

O AVANÇO DA APLICAÇÃO DAS BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS NO BRASIL

Augusto Nelson Carvalho Viana⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico e, mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá, doutor em Engenharia Civil, área de Hidráulica na Escola Politécnica. Possui vasta experiência como professor e consultor em máquinas hidráulicas (bombas e turbinas), estações de bombeamento, micro e pequenas centrais hidrelétricas, conservação e uso racional de água e energia, ensaios em sistemas hidráulicos, bombas funcionando como turbina e hidrometria. Atua como Consultor na Empresa SOESCO Ensaios e coordena o Laboratório de Etiquetagem de Bombas da SOESCO Ensaios.

Renato Swerts Carneiro Dias Junior⁽¹⁾

Engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Itajubá, onde participa do programa de mestrado em Engenharia de Energia tendo como linha de pesquisa a eficiência hidroenergética de sistemas de saneamento. Possui experiência em diagnóstico e projetos de eficiência energética e microgeração de energia hidrelétrica. Profissional certificado em medição e verificação de performance em projetos de eficiência energética – CMVP.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Padre Lourenço da Costa, 415 - Bairro São Vicente - Itajubá – Minas Gerais - CEP: 37502-003 - Brasil - Tel: +55 (35) 3622-4215 - e-mail: augusto@soesco.com.br.

RESUMO

A utilização das Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) têm sido uma alternativa simples e de custo baixo em substituição as turbinas convencionais Pelton, Francis e Axiais para potências abaixo de 1000 [kW]. Essa prática já vem sendo utilizada desde a década de 60 em países como EUA, Alemanha, Áustria e França. No Brasil, nos anos 80, a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) desenvolveu vários trabalhos com essa tecnologia no âmbito de laboratório. Somente em 2006, inaugurou-se a primeira central hidrelétrica em Delfim Moreira-MG, de 40 [kW], com uma BFT acionando um gerador assíncrono, denominada de Microcentral Hidrelétrica Mireta Bastos na Fazenda Boa Esperança, município de Delfim Moreira-MG. Foi um projeto de pesquisa pioneiro no país em um sistema isolado, que proporcionou subsídios para futuros projetos em sistemas interligados utilizando BFT e motor de indução funcionando como gerador (GI). A partir daí estudos e projetos utilizando essa tecnologia, com potências maiores foram surgindo no Brasil. Esse trabalho apresenta a aplicação das BFTs desde os primeiros trabalhos acadêmicos até as aplicação prática no âmbito das Centrais de Geração Hidrelétrica (CGHs), incluindo estudos na área de saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: Bomba Funcionando como Turbina, Geração Hidráulica, Geração Distribuída

1 - INTRODUÇÃO

Enquanto, nas décadas de 60 e 70 na Europa, países como Alemanha, Áustria, França, Portugal e na América do Norte, os EUA utilizavam Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) em substituição as turbinas convencionais Pelton, Francis, e as Axiais, para aproveitamentos hidrelétricos de baixa potência, devido a simplicidade, ao bom rendimento e ao custo reduzido, o Brasil despertava para essa tecnologia em meados dos anos 80, através de estudos e pesquisas experimentais em laboratório. A utilização das Bombas Funcionando como Turbinas iniciou-se no Brasil através de trabalhos de pesquisas na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), estado de Minas Gerais, no Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas, Viana [1987], onde através de testes experimentais realizados e resultados de outros autores propôs uma metodologia de seleção das BFTs baseados em coeficientes de correção de altura e de vazão, escolhendo-se as bombas de fluxo, principalmente as centrífugas e mistas no mercado nacional.

Em 2006 e 2007, através de recursos do Ministério de Minas e Energia foram estudados dois aproveitamentos hidroenergéticos e aplicados a tecnologia com BFTs acionando geradores assíncronos, utilizando procedimentos de Viana [1987] e Chappalaz [1992]. O primeiro aproveitamento ocorreu na Fazenda Boa Esperança, Delfim Moreira, Minas Gerais, com a geração de um grupo de 40 [KW] e o segundo com geração de 6 [kW], no Parque Estadual da Ilha Anchieta, em Ubatuba, estado de São Paulo. Ambos os projetos foram concebidos em sistemas isolados e distantes da rede elétrica do sistema interligado do país.

Trabalhos foram realizados em aproveitamentos no setor de saneamento, onde captações de água bruta por gravidade foram aproveitados, antes da chegada a Estação de Tratamento de Água e locais onde existiam controle de pressão e são utilizadas válvulas de redução de pressão, como mostra o trabalho de Lima [2013]. Esse trabalho ficou no âmbito da pesquisa teórica.

Com a Resolução 482/2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica que estabeleceu as condições gerais para a microgeração e minigeração de energia elétrica ter acesso a rede de distribuição, a geração de baixa potência passou a ser interessante no país. A partir daí, projetos de geração solar fotovoltaica de potências abaixo de 10[kW], interligada a rede de distribuição deu um salto bastante grande.

A geração hidráulica também começou a ficar interessante, mas ainda com poucos projetos em função dos custos da obra civil e dos equipamentos eletro e hidromecânicos.

No Brasil existe um vácuo em gerações hidrelétricas abaixo de 1000[kW]. A implementação de projetos de potências abaixo de 1000[kW] tem sido difícil de viabilizar economicamente através da utilização das turbinas convencionais (Pelton, Francis e Kaplan) devido ao seu alto custo. Entretanto, a utilização de bombas operando como turbinas (BFTs) têm sido uma alternativa de baixo custo se comparadas com as turbinas convencionais. Recentemente (2019), estudou-se em uma CGH existente com uma turbina Francis de 750 [kW], a utilização de BFTs para a geração de energia em períodos secos. É o caso CGH Sagrado Coração de Jesus, que foi implantada em 2019 na cidade de Ponte Serrada em Santa Catarina, uma geração de 250[kW], com duas BFTs de 125[kW] cada. Outras CGHs utilizaram a tecnologia das BFTs como a CGH São João no Paraná, além da CGH Eldorado no Mato Grosso do Sul, que utiliza a queda e vazão de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) para gerar energia no retorno da água ao rio.

Esse trabalho tem a pretensão de apresentar a evolução da utilização da geração hidráulica de baixa potência através das BFTs nos anos 80 através de trabalhos experimentais realizados em laboratório, passando pelos anos de 2006 com as primeiras centrais construídas e gerando isoladamente, até os anos atuais, com as Centrais de Geração Hidráulica (CGHs) no país interligadas ao sistema.

2 – OBJETIVOS

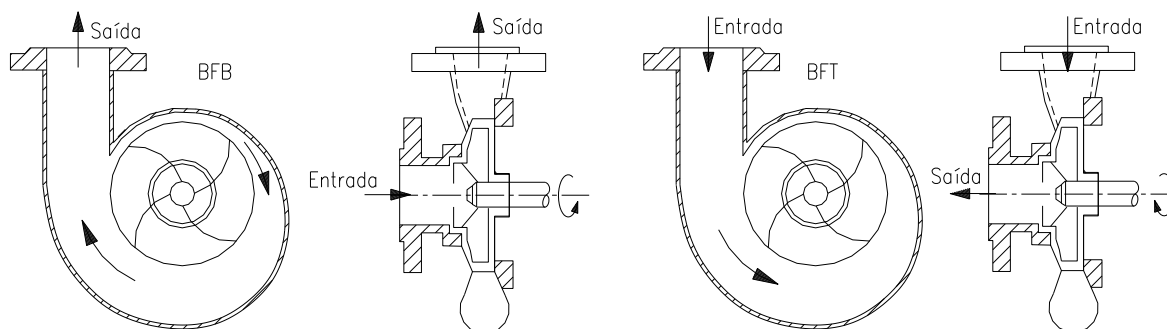
O objetivo do trabalho é apresentar a Bomba Funcionando como Turbina (BFT), seu funcionamento operando em reverso, seu comportamento comparado com a Bomba Funcionando como Bomba (BFB) na mesma rotação, a seleção da bomba a partir dos dados do aproveitamento, baseado em coeficientes experimentais obtidos no Brasil e exterior, e finalmente apresentar casos utilizando a tecnologia com a BFT acionando geradores de indução (assíncronos) ou geradores síncronos.

3. METODOLOGIA UTILIZADA

3.1. O comportamento da BFT

A bomba de fluxo, que são as centrífugas ou radiais, as mistas e diagonais e as axiais ou hélices foram projetadas para operarem succionado o líquido e aumentando a sua pressão através do rotor e o recalcano para locais mais distantes. A ideia é operar a bomba em reverso como turbina. Para isso, há necessidade de se ter uma queda (pressão) e vazão disponíveis em um aproveitamento hidroenergético, onde a saída da bomba passa ser a entrada da turbina e a entrada da bomba passa a ser a saída da turbina, como mostra a figura 1.

Figura 1 – Bomba Funcionando como Bomba (BFB) e Bomba Funcionando como Turbina (BFT)



Bomba Funcionando como Bomba
Fonte: Viana [1987]

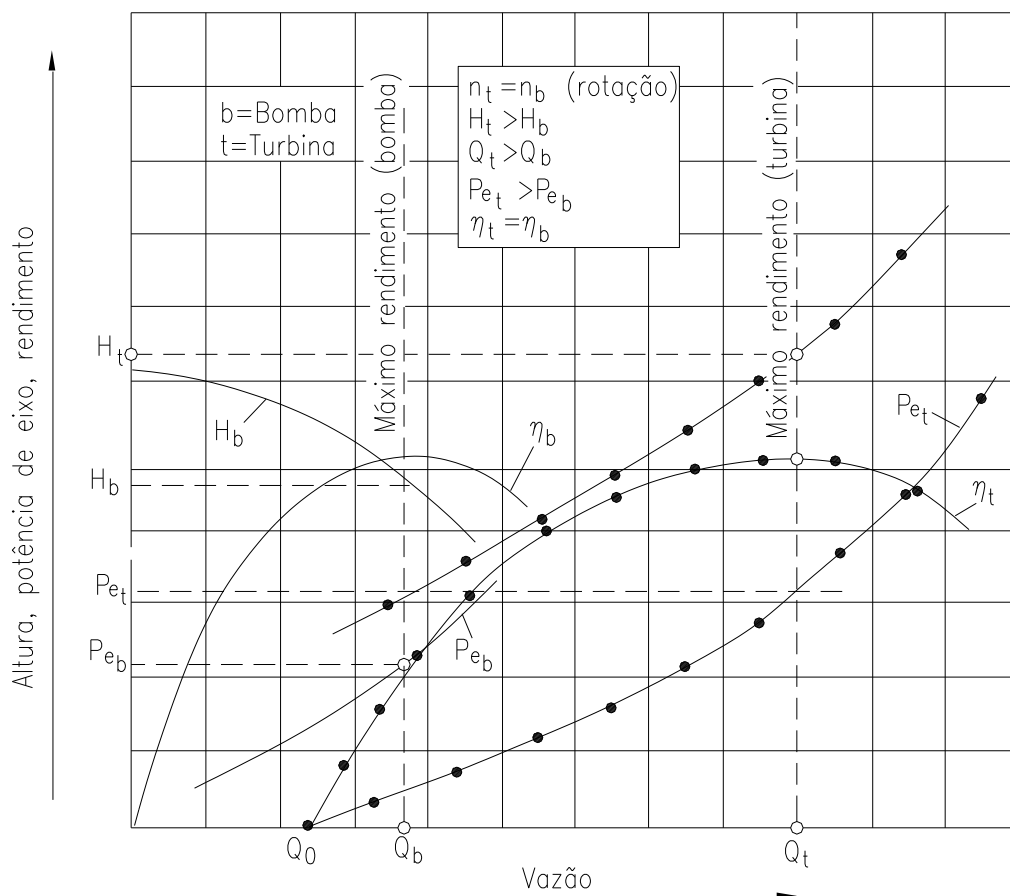
Bomba Funcionando como Turbina

Note na figura 1 que a rotação inverte na operação como BFT, que proporciona uma queda de rendimento devido aos choques do líquido com as pás do rotor, pois a máquina foi projetada como bomba. Entretanto, apresenta-se experimentalmente que a BFT operará com vazão, altura e potência maiores do que com a BFB, para obter o mesmo rendimento como bomba, na mesma rotação, figura 2.

A figura 2 mostra que para obter o mesmo rendimento da bomba, a BFT deverá engolir mais água, ter uma maior altura e produzir uma maior potência. Desta forma, define-se os coeficientes de vazão k_q e altura k_a que corrigem as perdas oriundas da inversão da rotação, Viana [1987], equação 1. As vazões e alturas com índices **b** e **t**, representam, respectivamente, a bomba e a turbina (BFT).

$$k_q = \frac{Q_b}{Q_t}; k_a = \frac{H_b}{H_t} \quad \text{Equação (1)}$$

Figura 2 – Curvas da BFB e da BFT obtidas em laboratório operando na mesma rotação



Fonte: Viana [2012]

3.2. Vantagens da Utilização das BFTs

As vantagens das BFTs com relação as turbinas convencionais são:

- as bombas têm um custo muito menor que as turbinas convencionais em função do Brasil possuir muitos fabricantes de bombas de fluxo que atendem a indústria, o meio rural e o saneamento, o que não acontece com as turbinas;

- a disponibilidade de bombas e suas peças de reposição são muito maior do que de turbinas;
- as bombas são simples e robustas, que facilitam a 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 de bombas é menor que o de turbinas;
- a instalação de grupos motobombas é mais simples que a de grupos geradores com turbinas convencionais.

3.3. Aplicação das BFTs

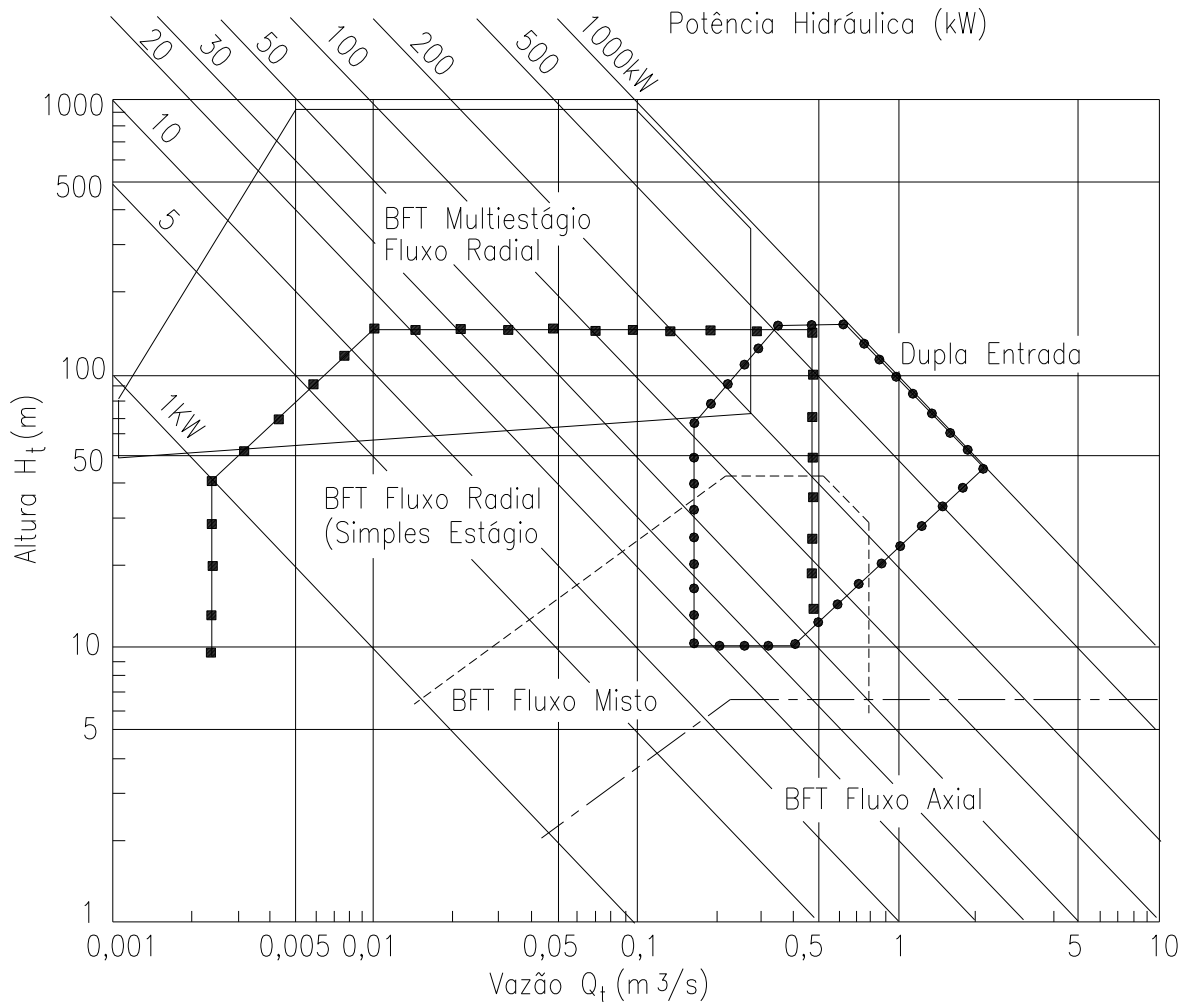
Existe uma ampla aplicação da tecnologia das BFTs. Pode-se citar:

- Hotéis Fazenda ou meio rural, comunidades isoladas, onde existem aproveitamentos hidroenergéticos (sistema isolado ou interligado);
- Vazão sanitária excedente (época de cheias) em Pequenas Centrais Hidrelétrica (5 MW a 50 Mw) e Centrais de Geração Hidrelétrica (abaixo de 5 MW);
- Vazão de estiagem (época de secas) em Pequenas Centrais Hidrelétrica (PCH) e Centrais de Geração Hidrelétrica (CGH);
- Microgeração em sistemas de abastecimento de água (quedas que existem na distribuição de água);
- Estações de tratamento de esgoto no saneamento e efluentes na indústria (ETEs);
- No lugar das VRPs para a abaixar a pressão na linha de abastecimento.

3.4. A Seleção da Bomba para Operar como Turbina

Pode-se fazer uma seleção preliminar da BFT utilizando um gráfico vazão Q_t [m^3/s] versus altura H_t [m], apresentado por Viana [2012], que representa o campo de aplicação para potências hidráulicas de 1 [kW] a 1000 [kW], figura 3. A aplicação das BFTs pode ser realizada com bombas de 1 estágio a vários estágios, radiais, mistas e axiais, além da bomba bipartida de rotor duplo ou gêmeo. Depende da altura e vazão e consequentemente da rotação específica da máquina. Na pré-seleção já se sabe qual tipo de bomba será mais adequado.

Figura 3 – Campo de aplicação das BFTs – Tipos de BFTs



Fonte: Viana [2012]

A seleção da bomba para funcionar como turbina é baseada em coeficientes de correção obtidos experimentalmente em função dos testes em muitas bombas com diferentes alturas, vazões e rotações, e englobando em um parâmetro denominado de rotação específica da máquina, definida no sistema internacional e apresentada na equação 2.

$$n_{qA}[1] = 3 \cdot n_q = 3 \cdot \frac{n[\text{rpm}] \cdot \sqrt{Q[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]}}{(H[\text{m}])^{0,75}} \quad \text{equação (2)}$$

O livro de Viana [2012] apresenta dois procedimentos de seleção da bomba para operar como turbina, ou seja, o do trabalho dissertação de mestrado de Viana [1987] baseado em resultados experimentais obtidos no Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas da UNIFEI e outros autores, e o trabalho de Chapallaz [1992]. A diferença basicamente entre os dois autores é a faixa de rotação específica utilizada. No trabalho de Chapallaz [1992], a faixa da rotação específica apresentada é maior do que o trabalho de Viana [1987]. Na referência Viana [2012] os dois métodos são apresentados passo a passo com exemplos de aplicação. Basicamente parte-se dos dados da altura e vazão de um aproveitamento (dados da BFT), sugere-se uma rotação e aplica-se a correção dos coeficientes de altura e vazão, determinando a altura manométrica e vazão da bomba. Assim, nos catálogos de fabricantes, seleciona-se a bomba mais adequada, procurando a de melhor rendimento. Com rendimento da bomba η_b , que será igual ao rendimento da BFT η_t , determina-se a potência de eixo da BFT, equação 3. Para a determinação da potência gerada, multiplica-se a equação 3 pelo rendimento do gerador η_g .

$$P_{eBFT}[\text{kW}] = 9,81 \cdot Q_t \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \cdot H_t[\text{m}] \cdot \eta_t \quad \text{equação (3)}$$

A determinação da altura de sucção da BFT, ou seja, o estudo de cavitação é realizado e está apresentado na referência Viana [2012].

3.5. Motor como gerador e geração distribuída

A partir da equação (3), com o cálculo da potência de eixo da BFT, é especificado o gerador elétrico, responsável pela conversão da potência mecânica no eixo em potência elétrica para as cargas ou para o sistema elétrico interligado.

Assim como a bomba operando em reverso traz vantagens técnicas e econômicas, também o motor de indução pode ser utilizado como gerador elétrico. Esta aplicação é ainda mais atrativa para conjuntos motobomba do tipo “monobloco”, onde a bomba e o motor compõem um único equipamento, sem necessidade de acoplamento.

Os geradores de indução assíncronos, ou simplesmente gerador de indução são máquinas assíncronas que requerem uma fonte externa de corrente (reativa) de magnetização necessária para estabelecer o campo magnético no entreferro entre o rotor e o estator do gerador. Sem esta fonte os geradores de indução não são capazes de gerar potência elétrica, e devem operar sempre em paralelo com um sistema elétrico, uma máquina síncrona ou um capacitor que possa suprir a necessidade de reativo.

Quando conectado diretamente com a rede de distribuição os geradores de indução devem operar a uma velocidade de rotação determinada pela máquina motriz e ligeiramente maior que a velocidade necessária para o exato sincronismo. Abaixo da velocidade de sincronismo estas máquinas operam como motor de indução, e portanto se tornam uma carga no sistema elétrico ao qual está conectado.

A partir do ano de 2012, a geração elétrica de pequeno porte ganhou novos horizontes quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, que regulamentou a geração distribuída e conexão de geradores de pequeno porte na rede elétrica. Esta possibilidade de conectar a rede elétrica local trouxe ainda mais vantagens a aplicação de geradores de indução. Isto porque operando conectado a rede elétrica o sistema elétrico interligado regula os níveis de tensão e frequência da rede, que fica mais robusta e estável quando comparado a operação em sistema isolado.

4. RESULTADOS OBTIDOS – ESTUDOS DE CASOS

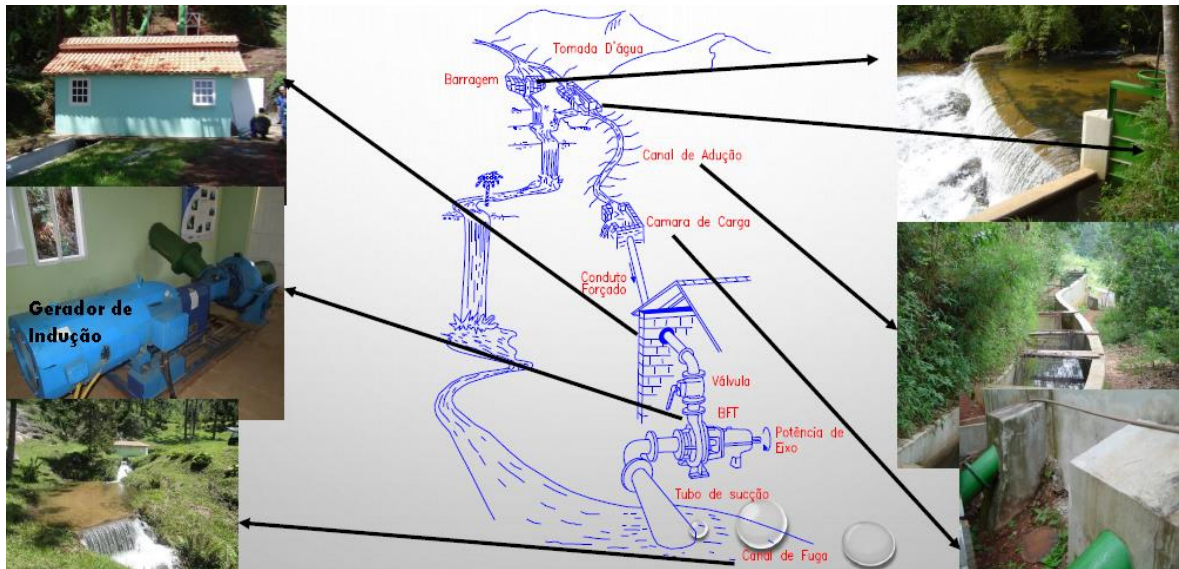
Ao longo do avanço da aplicação de bombas para funcionar como turbina diferentes potenciais foram avaliados, desde áreas rurais até redes de distribuição de água, conectadas a rede elétrica e em sistema isolado como alternativa a geradores diesel.

4.1. Sistemas Isolados – Hotéis Fazenda, Meio Rural e Comunidades Isoladas

Aplicou-se tecnologia das BFTs em dois aproveitamentos distantes mais de 5 [km] da linha da concessionária, utilizando as metodologias de seleção das bombas propostas por Viana [1987] e por Chapallaz [1992].

O primeiro caso foi na Fazenda Boa Esperança em 2006, um hotel localizado no município de Delfim Moreira-MG. A figura 4 ilustra o aproveitamento da MCH Mireta Bastos.

Figura 4 – Aproveitamento Fazenda Boa Esperança – Hotel Fazenda



O aproveitamento da MCH Mireta Bastos é composto de uma pequena barragem, uma comporta da tomada d'água, um cana de adução, que alimenta a câmara de carga e um conduto forçado que alimenta a BFT, um canal de fuga que retorna ao rio. Veja que na casa de força abriga um grupo gerador adquirido no projeto um skid completo (base, motor, acoplamento e seu protetor e uma bomba centrífuga de fluxo misto. O motor funciona como gerador assíncrono. A tabela 1 mostra os dados do aproveitamento.

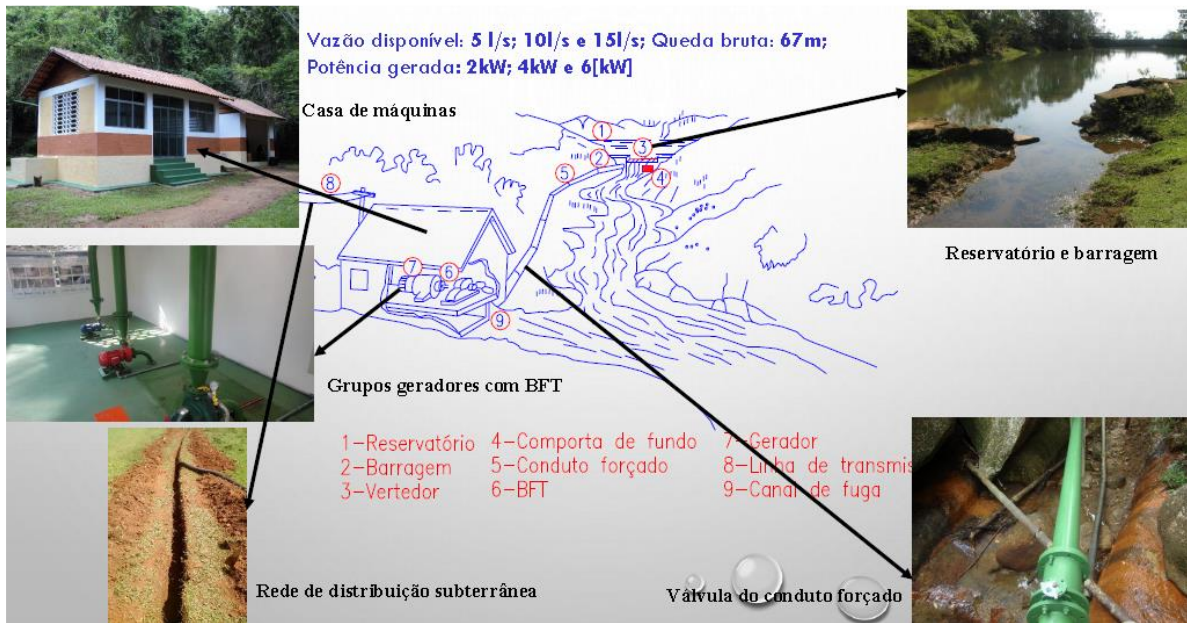
Tabela 1 – Dados do aproveitamento - Grupo Gerador com BFT

Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
0,250	21,5	1800	82	43,5	92	40,0

O segundo caso em sistema isolado, aplicou-se em 2007 a tecnologia no Parque Estadual da Ilha Anchieta, no município de Ubatuba-SP. O Parque recebe turistas e não possui atendimento da concessionária de energia por estar muito longe do continente. A maior parte da energia consumida é suprida por um gerador diesel e placas solares fotovoltaicas. Entretanto, para diminuir a dependência do diesel, projetou-se uma Microcentral Hidrelétrica (MCH) com os recursos hídricos existentes.

A figura 5 ilustra o aproveitamento da Ilha Anchieta que possui um pequeno reservatório, um conduto forçado que sai da barragem e alimenta três grupos geradores com BFTs na casa de máquinas, sendo dois com geradores assíncronos e um com gerador síncrono. A linha de distribuição da ilha é subterrânea.

Figura 5 – Aproveitamento do Parque Estadual da Ilha Anchieta – Comunidade Isolada



Por se tratar de uma ilha, as condições hídricas são menores do que as do continente e assim a vazão disponível, pequena na época das chuvas, diminui naturalmente no outono e inverno. Por essa razão, para otimizar a operação da usina que possui uma altura de queda líquida de 65 [m], propõe-se três BFTs, com vazões de 15 [L/s] (verão) 10 [L/s] (outono e primavera) e 5 [L/s] (inverno). A tabela 2 apresenta os dados do aproveitamento. As BFTs são do tipo simples sucção, rotor de fluxo radial e eixo horizontal. Dois grupos possuem gerador assíncrono e um grupo com gerador síncrono.

Tabela 2 – Dados do aproveitamento – Grupos Geradores com BFTs

Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
0,015	65	1800	67,0	6,22	92,0	5,90
0,010	65	1800	65,0	4,20	90,0	3,73
0,005	65	3600	60,0	1,91	90,0	1,72

4.2. Sistema Interligado – Vazão de Estiagem

Para o sistema interligado na concessionária, dois exemplos de sucesso serão apresentados. Os dois casos são de CGHs, onde possuem uma turbina convencional com potência maior operando e BFTs atendendo a demanda hídrica em época de estiagem com um grupo gerador menor, para otimizar a operação e produção da usina. Em ambos os casos, a turbina é Francis e sabe-se que quando a vazão é reduzida, o rendimento da máquina cai muito e chega a atingir 50 [%] ou menos. Assim, nessa vazão, a BFT opera com rendimento muito melhor, engolindo menos água e produzindo mais potência.

O primeiro caso refere-se a CGH Sagrado Coração de Jesus, localizada na cidade de Ponte Serrada-SC, possui uma turbina Francis de 800 [kW] e duas BFTs acionando geradores síncronos. O trabalho de Viana, Leite e Flessak [2019] apresenta o estudo realizado na CGH Sagrado Coração de Jesus, enquanto a figura 6 mostra suas partes principais. Os dados de cada grupo gerador estão apresentados na tabela 3. A BFT é do tipo bipartida axial, com dupla entrada e eixo horizontal.

Figura 6 – CGH Sagrado Coração de Jesus



Sistemas Interligados na Rede (Geração Distribuída) – CGH Sagrado Coração de Jesus – Ponte Serrada-SC – Operação desde 2019
Queda – 63 [m]; Vazão – 500 [L/s]; Potência – 250 [kW] (2 Grupos de 125 [kW])

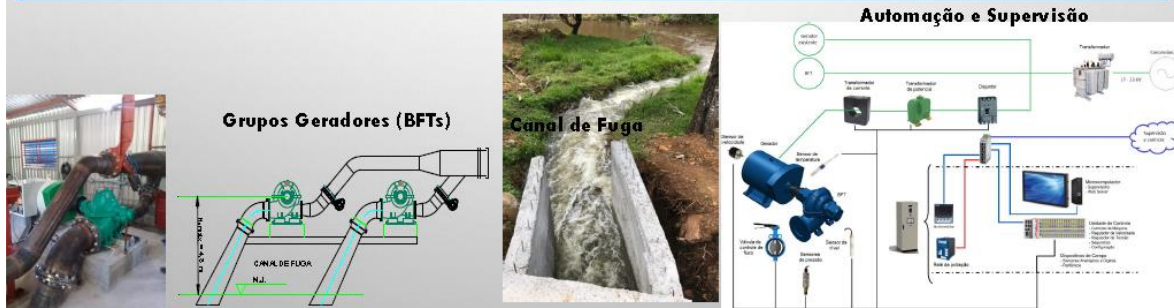


Tabela 3 – Dados de cada grupo com BFT e gerador síncrono – Duas BFTs com potência de 250 [kW]

Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
0,250	63	1800	87	134,4	93	125,0

O segundo caso em operação é a CGH São João em Carambeí-PR, que possui dois grupos geradores, sendo um com turbina Francis de 700 [kW] e o outro com BFT de 300 [kW]. A turbina Francis opera na época das cheias (verão e primavera) e o grupo gerador com BFT na época das secas (outono e inverno). A BFT aciona um gerador assíncrono. A BFT é do tipo bipartida axialmente, rotor duplo (dupla entrada) e eixo horizontal. A tabela 4 apresenta os dados, enquanto a figura 7 ilustra a CGH.

Tabela 4 – Dados do grupo com BFT e gerador assíncrono

Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
1,124	34,0	910	87	326,2	92	300,0

4.3. Sistema de Abastecimento – Microgeração em Sistema Isolado

Este caso a ser apresentado ficou apenas no estudo e não foi realizado por falta de recursos do SAAE. O estudo trata-se de uma captação de água bruta em um rio, que abastece por gravidade a Estação de Tratamento de Água de uma cidade.

Este trabalho foi realizado com o intuito de levantamento dos dados de vazão e queda disponíveis na Captação de Água Bruta do Rio Batedor do SAAE Cruzeiro que alimenta a ETA Avelino Júnior na cidade de Cruzeiro-SP. Através de uma pequena barragem, uma comporta alimenta um canal de adução, que por sua vez entrega a vazão a dois condutos forçados e por gravidade atingem a ETA, figura 8. A vazão foi monitorada por um medidor ultrassom de tempo de trânsito por sete dias, o consumo de energia foi avaliado e a altura de queda foi determinada através de medidas topográficas através de um DGPS, como mostra a figura 7.

A tabela 5 mostra os dados da BFT acionando um gerador assíncrono do aproveitamento estudado na Captação de Água Bruta do Rio Batedor. A BFT selecionada foi do tipo centrífuga ou radial, simples sucção e eixo horizontal. Este trabalho foi desenvolvido como TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) da aluna Keila C. de Oliveira em 2011 na Engenharia Hídrica da UNIFEI.

Tabela 5 – Dados do grupo com BFT e gerador assíncrono

Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
0,106	67,0	1810	84	58,5	94	55,0

Figura 7 – CGH São João – Grupo Gerador com BFT



Sistemas Interligados na Rede (Geração Distribuída) – CGH São João – Carambeí-PR
Queda – 34 [m]; Vazão – 1124 [L/s]; Potência – 300 [kW] – Operação desde 2021



Figura 8 – Microgeração em sistema de abastecimento - Estudo



Estudo da Captação de Água Bruta – Alimentação da ETA Avelino Júnior da Cidade de Cruzeiro-SP, (2011)
Queda – 67,0 [m]; Vazão – 106 [L/s]; Potência – 55 [kW]



4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os procedimentos de seleção BFT, Viana [1987] e Chapallaz [1992], apresentados no trabalho de Viana [2012] têm obtidos bons resultados nos estudos de casos apresentados, principalmente os que foram realizados os testes em campo. Dos seis casos apresentados, somente o do aproveitamento no SAAE Cruzeiro e na CGH Eldorado, não foram realizados os ensaios de campo. No caso do SAAE Cruzeiro, o trabalho ficou apenas nos estudos realizados e na CGH Eldorado a sua operação ocorrerá em maio de 2024.

Por se tratar de duas CGHs implantadas recentemente, a tabela 7 mostra os dados selecionados das BFTs para as CGHs Sagrado Coração de Jesus e São João em comparação com os resultados obtidos dos testes em campo, Relatório de Ensaios [2019] e Relatório de Ensaios [2021].

Note que na tabela 8, os resultados obtidos in loco nos testes de comissionamento em cada CGH ficaram muito próximos dos dados selecionados para cada BFT, que valida o procedimento de seleção baseado em resultados

experimentais de muitas bombas operando como bombas como turbinas apresentados no trabalho de Viana [2012].

Com relação ao custo da BFT se comparado com uma turbina convencional para mesma potência tem-se uma relação da ordem de (3 a 4) vezes menor. No caso das CGH Sagrado Coração de Jesus, a relação de custo ficou em 3,3 menor para a BFT, enquanto a CGH São João ficou com uma relação de 2,7, tabela 8. Isso pode ser explicado em função da rotação da Sagrado Coração de Jesus ser 1800 [rpm] e a da São João ser 910 [rpm]. Quanto menor a rotação maior o custo da máquina. Mesmo assim, para a São João houve uma boa relação comparada com uma turbina Francis, tabela 8.

No aspecto de manutenção, as turbinas convencionais possuem mais peças mecânicas e apresentam um custo maior do que as BFTs, que são mais simples têm menos peças.

Tabela 7 – Comparação dos resultados

CGH Sagrado Coração de Jesus – Um Grupo Gerador						
Valores Obtidos na Seleção da BFT Viana [2012]						
Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
0,250	63	1800	87	134,4	93	125,0
Valores Obtidos na CGH – Comissionamento – Janeiro de 2020						
Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
0,255	63,2	1800	86,8	137,2	94	146,0
CGH São João						
Valores Obtidos na Seleção da BFT Viana [2012]						
Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
1,124	34,0	910	87	326,2	92	300,0
Valores Obtidos na CGH – Comissionamento – Maio de 2021						
Q [m ³ /s]	H [m]	n [rpm]	η_{BFT} [%]	P _c [kW]	η_g [%]	P _g [kW]
1,120	33,9	910	87	324,1	92	298,0

Tabela 8 – Comparação dos custos da BFT com a turbina hidráulica convencional

CGH Sagrado Coração de Jesus -		
Tipo de Máquina Hidráulica	Fornecimento Simplificado	Custo [R\$]
01 turbina Francis de 250 [kW]	Com caixa espiral, pré-distribuidor, sistema de pás diretrizes, Unidade Hidráulica do Regulador de Velocidade (UHRV) e rotor simples (φ290)	250.000
02 BFTs de 125 [kW]	Bipartida, rotor duplo, eixo horizontal, acoplamento, protetor de acoplamento, revestimento cerâmico no rotor e carcaça, e certificado de teste de rendimento como bomba, com válvula borboleta de controle na abertura.	75.000
CGH São João		
Tipo de Máquina Hidráulica	Fornecimento Simplificado	Custo [R\$]
01 turbina Francis de 300 [kW]	Com caixa espiral, pré-distribuidor, sistema de pás diretrizes, Unidade Hidráulica do Regulador de Velocidade (UHRV) e rotor simples (φ400)	350.000
01 BFT de 300 [kW]	Bipartida, rotor duplo, eixo horizontal, acoplamento, protetor de acoplamento, revestimento	130.000

	cerâmico no rotor e carcaça, e certificado de teste de rendimento como bomba, com válvula borboleta de controle na abertura.	
--	--	--

POTENCIAL HIDRELÉTRICO EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A operação dos sistemas de saneamento é uma constante transformação hidroenergética, mas sempre no sentido de consumir energia elétrica para gerar energia hidráulica. No entanto, deve-se atentar que em algumas situações um potencial de excedente de energia hidráulica muitos sistemas de distribuição de água ou mesmo de descarte de água tratada em estações de tratamento de se beneficiam de uma topografia privilegiada, realizando a captação e distribuição de água por gravidade, evitando os gastos com bombeamento. Entretanto, toda a energia potencial disponível é dissipada, seja em válvulas redutoras de pressão ou em reservatórios. Assim, toda a energia disponível que poderia ser aproveitada acaba sendo desperdiçada.

Determinar o potencial disponível em um determinado ponto da rede de distribuição de água requer o conhecimento do sistema de tratamento e distribuição de água e também o seu funcionamento para que assim o fornecimento de água não seja prejudicado.

Os trabalhos de LIMA (2012) propõem uma metodologia para determinação do potencial hidroelétrico em um sistema de abastecimento de água, e mostrou que o potencial energético em sistemas de abastecimento de água está presente em diferentes pontos do sistema, como captações de água bruta, distribuição entre reservatórios e até mesmo diretamente na rede de distribuição, em válvulas redutoras de pressão (VRP). Estudo inovador da Eldorado Celulose apresentou ainda a viabilidade técnica e econômica da aplicação de grupos geradores na tubulação de descarte das estações de tratamento de efluentes, que pode ser aplicado a grandes estações de tratamento de esgoto (ETEs).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho buscou apresentar a evolução da tecnologia de bombas funcionando como turbina (BFT) no Brasil, ressaltando o potencial existente nas redes de distribuição de água ou nas estações de tratamento de esgoto.

O trabalho mostra os avanços de metodologia, regulamentação e tecnologia que propiciaram que Bomba Funcionando como Turbina se consolidasse como a alternativa de melhor custo benefício em geração hidráulica de pequeno porte, devido ao seu alto rendimento. Na questão dos custos das BFTs é notório a diferença se comparados com as turbinas hidráulicas convencionais, além de outras vantagens como a facilidade de peças de reposição e prazo de entrega.

A utilização das BFTs no Brasil, para as potências abaixo de 1 [MW] levou algum tempo para ser aceita em função do arcabouço legal relacionado com a produção de energia para aproveitamento de pequeno porte. Talvez um desconhecimento de parte dos profissionais envolvidos na área de geração hidráulica e da divulgação pequena dessa tecnologia fez com que não houvesse interesse na sua aplicação.

Esse trabalho, que mostra os estudos e pesquisas acadêmicas na década de 80 realizadas na Universidade Federal de Itajubá no âmbito de teoria e prática em laboratório, serviu como base para duas aplicações em 2006 e 2007 (Fazenda Boa Esperança e Ilha Anchieta), mesmo que ainda no âmbito da pesquisa aplicada, mas que deram grande experiência para que em 2019 e 2021 (CGHs Sagrado Coração de Jesus e São João), de uma forma profissional, pôde-se a tecnologia entrar no mercado competitivo com essa aplicação. Estima-se que em 2023 a o início da implantação de pelo menos cinco novos aproveitamentos hidrelétricos BFT.

Espera-se que a divulgação do trabalho permita disseminar a tecnologia apresentada no setor de saneamento, em aplicações nas captações de água bruta, em substituição as VRPs e em ETAs que possuam uma altura de queda no retorno da água ao rio.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2012), Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>
2. CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; Manual on Pumps Used as Turbines; MHPG Series; Vol. 11; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany, 1992.
3. LIMA, G.M. Estudo do Potencial Hidrelétrico em Sistemas de Abastecimento de Água Utilizando Bombas Funcionando como Turbina, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá-MG, 2013.

4. MACEDO, D.M.; A Utilização de Bombas Operando como Turbinas e Geradores de Indução na Geração de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado; UNIFEI, Itajubá-MG, 2004.
5. RICARDO, M, Estudo de Grupos Moto-bomba Operando como Grupos Geradores em Microcentrais Hidrelétricas. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá-MG, 2007.
6. VIANA, A.N.C. Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas; Dissertação de Mestrado; Engenharia Mecânica, EFEI; Itajubá-MG; 1987.
7. VIANA, A.N.C.; NOGUEIRA, F. J. H. Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas. Trabalho de Pesquisa; Departamento de Mecânica; EFEI; Itajubá, 1990.
8. VIANA, A.N.C., Bombas Funcionando como Turbinas, Livro da Editora Acta, Itajubá-MG, 2012.
9. VIANA, A.N.C., Leite, F., Flessak, I As Bombas Funcionando como Turbinas – Estudo de Caso da CGH Sagrado Coração de Jesus, XXIII Conferência de Pequenas Centrais Hidrelétricas – Mercado e Meio Ambiente, Curitiba-PR, Agosto de 2019.
10. _____ Relatório Técnico – Ensaio de Rendimento com Grupo Gerador com BFT – CGH Sagrado Coração de Jesus, Ponte Serrada, dezembro de 2019.
11. _____ Relatório Técnico – Ensaio de Rendimento com Grupo Gerador com BFT – CGH São João, Carambei-PR, maio de 2021.