – Bomba Funcionando como Turbina – BFT**

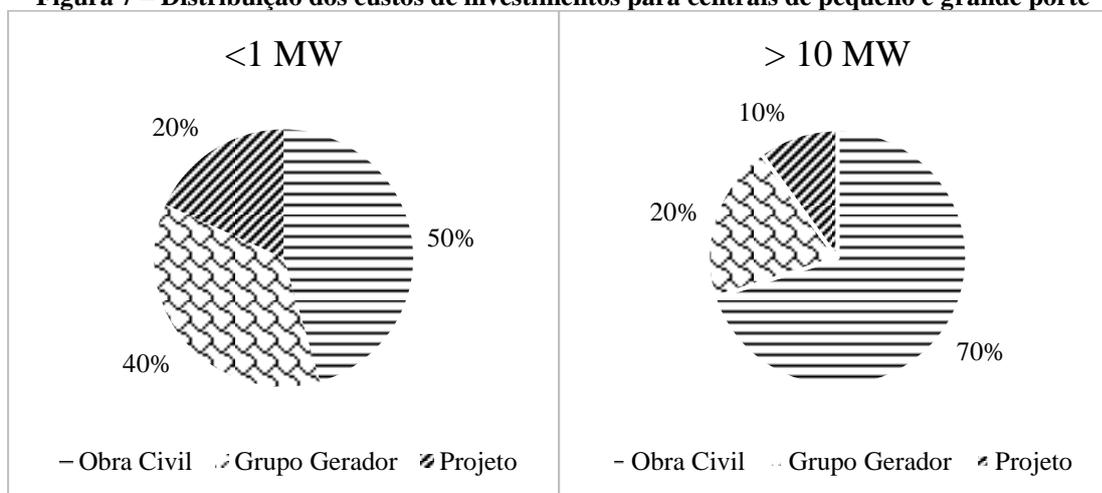


Fonte: VIANA, 1987.

No entanto, para que o rendimento da bomba operando como turbina, seja igual àquele da bomba operando como bomba, é necessário que a diferença de nível e a vazão da BFT sejam maiores que as da BFB, para a mesma rotação (VIANA, 1987). Estes aumentos são necessários para se compensar as perdas internas da máquina, devido a inversão do fluxo. O efeito disso é o aumento da potência de eixo quando a bomba estiver trabalhando como turbina, por tanto, deve-se verificar a tensão a que o material do eixo vai ser submetido.

De acordo com Ricardo (2007), a grande vantagem da utilização de bombas funcionando como turbina é seu custo reduzido, que é de duas a três vezes inferior aos custos de uma turbina convencional, já que são produzidas em série devido à sua ampla utilização em diversos setores, como saneamento e irrigação. Devido a isso, países como Estados Unidos, Alemanha e França vêm utilizando bombas e motores para gerar energia elétrica em pequenos aproveitamentos (VIANA *et al.*, 2004). De acordo com Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992), nestes casos o investimento com o grupo gerador é muito mais relevante para a viabilidade do projeto, podendo chegar a 40 % do investimento total, conforme a Figura 7.

**Figura 7 – Distribuição dos custos de investimentos para centrais de pequeno e grande porte**



Fonte: CHAPALLAZ, EICHENBERGER E FISCHER, 1992.

Willians (2003) ressalta outras grandes vantagens de se utilizar BFTs para geração de energia:

- Maior disponibilidade de encontrar peças de reposição;
- São simples e robustas;
- Possuem uma ampla faixa de operação, podendo ser aplicadas a diferentes tipos de aproveitamentos;
- Rapidez no fornecimento do equipamento devido ao grande mercado de Bombas Hidráulicas; e

- Instalação mais simples de ser realizada.

A bomba e o motor podem ser adquiridos em conjunto, diretamente acopladas, reduzindo as perdas na transmissão de potência através de correias, por exemplo.

Contudo, diferente das turbinas convencionais, as bombas não possuem um dispositivo para controle da vazão para que a rotação se mantenha constante, mesmo que haja variação de demanda. Assim, faz-se necessário que a BFT opere com vazão e diferença de nível constantes. Segundo Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992), ainda são levantadas as seguintes questões:

- O rotor da bomba é feito para que a energia cinética seja convertida em energia de pressão, ou seja, as pás do rotor são feitas para que haja um aumento gradual da seção do escoamento. Quando o fluxo é invertido ocorrem choques nas pás do rotor, que causam maiores perdas, reduzindo a altura disponível;
- As BFTs estão mais propensas a sofrerem com a cavitação, e por isso o tubo de sucção deve ser bem dimensionado tomando o devido cuidado; e
- Quando a operação ocorre abaixo de seu ponto ideal de funcionamento, há uma rápida queda em seu rendimento.

### ***2.3.3 Método de Seleção de BFTs***

Segundo Lima (2013) vários estudos já foram realizados para que a seleção da BFT seja feita da melhor maneira. Entre esses estudos, os trabalhos feitos por Stepanoff (1957) e McClaskey e Lundquist (1976), propõem uma relação da vazão e diferença de nível com o rendimento da bomba. Porém, testes realizados apontam que há uma grande diferença para o procedimento de seleção de BFTs. Yedidiah (1983) propôs um método baseado na geometria da bomba, entretanto, devido a grande quantidade de parâmetros presentes e toda dificuldade de obtê-los, ele se tornou inconveniente. Para os estudos de Lima (2013) os melhores métodos são aqueles baseados na rotação específica da bomba, nos quais se considera que uma bomba com a mesma rotação específica irá funcionar em condições de vazão e diferença de nível similares ao da turbina.

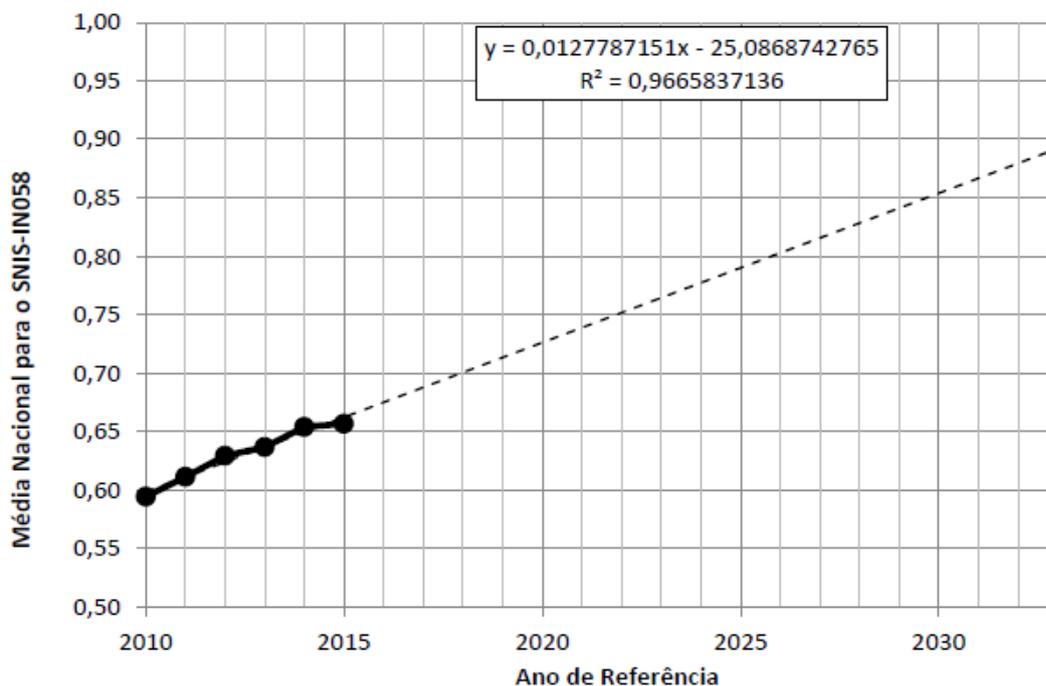
Os trabalhos que se destacaram utilizando-se estes métodos de seleção foram os de Kittredge (1963), Diederich (1967), Buse (1981), Lewinski-Kesslitz (1987) e Viana (1987). Contudo, devido a grande quantidade de testes realizados e os diferentes tipos de bombas realizadas, o método proposto por Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992) é o que fornece melhores resultados de acordo com Lima (2013).

## 2.4 Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água

As despesas com energia elétrica representam uma importante despesa operacional das empresas prestadoras dos serviços de abastecimento e saneamento básico. Devido a isso, as práticas de conservação e racionalização de energia são apontadas como fundamentais para a sustentabilidade financeira dessas empresas.

De acordo com a Secretaria Nacional de Saneamento (SNS, 2016), as despesas de energia elétrica das empresas prestadoras de serviços de água e esgoto atingiram 5,42 bilhões de reais em 2016, tendo sido consumidos 11,8 TWh (Tera Watts hora = 109 kWh). Ainda segundo o SNS (2016), o Índice de Consumo Específico de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água (INO58) apresenta tendência de crescimento, indicando custos cada vez maiores na prestação dos serviços. A Figura 8 apresenta o (INO58) e sua tendência para o custo em função do tempo.

**Figura 8 – Índice de Consumo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água (kWh.m<sup>-3</sup>) em função do tempo**



Fonte: SNS, 2016.

Na Figura 8 pode se observar que se a tendência se mantiver, em 2034, o índice alcançará valores superiores a 0,9 kWh.m<sup>-3</sup>, o que representa um aumento de 52,5% em relação aos valores registrados em 2010.

O problema das despesas de energia elétrica no saneamento brasileiro é desafiador, tendo-se observado um constante aumento no uso de energia.

Segundo Gama e Silva (2018), a eficiência energética tem como princípio a utilização da menor quantidade de energia elétrica necessária para a execução de uma determinada atividade, entretanto, sem interferir nos resultados que se esperam dessa atividade. A economia sobre a energia deve-se a adoção de práticas eficientes que permitem ganhos não só para o prestador de serviços como também para a sociedade, levando em consideração futuros investimentos em novas fontes de água, energia e a redução dos impactos ambientais.

De acordo com Tsutiya (2006), existem quatro áreas de oportunidade para melhoria da eficiência energética em SAA (Sistemas de Abastecimento de Água).

- 1- O uso racional de água no consumidor da região para reduzir também o consumo energético;
- 2- A configuração e operação do sistema relacionado com seus sistemas de produção (captação, tratamento e configuração de distribuição) e à estrutura (uso de válvulas redutoras de pressão, atrito gerado por materiais da tubulação, etc);
- 3- A otimização da eficiência eletromecânica de bombas e motores; e
- 4- A redução de perdas de água na distribuição, que exigirá do sistema que se bombeie menos vazão para um mesmo volume de consumo autorizado.

Para agregar ainda mais na eficiência energética, deve-se ter impulsos de programas contínuos de capacitação de profissionais do setor no que se refere ao monitoramento e a operação dos sistemas; assim como projetos de novas unidades, garantindo que os sistemas de motobombas funcionem em seus pontos de ótimo rendimento para assim garantir a melhor combinação entre as operações e os contratos de fornecimento de energia. Entre mais soluções para melhorar a eficiência energética, podem ser citadas (EECA, 2015):

- Substituição de uma bomba por uma que opera no seu ponto ótimo de funcionamento;
- Manutenção periódica no equipamento; uma redução de 10% na eficiência da bomba pode ser esperada quando não há manutenção;
- Substituição do motor por um motor de alto rendimento;
- Melhorar o acoplamento da bomba; uma melhoria de 5% na eficiência pode ser esperada; e
- Melhorar o controle de operação do sistema (automação).

A análise da eficiência do sistema requer práticas de otimização das bombas. No entanto, a melhor prática é realizar a manutenção regular nos conjuntos motobomba. Isso não só aumentará a eficiência energética, mas também assegura que os sistemas operem de acordo com seus requisitos e não falhem precocemente.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Descrição do Local

O município de Teófilo Otoni está localizado no Vale do Mucuri, região nordeste de Minas Gerais. De acordo com os dados do último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE,2017), a cidade possui uma área de aproximadamente 3.242 km<sup>2</sup>, com uma população estimada de 140.235 pessoas.

Conforme consta no relatório Volume IX - Resumo Técnico, elaborado pela empresa YC ENGENHARIA LTDA (2012a) para a COPASA, acerca do Projeto Básico do Sistema de Abastecimento de Água da sede Urbana da cidade referente ao contrato N° 08.3017 para adequação e ampliação do sistema de distribuição de Teófilo Otoni, o sistema existente de abastecimento de água é composto por dois sistemas de produção, em que há a captação do Rio Todos os Santos através da barragem por gravidade e captação do Rio São José, por recalque. Toda a água bruta chega à ETA, situada em um ponto alto, com cota suficiente para abastecer a parte baixa da cidade.

Para o novo projeto básico do sistema distribuidor foram utilizadas as áreas de influência definidas a partir das modificações e adequações necessárias realizadas no SAA (Sistema de Abastecimento de Água), ficando, dessa forma, delimitadas 29 áreas de influência englobando todas as unidades operacionais existentes e a serem implantadas na cidade COPASA (2012).

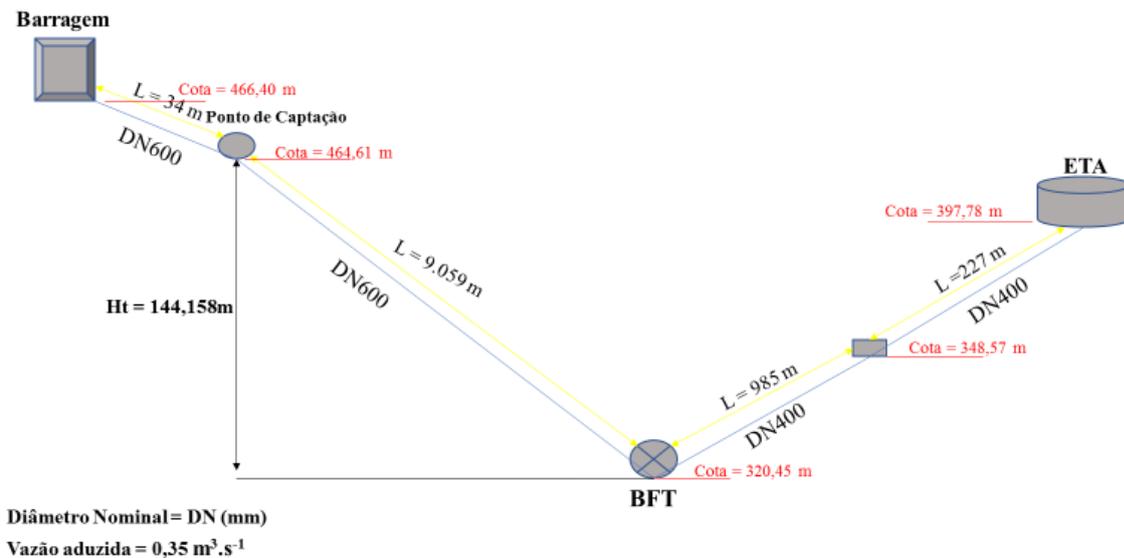
De acordo com os dados do projeto básico de modernização do sistema, a vazão a ser aduzida pela COPASA para a estação de tratamento de água é de 0,35 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. O caminho até a Estação de Tratamento de Água (ETA) segue do ponto de captação da água próximo a barragem, que tem uma distância de 34m da barragem por uma estrada até o encontro da zona urbana em que a tubulação precisa atravessar uma ponte. A ponte está localizada na Rua Zilda Onofre Carvalho onde a mesma rua está aproximadamente 9.059m de distância da captação e foi prevista uma travessia sobre o Rio Todos os Santos em tubulação em aço.

Além disso, na rodovia foi prevista uma travessia especial através de método construtivo não destrutivo. Antes e após a rodovia foram projetadas caixas para a travessia da BR-116. Após a travessia a adutora Todos os Santos muda de diâmetro de 600 mm para 400mm e devido a maior diferença de cotas é onde está localizado o melhor lugar para implantação da BFT. A caminhada continua passando por galerias e atravessa a ponte nessa

rua sobre o Rio Todos os Santos (travessia) e começa a subir os níveis de cotas até chegar a calha Parshall da ETA.

Tem-se na Figura 9 um croqui que assinalam as cotas e a extensão dos trechos da tubulação do ponto de captação da barragem da COPASA até a ETA, e o local indicado de melhor funcionamento para a possível instalação de uma BFT para geração de energia.

**Figura 9 – Croqui das Características dos trechos da Adutora de Água Bruta Todos os Santos – Teófilo Otoni/ MG**



Fonte: Adaptado de YC ENGENHARIA LTDA, 2012b.

De acordo com Lima (2013), o primeiro passo é definir o local onde deverá ser instalada a BFT, considerando que a adução é feita por gravidade. Caso contrário, a BFT introduz uma perda de carga que deve ser superada pela estação elevatória, onerando seu consumo de energia, que será maior que a potência gerada. Para o estudo em questão, é considerada a instalação da BFT utilizando a adução da água feita por gravidade.

Segundo Lima (2013), existe a definição e a divisão das adutoras por gravidade em dois tipos: aquelas em que é possível aproveitar toda a pressão, e aquelas em que a pressão de saída da BFT ainda deverá ser capaz de atender uma demanda. O segundo tipo representa as adutoras de rede de distribuição e de filtros da ETA.

No primeiro caso, em que toda a energia poderá ser aproveitada, deve ser feito o monitoramento da pressão e vazão do local, de preferência na época de menor consumo. Assim, é possível determinar a vazão e diferença de nível do projeto, que serão os valores mínimos encontrados. Desta forma a geração será contínua, facilitando a operação da BFT e o atendimento às cargas do sistema.

No segundo caso, onde apenas parte da energia disponível poderá ser aproveitada, é necessário calcular qual a perda de carga máxima que pode ser introduzida ao sistema. Neste caso o monitoramento da pressão e vazão do local deverá ser feita no período de maior consumo, quando a pressão disponível é menor, ou seja, quando a perda de carga introduzida deverá ser mínima.

De acordo com Lima (2013), nos casos onde a instalação da BFT será feita diretamente na rede de distribuição, a pressão deverá ser coletada em diferentes pontos da rede, além de levantar os diâmetros e comprimentos da tubulação e a topografia do local, para que seja possível realizar sua calibração. Desta forma a BFT será selecionada para a vazão máxima e a perda de carga máxima, definida como sendo a diferença entre a pressão mínima observada no nó crítico (ponto de menor pressão da rede) e o valor mínimo estabelecido por norma.

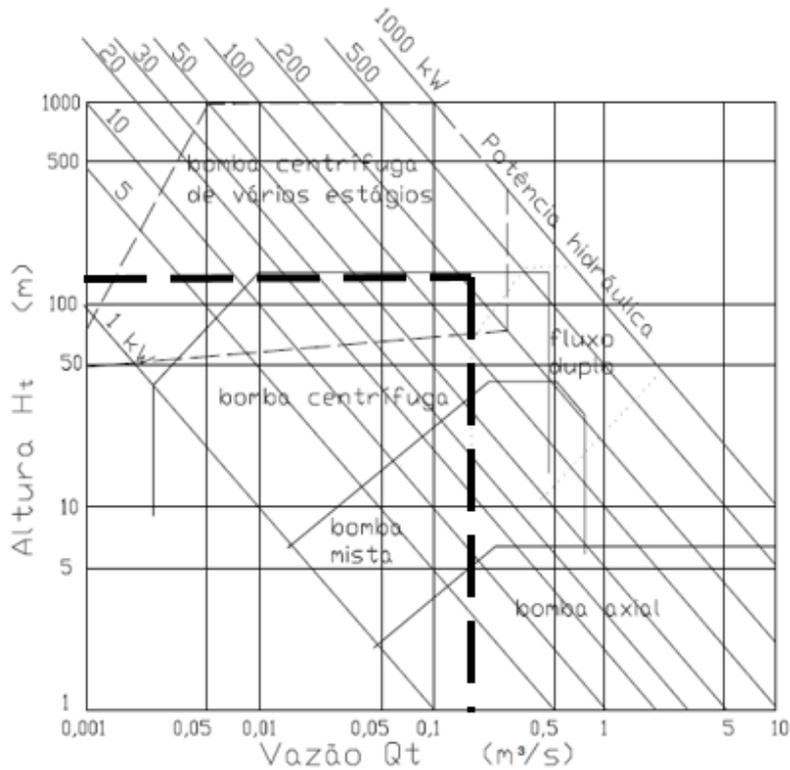
### ***3.1.1 Método de Seleção proposto por Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992)***

Para melhor compreensão do método, os seguintes parâmetros que precisam ser estudados foram colocados e divididos em passos de 1 a 11.

#### ***3.1.1.1 Passo 1***

A partir da Figura 10 foi possível selecionar qual o tipo de bomba é mais adequado para o aproveitamento de acordo com os dados obtidos pela COPASA.

Figura 10 – Pré-seleção da BFT



Fonte: CHAPALLAZ, EICHENBERGER E FISCHER, 1992.

De acordo com os dados obtidos pela COPASA, tem-se a diferença de nível do ponto de captação da barragem até o possível local de implantação da BFT de 144,158 m, ou seja,  $H_t = 144,158$  m. A vazão de adução para a ETA é conhecida de  $Q_t = 0,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Sendo assim, de acordo com a linha tracejada que consta na Figura 11 seria necessária uma bomba centrífuga de vários estágios (quantidade de rotores).

### 3.1.1.2 Passo 2

É necessário então calcular a rotação específica da BFT no sistema técnico. Assim, adotou-se uma bomba centrífuga com apenas um rotor e rotação síncrona de 1800 rpm que serão calculados conforme Equação 1:

$$nqt = \frac{nt \cdot \sqrt{Qt}}{Ht^{3/4}} \quad (1)$$

onde:

$nqt$  [1] - rotação específica da BFT no Sistema Técnico;

$nt$  [rpm] - rotação da BFT;

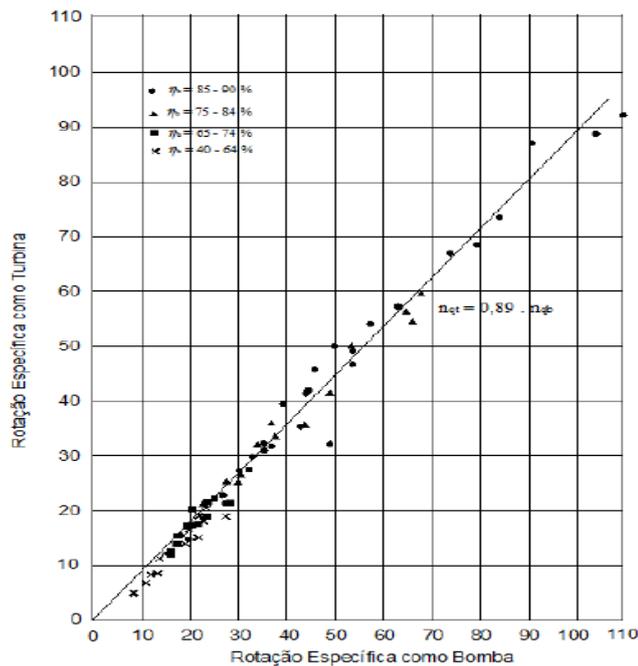
$Qt$  [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] - vazão da BFT;

$Ht$  [m] – Diferença de nível.

### 3.1.1.3 Passo 3

De acordo com os ensaios realizados por Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992), a relação entre a rotação específica da operação como turbina e como bomba é praticamente constante (Figura 11). Assim, a rotação específica da bomba pode ser calculada pela Equação 2.

**Figura 11 – Relação entre rotação específica da bomba funcionando como turbina e bomba**



Fonte: CHAPALLAZ, EICHENBERGER E FISCHER, 1992.

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (2)$$

onde:

$nqb$  [1] - rotação específica da bomba;

$nqt$  [1] - rotação específica da BFT (Equação 1).

#### 3.1.1.4 Passo 4

Chapallaz, Eichenberger e Fischer (1992) também propõem a estimativa da vazão da bomba através da Equação 3. Este procedimento é feito para facilitar a determinação do rendimento máximo da bomba, que pode ser obtido através da Figura 12.

$$Qb = \frac{Qt}{1,3} \quad (3)$$

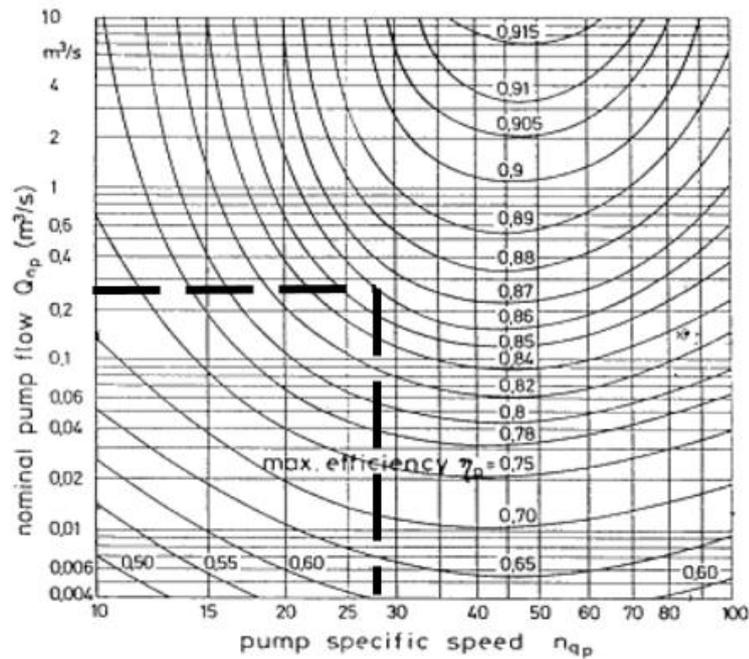
onde:

$Qb$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] - vazão da bomba.

$Qt$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] - vazão da BFT.

#### 3.1.1.5 Passo 5

**Figura 12 – Máximo rendimento da bomba em função de sua rotação específica e vazão nominal**

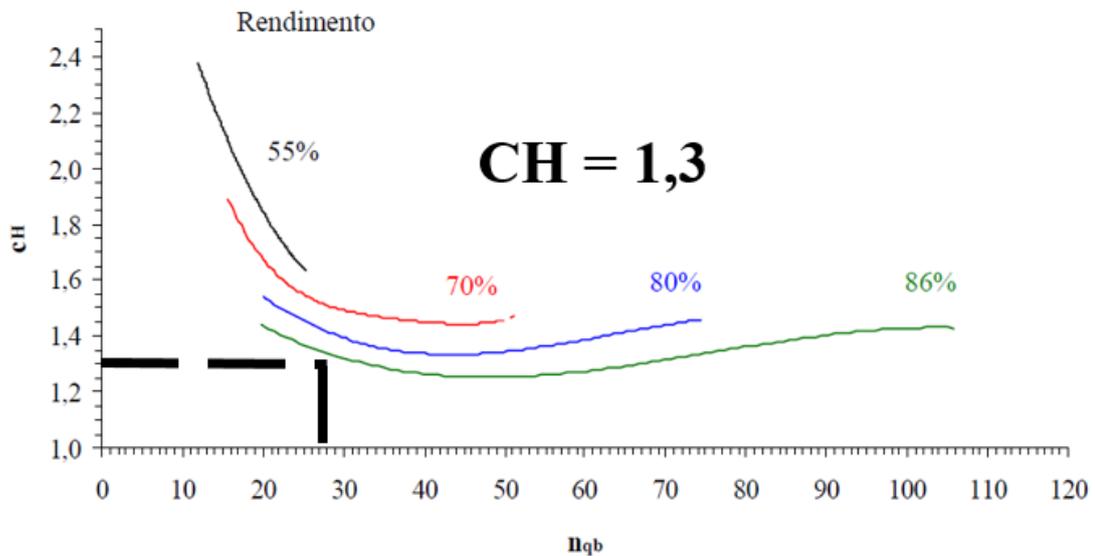


Fonte: CHAPALLAZ, EICHENBERGER E FISCHER, 1992.

### 3.1.1.6 Passos 6

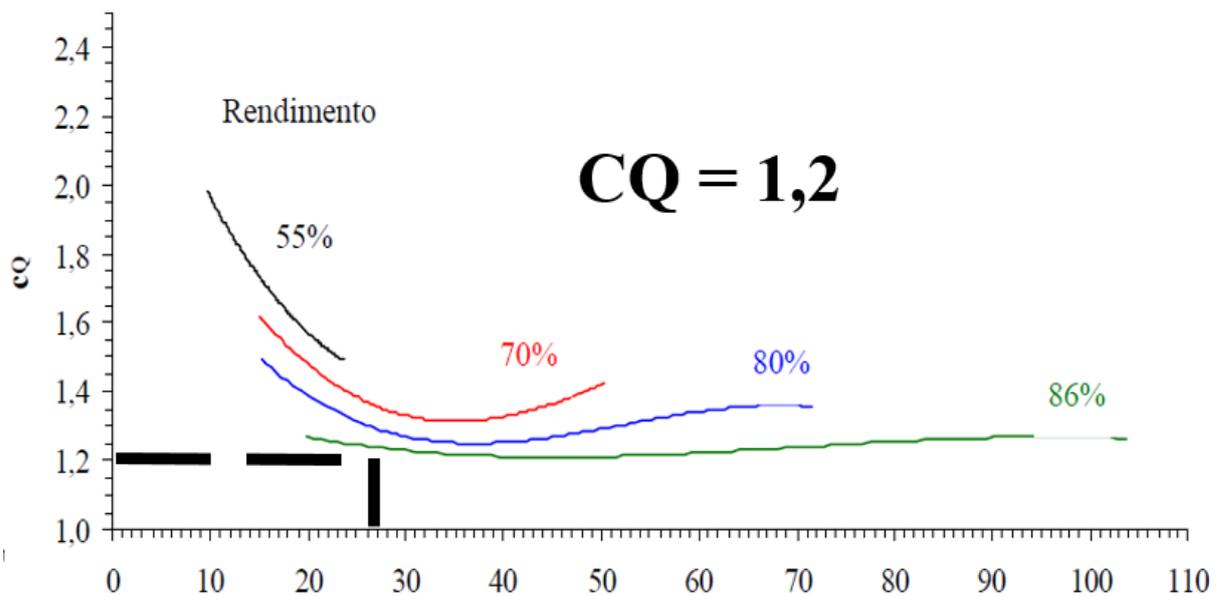
Conhecendo-se o rendimento e rotação específica da bomba, determinam-se os coeficientes de altura e vazão, que são coeficientes experimentais criados a partir de vários experimentos para BFT inseridos através das Figuras 13 e 14.

Figura 13 – Coeficientes de Altura



Fonte: CHAPALLAZ, EICHENBERGER E FISCHER, 1992.

Figura 14 – Coeficientes de Vazão



Fonte: CHAPALLAZ, EICHENBERGER E FISCHER, 1992.

### 3.1.1.7 Passo 7

A diferença de nível e a vazão da BFT operando como bomba são calculadas através dos dados do aproveitamento e dos coeficientes experimentais  $CQ$  e  $CH$ . Assim, o ponto de operação da BFT como bomba é calculado pelas Equações 4 e 5.

$$Hb = \frac{Ht}{CH} \quad (4)$$

$$Qb = \frac{Qt}{CQ} \quad (5)$$

onde:

$Hb$  [m] – diferença de nível da bomba que será utilizada como turbina;

$Ht$  [m] – diferença de nível disponível no aproveitamento (da BFT);

$CH$  [1] - coeficiente de altura;

$Qb$  [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] - vazão da bomba que será utilizada como turbina;

$Qt$  [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] - vazão disponível no aproveitamento (da BFT); e

$CQ$  [1] - coeficiente de vazão.

A grande vantagem deste método é a ampla faixa de rotação específica estudada, compreendendo bombas centrífugas, mistas, axiais, multiestágio e de rotor gêmeo.

### 3.1.1.8 Passo 8

Porém, a rotação das bombas é diferente da utilizada para a geração (velocidade síncrona). Portanto, é necessário realizar a correção da vazão e da diferença de nível de acordo com a rotação fornecida nos catálogos dos fabricantes antes de realizar a seleção da bomba, através das leis de semelhança, Equações 6 e 7 (PORTO, 2006).

$$Hb = \left(\frac{nb}{n0b}\right)^2 \cdot Hb \quad (6)$$

$$Qb = \frac{nb}{n0b} \cdot Q0b \quad (7)$$

onde:

$H_b$  [m] – diferença de nível referente à rotação nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante;

$n_b$  [rpm] - rotação nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante;

$n_{0b}$  [rpm] - rotação da BFT;

$H_{0b}$  [m] – diferença de nível referente às velocidades síncronas;

$Q_b$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] - vazão referente à rotação nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante;

$Q_{0b}$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] - vazão referente às rotações síncronas.

#### 3.1.1.9 Passo 9

Seleciona-se então a bomba que apresente menor relação custo-benefício, ou seja, aquela que tenha o menor custo com maior rendimento entre possíveis marcas e modelos comercializados. O modelo encontrado que mais se aproxima das características desejadas possui gráficos de rendimento em função da vazão e da altura manométrica.

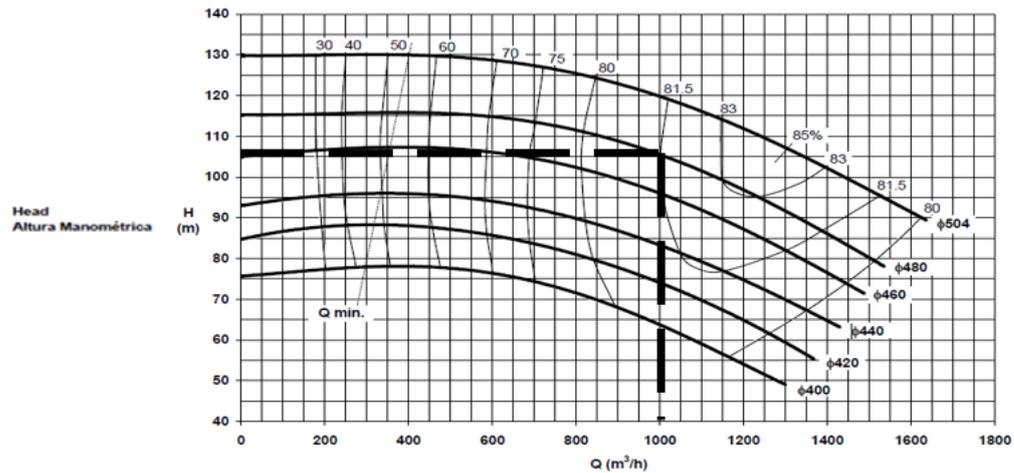
Foram analisadas diferentes marcas e modelos para seleção de uma bomba que mais se aproximava das características desse trabalho. Foram analisados catálogos de bomba das marcas KSB, Schneider motobombas, entre outras e o modelo selecionado é uma bomba da marca KSB- MEGANORM 250-500, fabricada pela KSB. É uma bomba centrífuga, e seu limite de movimentação de fluxo, como bomba é de  $1.600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  ( $0,44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). A altura manométrica máxima atingida por essa bomba é de 130 metros.

#### 3.1.1.10 Passo 10

Para o cálculo do rendimento real aplicado na BFT foi utilizado apenas dentro da literatura um valor geralmente empregado e aceito para cálculos estimados de 80% conforme apontado na Figura 15.

Figura 15 – Curva característica da bomba KSB-MEGANORM 250-500

Pump Type Bomba Tipo Tipo de Bomba	<b>KSB MEGANORM</b>	Size Tamanho Tamaño	<b>250- 500</b>	60 hz	<b>KSB</b>
Project - No. Oferta n°	_____	Item - No. Item n°	_____	Nominal Speed Velocidade Nominal Velocidad Nominal	<b>1750 rpm</b>
Oferta - n°	_____	Pos. n°	_____		



Fonte: KSB Bombas, 2013.

### 3.1.1.11 Passo 11

A potência esperada para os dados reais do sistema de abastecimento considerando a vazão e queda líquida, pode ser estimada pela Equação 8:

$$P = 9,81 * Q * H * \eta_{bft} * \eta_{gerador} \quad (8)$$

$P$  = Potência (kW)

$Q$  = Vazão da Bomba Corrigida para BFT ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$H$  = Diferença de nível da Bomba Corrigida para BFT (m)

$\eta_{bft}$  = Rendimento da BFT (%)

$\eta_{gerador}$  = Rendimento do Gerador (%)

Observações:

- Para o rendimento do gerador adotado será utilizado o valor de rendimento máximo estimado no passo 5 considerado de 85%.

- O rendimento da bomba funcionando como turbina (real) será inicialmente estimado em 80% utilizando-se do passo 10.

### 3.1.2 Cálculo de Energia dos Boosters

As vinte e nove áreas de influência são alimentadas por uma Rede Tronco, que parte do centro de reservação principal localizado na área da ETA. Essa rede tem a finalidade de manter o sistema equilibrado, com a manutenção constante das pressões, garantindo um abastecimento regular em todo o sistema.

A rede tronco inicia-se na saída dos reservatórios, constituída por tubulação em ferro fundido com extensão de 180 metros, trecho existente que será aproveitado por não possuir interligações para a distribuição. A partir deste ponto, a rede tronco foi projetada para atender de forma independente todas as áreas de influência.

As áreas de influência 01 - Direta e área de influência 02 - Cidade Alta contidas no resumo técnico não contém dados da potência do motor dos boosters, logo para os resultados e discussões do trabalho, essas duas áreas não foram consideradas e os cálculos foram determinados sobre as outras vinte e sete áreas de influência.

Dentre as vinte e sete áreas de influência analisadas foi construída uma tabela na qual são apresentadas todos os boosters e suas respectivas potências. Assim, a tabela 4 apresenta a transformação da potência dos motores em CV para kW, em que cada unidade de CV correspondeu a 0,735499 kW. A partir daí a tabela apresenta as horas de funcionamento do sistema e depois através da Equação 9 calculou-se a energia gerada por cada região e a energia gerada total de todos os boosters das 27 regiões como somatório total das energias de cada área em kWh.

Tem-se a Equação 9 para calcular a energia de cada região.

$$E = Ph \tag{9}$$

E = Energia (kWh)

P = Potência do motor (kW)

h = Horas de funcionamento (h)

### 3.1.3 Cálculo de Energia de todo SAA da Cidade de Teófilo Otoni

Fez-se um pedido a COPASA para informações sobre o histórico (últimos 10 anos) do consumo de energia elétrica da COPASA no município de Teófilo Otoni no que tange o SAA - prédio administrativo da barragem, e sistemas de bombeamento, tratamento e distribuição de água. Na Tabela 1 são apresentados os dados de consumo de energia elétrica.

**Tabela 1 – Consumo de Energia Elétrica do Sistema de Abastecimento de Água da Cidade de Teófilo Otoni – 2008-2018**

<b>Ano</b>	<b>1.000 kWh.ano<sup>-1</sup></b>
2008	3.099,71
2009	3.075,61
2010	3.058,90
2011	3.116,86
2012	3.148,74
2013	2.791,44
2014	2.808,24
2015	2.789,68
2016	2.914,53
2017	2.796,08
2018	3.209,24
<b>Total</b>	<b>32.809,03</b>
<b>Média</b>	<b>2.982,64</b>

Fonte: Adaptado da COPASA, 2019

Para estimar-se o valor total do consumo com o pagamento das despesas de energia, foi feita uma média dos valores da tabela e assim chegou-se à conclusão do consumo médio consumido por toda a COPASA, sendo esse valor de 2.982,64 adimensional. Entretanto, conforme a Tabela 1 para converter o valor estudado em kWh.ano<sup>-1</sup>, multiplicou-se o valor médio encontrado por 1.000 kWh.ano<sup>-1</sup>, assim obteve-se um valor de energia elétrica média consumida de 2.982.640,00 kWh.ano<sup>-1</sup>, ou seja, 245.148,60 kWh.mês<sup>-1</sup> e 8.171,62 kWh.dia<sup>-1</sup>.

### 3.1.4 Tarifa da CEMIG

Realizou-se a escolha da tarifa dentre daquelas que são utilizadas pela CEMIG a fim de se obter uma estimativa dos gastos (Tabela 2), considerando o Sistema de Bandeiras Tarifárias vigente instituído pela ANEEL.

**Tabela 2 – Tarifa de Consumo de Energia fornecida pela Cemig no setor Demais Classes - 2019**

<b>B3 – Demais Classe</b>	<b>Verde Consumo R\$. kWh<sup>-1</sup></b>	<b>Amarela Consumo R\$. kWh<sup>-1</sup></b>	<b>Vermelho – Patamar 1 Consumo R\$. kWh<sup>-1</sup></b>	<b>Vermelho – Patamar 2 Consumo R\$. kWh<sup>-1</sup></b>
Demais classes (consumo R\$.kWh <sup>-1</sup> )	0,62833	0,64333	0,66833	0,68833

Fonte: Adaptado de CEMIG, 2019.

A partir do levantamento dos valores correspondentes de cada bandeira tarifária (Tabela 2), esses foram multiplicados pelo valor total de energia gerada pelos 27 boosters e pela energia total do SAA considerando os períodos de funcionamento diário, mensal e anual.

Cabe ressaltar que a implantação da BFT pode vir a suprir parte da energia consumida pela COPASA, de modo que essa tenha a sua despesa reduzida com a CEMIG. Caso a energia gerada seja excedente, essa poderia ser vendida, gerando receitas extras para a COPASA.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros calculados a partir da metodologia da seleção da BFT no catálogo de bombas.

**Tabela 3 – Parâmetros da seleção da BFT selecionada no catálogo de bombas**

Parâmetro	Valor		
Vazão de Projeto ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	0,35 <sup>a</sup>	Coefficiente de Vazão	1,25
Queda Líquida (m)	144,16 <sup>a</sup>	Diferença de nível (m)	110,89
Rotação da BFT (rpm)	1.800	Vazão da Bomba ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	0,28
Nqt	25,6	Rotação nominal da Bomba (rpm)	1.750
Nqbt	28,76	Diferença de nível corrigida p/1.750rpm (m)	104,82
Vazão Estimada da Bomba ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	0,27	Vazão da Bomba corrigida p/1.750rpm ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	0,27
Rendimento Estimado da BFT (%)	85	Rendimento real da BFT (%)	80
Coefficiente de Altura	1,3	Potência do Motor (kW)	188,79

<sup>a</sup>YC Engenharia, 2012.

Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 4 são apresentados os valores calculados para a energia, bem como a potência do motor de todos boosters analisados, horas de funcionamento.

**Tabela 4 – Quantidade de energia consumida pelos boosters no projeto de ampliação do SAA feito pela COPASA em Teófilo Otoni MG – 2012**

Boosters	Potência do Motor (cv)	Potência do Motor (kW)	Horas de Funcionamento (h)	Energia (kWh)
LBV	3,00	2,21	24	52,96
Indaiá	10,00	7,35	24	176,52
Alto Indaiá	25,00	18,39	24	441,30
Bela Vista	15,00	11,03	24	264,78
Vila Betel	7,50	5,52	24	132,39
São Cristovão	12,5	9,19	24	220,65
EAT Mangue Seco	2,00	1,47	24	35,30
Viriato	3,00	2,21	24	52,96
Altino Barbosa	5,00	3,68	24	88,26
Tabajaras	5,00	3,68	24	88,26
Jardim Iracema	3,00	2,21	24	52,96
Vila Angélica	5,00	3,68	24	88,26
Serra Verde	0,75	0,55	24	13,24
Monte Carlo	0,75	0,55	24	13,24
Frei Dimas	10,00	7,35	24	176,52
Minas Novas	5,00	3,68	24	88,26
Teófilo Rocha	7,50	5,52	24	132,39
EAT Alto Filadélfia	1,00	0,74	24	17,65
Pindorama	4,00	2,94	24	70,61
Jardim São Paulo	10,00	7,35	24	176,52
Cidade Nova	2,00	1,47	24	35,30
Taquara	12,50	9,19	24	220,65
EAT Alto Taquara	0,33	0,24	24	5,83
Eucalipto	5,00	3,68	24	88,26
Belvedere	1,00	0,74	24	17,65
Castro Pires	1,00	0,74	24	17,65
Vila Vitória	0,50	0,37	24	8,83
<b>TOTAL</b>	<b>157,33</b>	<b>115,72</b>	<b>24</b>	<b>2.777,19</b>

Fonte: Adaptado de YC ENGENHARIA LTDA, 2012c

A potência do motor para a bomba selecionada é de 188,79 kW, o que representa uma produção de 4.530,96 kWh por dia de energia.

A Tabela 6 apresentam os valores anuais do consumo de energia dos boosters, do consumo do SAA e da energia produzida pela BFT.

**Tabela 5 – Consumo e produção de energia anual**

<b>Energia</b>	<b>kWh.ano<sup>-1</sup></b>
Consumo dos Boosters	1.013.674,35
Consumo de todo SAA da COPASA	2.982.640,00
Produção da BFT	1.653.800,40

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 5, mutiplicou-se o valor diário de consumo de energia elétrica dos Bossters e da produção de energia elétrica da BFT por 365 dias para se obter um valor estimado anual.

A Tabela 6 apresentam os valores mensais do consumo de energia dos boosters, do consumo do SAA e da energia produzida pela BFT.

**Tabela 6 – Consumo e produção de energia mensal**

<b>Energia</b>	<b>kWh.mês<sup>-1</sup></b>
Consumo dos Boosters	83.315,70
Consumo de todo SAA da COPASA	245.148,60
Produção da BFT	135.928,80

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 6 mutiplicou-se o valor diário de produção da energia elétrica da BFT e o consumo dos boosters por 30 dias para se obter um valor estimado mensal. Já o valor do consumo médio anual do SAA, realizou-se a divisão do consumo anual por 365 dias e multiplicou-se o resultado por 30 dias, para se obter o valor mensal.

A Tabela 7 foi elaborada a partir dos dados da Tabela 4 e da potência da BFT funcionando em 24 horas, de forma que esta apresenta os valores diários do consumo de energia dos Boosters, do consumo do SAA e da energia produzida pela BFT.

**Tabela 7 – Consumo e produção de energia diário**

<b>Energia</b>	<b>kWh.dia<sup>-1</sup></b>
Consumo dos Boosters	2.777,19
Consumo de todo SAA da COPASA	8.171,62
Produção da BFT	4.530,96

Fonte: Próprio Autor

Nota-se que na Tabela 7, a produção de energia da BFT é quase duas vezes superior ao do consumo dos Boosters e metade do consumo do SAA. Ressalta-se ainda que o

consumo do SAA foi obtido a partir da divisão do consumo médio anual.

Assim, mediante a apresentação dos valores das respectivas Tabelas 5, 6 e 7, e comparando com os valores anual, mensal e diário da Tabela 1, verificou-se que a energia consumida pelos boosters correspondeu a 34% da energia média total consumida pela COPASA. Porém, foi possível perceber que o valor produzido com a implantação da BFT supera o valor atual consumido pelos boosters, além de gerar um valor excedente de 63,15%.

Além disso, em relação a esse valor excedente, observou-se a possibilidade da sua utilização pela COPASA para outros fins. Já quanto ao valor total gasto pela COPASA com todos os sistemas (prédios administrativos, tubulações, etc - SAA), observou-se que o excedente gerado, considerando a implantação da BFT, seria de 21,46%. Por fim, avaliando o consumo total de energia do SAA, cerca de 55,45% poderia ser suprido com a implantação da BFT.

Na Tabela 8, o valor gasto em reais considera os dados da Tabela 2 (bandeiras) multiplicados pela energia média anual consumida pelo SAA, já coluna economia, representa os valores em reais da energia produzida pela BFT que é abatida da energia consumida pelos Boosters, e por último, a coluna novo valor de despesas, representa esse abatimento nos gastos da COPASA.

**Tabela 8 – Economia da COPASA considerando o abatimento do consumo dos Boosters pela BFT**

<b>Tarifas</b>	<b>Valor Gasto (Reais)</b>	<b>Economia (34%)(Reais)</b>	<b>Novo Gasto (Reais)</b>
Bandeira Verde	1.874.083,01	637.000,81	1.237.082,19
Bandeira Amarela	1.918.822,63	652.207,81	1.266.614,82
Bandeira Vermelha 1	1.993.388,66	677.552,81	1.315.835,85
Bandeira Vermelha 2	2.053.041,49	697.828,80	1.355.212,68

Fonte: Próprio Autor

Já a Tabela 9, além de considerar os dados das Colunas 1 e 2 da Tabela 8, considerou a economia que a implantação da BFT poderia gerar em todo o SAA, de forma que as novas despesas são apresentadas na última coluna.

**Tabela 9 – Economia média anual com a implantação da BFT de maneira completa**

<b>Tarifas</b>	<b>Valor Gasto (Reais)</b>	<b>Economia (55,45%) (Reais)</b>	<b>Novo Gasto (Reais)</b>
Bandeira Verde	1.874.083,01	1.039.179,03	834.903,98
Bandeira Amarela	1.918.822,63	1.063.987,15	854.835,48
Bandeira Vermelha 1	1.993.388,66	1.105.334,01	888.054,65
Bandeira Vermelha 2	2.053.041,49	1.138.411,50	914.629,98

Fonte: Próprio Autor

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho estimou a produção de energia elétrica de uma BFT no SAA que foi modernizado e ampliado pela COPASA na cidade Teófilo Otoni. A partir da metodologia e dos parâmetros adotados na seleção da BFT (rotação, vazão, rendimento, coeficiente de altura, rendimento real e a potência do motor) esses indicaram uma viabilidade técnica em relação à energia que poderia ser produzida.

A BFT dimensionada poderia suprir toda a energia dos booster e 55,45% do consumo total do SAA, de forma que esta poderia se utilizada para redução dos gastos de energia da COPASA junto a concessionária de energia.

Como trabalho futuro, sugere-se a adoção das perdas de cargas e do levantamento das pressões, além das horas de funcionamento real do SAA da cidade de Teófilo Otoni.

**REFERÊNCIAS**

ALATORRE-FRENK, C. **Cost Minimization in Micro-Hydro Systems using Pumps-As-Turbines**. PhD Thesis, University of Warwick, p 85-89, p 142-150, 1994.

ALBUQUERQUE, A. A. **Análises e métodos de otimização para eficiência energética de estações elevatórias de água**. Tese (Doutorado). Programa Institucional de Doutorado Temático em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande-PB. Campina Grande. 2007.

ALVES, D. D. S. **Contribuição para o estudo e a aplicação de bombas funcionando como turbinas na geração descentralizada**. 2010. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2010.

AL-ZAHRANI, A.; ORFI, J.; AL-SUHAIBANI, Z.; SALIM, B.; AL-ANSARY, H. Thermodynamic Analysis of a Reverse Osmosis Desalination Unit with Energy Recovery System. **Procedia Engineering**, vol. 33, p. 404-414, 2012.

ANNEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 21 mai. 2019.

BALARIM, C. R.; TARGAM L. A.; VIRGENS FILHO, J. S.; ANDRADE FILHO, A. G.; WIECHETECK, G. Custo de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas em Microcentrais Hidrelétricas. **Engenharia Agrícola**, v.24, p. 219-225, 2004.

BANSAL, P.; MARSHALL, N. Feasibility of Hydraulic Power Recovery From Waste Energy in Bio-Gas Scrubbing Processes. **Applied Energy**, vol. 87, p. 1048–1053, 2010.

BRASIL. Casa Civil. **Lei nº 13.360, de 17 de novembro de 2016**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2016/lei/L13360.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/L13360.htm). Acesso em: 11 fev. 2019

BUSE, F. **Selection of PATs Using Normalized Performance Curves of PATs of Different Specific Speeds**, Chemical Engineering, p. 113-117, 1981.

CEMIG. **O MUSEU DO COMPLEXO HIDROELÉTRICO DE MARMELOS SERÁ REABERTO NO DIA 19/01. PROGRAME-SE!** Disponível em: [https://www.cemig.com.br/pt-br/a\\_cemig/Nossa\\_Historia/Paginas/Marmelos.aspx](https://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Marmelos.aspx). Acesso em: 24 de jun. 2019.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. **Diretrizes para Estudos e Projetos Básicos de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1999.

COPASA. **Consumo de Energia elétrica – Sistema de abastecimento de água de Teófilo Otoni (MG).** 2019. Disponível em: [copasa.com.br](http://copasa.com.br). Acesso em: 03 jun. 2019.

CHAPALLAZ, J.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. **Manual on pumps used as turbines.** Braunschweig: Vieweg, 1992. 221 p. ISBN 3-528-02069-5.

DIEDERICH, H. **Use of centrifugal pumps as turbines, conversion factors and characteristics, performance of PATs of different specific speeds, influence of PAT speed and impeller trimming on the performance, runaway speed,** KSB Technische Berichte 12, 1967.

EECA (Energy Efficiency and Conservation Authority) **A standard for the auditing of the energy efficiency of electric motorpowered pumping systems used for liquid transport.** 2015. Disponível em: [http://www.emanz.org.nz/system/files/PumpingSystems\\_AuditStd\\_v1.1\\_UpdatedJun2015.pdf](http://www.emanz.org.nz/system/files/PumpingSystems_AuditStd_v1.1_UpdatedJun2015.pdf). Acesso em: 04 jun. 2019.

GAMA, J. R.; SILVA, B. **Pré-diagnóstico e monitoramento das eficiências eletromecânica e hidroenergética de sistemas elevatórias de água elaborado por portal capacidades.** 2018.

GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água.** 3ª ed. Paraíba. Universitária Universidade Federal da Paraíba 277 p. 2009.

GOPALAKRISHNAN, S. **Power Recovery Turbines for the Process Industry.** In: Proc. of the 3rd Int. Pump Symposium, Turbomachinery Labs. Texas A and M University, College Station, Houston, USA, 1986.

GROVER, K. M. **Conversion of Pumps to Turbines.** GSA Inter. Corp., Katonah, New York, USA, 1984.

HISTÓRIA: **Datas significativas sobre a eletricidade no Brasil.** Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2003. Página oficial da hidrelétrica de Itaipu. Disponível em: [http://www.itaipu.gov.br/impre/30anos/ji\\_23.htm](http://www.itaipu.gov.br/impre/30anos/ji_23.htm). Acesso em: 11 fev. 2019.

IBGE – **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**, 2000. Dados do Censo – 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/teofilotoni/panorama>. Acesso em: 28 mai. 2019.

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é Geração Distribuída?** 2012. Disponível em: [http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp). Acesso em: 11 fev. 2019.

KITTREDGE, C. P. Centrifugal Pumps Used as Hydraulic Turbines. **Journal of Engineering for Power**, Trans. ASME, vol. 83. p. 74-78, 1961.

LEWINSKI-KESSLITZ, H. P. Pumps as turbines for small scale hydropower plants, conversion factors and characteristics, differences in the performance of PATs of different specific speeds. **Wasserwirtschaft Jg**, vol. 77, p. 531-537, 1987.

LIMA, G. M. **Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água**. 2013. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

LOPES, R. E. **Grupos Geradores de Baixa Potência Acionados Por Bombas Funcionando Como Turbina**. 2003. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil. 2003.

MCCLASKEY, B. M.; LUNDQUIST, J. A. Can you justify hydraulic turbines? **Hydrocarbon Processing**, v. 55, 10, p. 163-169. 1976.

NETTO, J. M. A.; Y FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. Editora Blucher, 9ª ed. 2018.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ª Ed, São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 519 p., 2006.

RAMOS, H. M.; MELLO, M.; DE, P. K. Clean Power in Water Supply Systems as a Sustainable Solution: From Planning to Practical Implementation. **Water Science and Technology: Water Supply**, no 1.1, p. 39-49, 2010.

RICARDO, M. **Estudo de grupos moto-bomba operando como grupos geradores em microcentrais hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado). 240p. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), MG. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia. 2007.

SCHMIEDL, E. **Serial centrifugal pumps operating as turbines**; Section A-6 ‘Pumps used as Turbines’, Pump Congress, Karlsruhe, Germany, 1988.

SHARMA, K. R. **Small hydroelectric projects – Use of centrifugal pumps as turbines**. Kirloskar Electric Co., Bangalore, India, 1985.

SINGH, P. **Optimization of Internal Hydraulics and of System Design for PUMPS AS TURBINES with Field Implementation and Evaluation**. 345p. Tese (Doutorado) – University of Karlsruhe, Germany, 2005.

SNS (Secretaria Nacional de Saneamento) (Comp.). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2016**. [s.l.]. 2016. (Diagnóstico Anual Água e Esgotos). Compilação e cálculos baseados em séries históricas e indicadores por abrangência disponibilizados. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2015>. Acesso em: 03 jun. 2019.

STEPANOFF, A. J. **Special Operating Conditions of Centrifugal Pumps**. Cap. 13, In: *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, S. 269–292. 1957.

STERNLICHT, B. Waste Energy Recovery: an Excellent Investment Opportunity. **Energy Conversion and Management**, vol. 22, p. 361-373, 1982.

SUN, J.; WANG, Y.; XU, S.; WANG, S. Energy Recovery Device with a Fluid Switcher for Seawater Reverse Osmosis System. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, vol. 16, p. 329-332, 2008.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2006.

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

VIANA, A. N. C.; REZEK, A. J. J.; MEDEIROS, D. M. A Utilização de Geradores de Indução Acionados por BFTs na Geração de Energia Elétrica. 10p. **AGRENER GD**, 2004.

WALTER, A. C. S.; BAJAY, S. V.; FERREIRA, A. L. **Relatório Técnico da Fase 6: Proposição de Eliminação de Barreiras e Formulação de Políticas de Fomento, com os Instrumentos Regulatórios Associados, à Geração Distribuída de Energia Elétrica no Brasil, Sobretudo com Fontes Renováveis e Plantas de Cogeração.** Projeto de Pesquisa sobre Integração entre as Regulações Técnico-Econômica e Ambiental do Setor Elétrico Brasileiro, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético, 55 p., 2000.

WILLIAMS, A. A. **Pumps as turbines: a user's guide.** IT Publications, London, ISBN 1-85339-285-5, 1995.

YEDIDIAH, S. **Application of Centrifugal Pumps for Power Recovery Purposes Characteristics of PATs.** Worthington Division Mc. Graw-Edison Company, 1983.

YC ENGENHARIA LTDA (2012a). COPASA (2012) - **Resumo técnico do sistema de distribuição.** Disponível em: [copasa.com.br](http://copasa.com.br). Acesso em: 03 jun. 2019.

YC ENGENHARIA LTDA (2012b). COPASA (2012) - **Adutora de água bruta – Rio Todos os Santos.** Disponível em: [copasa.com.br](http://copasa.com.br). Acesso em: 03 jun. 2019.

YC ENGENHARIA LTDA (2012c). COPASA (2012) – **Sistema de distribuição de água.** Disponível em: [copasa.com.br](http://copasa.com.br). Acesso em: 03 jun. 2019.