

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA**

**Microgeração em Sistemas de Abastecimento de  
Água**

Gustavo Meirelles Lima

Orientador: Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana

2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA**

Gustavo Meirelles Lima

**Microgeração em Sistemas de Abastecimento de  
Água**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia da Energia como requisito parcial à  
obtenção do título de *Mestre em Engenharia da Energia*

**Área de Concentração:** Exploração do Uso Racional de  
Recursos Naturais e Energia

**Orientador:** Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana

Itajubá

2013

# UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA

Gustavo Meirelles Lima

### Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água

Dissertação aprovada por banca examinadora em 07 de janeiro de 2013, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Energia*.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana (Orientador:)

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Dr. Roberto Alves de Almeida

Itajubá

2013

*À minha mãe, Suzana Monteiro Meirelles, e minha avó, Mariza Vasquez Monteiro Meirelles, por me darem a possibilidade de ter chegado até aqui.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Augusto Nelson Carvalho Viana, pela orientação e confiança na realização deste trabalho e pela amizade sincera.

Aos colegas e amigos de trabalho Júlio César dos Santos, Artino Quintino da Silva Filho, Renato Swerts e Keila Cristina Fernandes de Oliveira, pela ajuda nos trabalhos e pelo companheirismo.

À todos os meus familiares e amigos, sempre presentes nos momentos difíceis.

Ao SAAE Cruzeiro e à concessionária Águas Guariroba por colocarem à disposição suas instalações para a realização do estudo.

À CAPES, pelo apoio financeiro através de bolsa de mestrado, possibilitando o desenvolvimento da pesquisa.

## RESUMO

O uso racional de energia ganha cada vez mais importância no cenário mundial, tanto pelo seu valor econômico quanto por seu valor ambiental. Em sistemas de abastecimento de água, os maiores consumidores de energia são as estações elevatórias e, portanto, são as unidades do sistema onde há maior preocupação em realizar estudos de eficiência energética. Porém, muitos sistemas se beneficiam de sua 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. Além disso, estes sistemas já possuem componentes básicos de uma central hidrelétrica, como válvulas e conduto forçado, o que facilita a implantação de uma microcentral. Entretanto, para que esta energia possa ser aproveitada de forma adequada, é necessário conhecer o funcionamento do sistema, para que o fornecimento de água não seja prejudicado. Neste trabalho são realizados estudos em três diferentes sistemas, buscando definir uma metodologia para avaliar o potencial energético em sistemas de abastecimento de água utilizando de bombas funcionando como turbina. Além disso, foram realizados ensaios laboratoriais para avaliar o desempenho da BFT nas diferentes condições hidráulicas encontradas.

**Palavras-chave:** fontes renováveis de energia, eficiência energética, microgeração, bombas funcionando como turbina.

## ABSTRACT

Sustainable use of energy importance increase all over the world, because of its economic or environmental value. In water supply systems the major energy consumers are the pumping stations. That is why they are the units of the system where there is greater concern in realizing energy efficiency studies. However, many systems are benefited from their privileged topography, adducting and distributing water by gravity, avoiding energy costs in pumping stations. In the other hand, all the available energy is dissipated, both in pressure reducing valves and reservoirs. Therefore, all the available energy that could be used is wasted. Besides, these systems already have the basic components of a hydroelectric plant, such as the valves and penstock, simplifying the deployment of a micro-hydropower plant. However, it is necessary to understand the operation of the system to use this energy properly, without interfering in water supply. In this work three different systems are studied to define a methodology to evaluate the energy potential in water supply systems using pumps as turbines. In addition, laboratory tests were conducted to evaluate the PAT performance in different hydraulic conditions.

**Keywords:** renewable energy, energy efficiency, microgeneration, pumps as turbines.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA POR ANO E DO TOTAL EM OPERAÇÃO EM TODO O MUNDO (FONTE: EPIA, 2012). .....	6
FIGURA 2. SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA. ....	9
FIGURA 3. LIMITES DE NÍVEIS EM UM RESERVATÓRIO. ....	11
FIGURA 4. DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO ECONÔMICO DE UMA ADUTORA. ....	12
FIGURA 5. RELAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZAMENTO COM A PRESSÃO (FONTE: WRC, 1985). ....	14
FIGURA 6. GRÁFICO PARA VERIFICAÇÃO DE CAVITAÇÃO NA VRP (FONTE: CATÁLOGO DA WATTS, 1996). ....	18
FIGURA 7. ESQUEMA HIDRÁULICO TÍPICO DE MONTAGEM DA VRP COM HIDRÔMETRO (FONTE: SABESP, 1998). ....	19
FIGURA 8. COMPARAÇÃO ENTRE A OPERAÇÃO DE UMA BOMBA COM SUA OPERAÇÃO COMO TURBINA. ....	21
FIGURA 9. DISTRIBUIÇÃO DOS CUSTOS DE INVESTIMENTO PARA CENTRAIS DE PEQUENO E GRANDE PORTE. ....	21
FIGURA 10. PRÉ-SELEÇÃO DA BFT (FONTE: CHAPALLAZ ET AL, 1992). ....	24
FIGURA 11. RELAÇÃO ENTRE A ROTAÇÃO ESPECÍFICA COMO TURBINA E BOMBA (FONTE: CHAPALLAZ ET AL, 1992). ....	25
FIGURA 12. MÁXIMO RENDIMENTO DA BOMBA EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO ESPECÍFICA E DA VAZÃO (FONTE: CHAPALLAZ ET AL, 1992). ....	26
FIGURA 13. COEFICIENTES DE ALTURA E VAZÃO (FONTE: CHAPALLAZ ET AL, 1992). ....	26
FIGURA 14. COMPORTAMENTO DA BFT FORA DO PONTO DE MÁXIMO RENDIMENTO (FONTE: CHAPALLAZ ET AL, 1992). ....	28
FIGURA 15. ESQUEMA DAS BANCADAS DE ENSAIO: A) BFT COM TUBO DE SUCCÃO; B) BFT COM CONTROLE DE VAZÃO À JUSANTE; C) BFT EM UM <i>BY-PASS</i> . ....	29
FIGURA 16. ESQUEMA PARA CÁLCULO DA ALTURA DE QUEDA LÍQUIDA DA BFT. ....	30
FIGURA 17. CURVAS DE ALTURA DE QUEDA LÍQUIDA, RENDIMENTO DO GRUPO GERADOR E POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA PARA A BFT COM TUBO DE SUCCÃO. ....	32
FIGURA 18. CURVAS DE ALTURA DE QUEDA LÍQUIDA, RENDIMENTO DO GRUPO GERADOR E POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA PARA A BFT COM CONTROLE DE VAZÃO À JUSANTE. ....	32
FIGURA 19. COMPARAÇÃO DA ALTURA E RENDIMENTO PARA A OPERAÇÃO DA BFT COM TUBO DE SUCCÃO E COM CONTROLE DE VAZÃO À JUSANTE. ....	33

FIGURA 20. COMPARAÇÃO DAS CURVAS TEÓRICAS DE ALTURA E RENDIMENTO COM OS RESULTADOS DO ENSAIO.....	34
FIGURA 21. FLUXOGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA. ....	35
FIGURA 22. LOCALIZAÇÃO DE CRUZEIRO EM SÃO PAULO (FONTE: PREFEITURA MUNICIPAL DE CRUZEIRO, 2012).....	37
FIGURA 23. LOCALIZAÇÃO DAS CAPTAÇÕES, ETAs, RESERVATÓRIOS E ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DO SAAE CRUZEIRO (FONTE: GOOGLE EARTH, 2012).....	38
FIGURA 24. ESQUEMA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E LOCALIZAÇÃO DAS MCHS EM CRUZEIRO. ....	39
FIGURA 25. LOCALIZAÇÃO DE CAMPO GRANDE EM MATO GROSSO DO SUL (FONTE: PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPO GRANDE, 2012).....	39
FIGURA 26. ESQUEMA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E LOCALIZAÇÃO DA MCH EM CAMPO GRANDE.....	41
FIGURA 27. MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSOM E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM CRUZEIRO.....	42
FIGURA 28. MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO DE CAMPO GRANDE.....	43
FIGURA 29. <i>DATALOGGER</i> UTILIZADO EM CAMPO GRANDE.....	44
FIGURA 30. LOCALIZAÇÃO DOS <i>DATALOGGERS</i> NA REDE VISTA ALEGRE (FONTE: <i>GOOGLE EARTH</i> ).....	45
FIGURA 31. INSTALAÇÃO DO DGPS BASE E MÓVEL.....	46
FIGURA 32. PERFIL TRANSVERSAL E LONGITUDINAL DAS ADUTORAS. ....	46
FIGURA 33. MEDIDA DE NÍVEL D'ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE CRUZEIRO UTILIZANDO <i>DATALOGGER</i> .....	48
FIGURA 34. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DA REDE VISTA ALEGRE.....	48
FIGURA 35. INSTALAÇÃO DO MEDIDOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS PARA MONITORAMENTO DA DEMANDA NA ETA EM CRUZEIRO. ....	49
FIGURA 36. CURVA DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES ADUZIDAS EM CRUZEIRO. ....	50
FIGURA 37. CURVA DE DEMANDA MÉDIA DA ETA DE CRUZEIRO. ....	52
FIGURA 38. LOCALIZAÇÃO DO TRECHO A SER IMPLANTADA A BFT E ZONAS DE PRESSÃO DA REDE VISTA ALEGRE SEM CONTROLE DE PRESSÃO: A) MÍNIMA; B) MÉDIA; C) MÁXIMA.....	53
FIGURA 39. VARIAÇÃO DE VAZÃO NO SETOR E PRESSÃO NO NÓ CRÍTICO. ....	54
FIGURA 40. ZONAS DE PRESSÃO DA REDE VISTA ALEGRE UTILIZANDO UMA BFT PARA CONTROLE DE PRESSÃO: A) MÍNIMA; B) MÉDIA; C) MÁXIMA.....	55

FIGURA 41. COMPARAÇÃO DAS PRESSÕES NO PONTO MAIS CRÍTICO DA REDE E POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA UTILIZANDO UMA BFT. ....	55
FIGURA 42. ZONAS DE PRESSÃO DA REDE VISTA ALEGRE UTILIZANDO DUAS BFT PARA CONTROLE DE PRESSÃO NO PERÍODO DE PRESSÃO MÁXIMA.....	56
FIGURA 43. COMPARAÇÃO DAS PRESSÕES NO PONTO MAIS CRÍTICO DA REDE.....	57
FIGURA 44. CURVA DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES ADUZIDAS EM CAMPO GRANDE.....	59
FIGURA 45. VARIAÇÕES DA VAZÃO ADUZIDA E DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO RG NO DIA DE MENOR CONSUMO.....	60
FIGURA 46. VARIAÇÕES DA VAZÃO ADUZIDA E DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO RG APÓS A OTIMIZAÇÃO.....	62

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. EVOLUÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE (FONTE: EPIA, 2012).....	6
TABELA 2. TARIFAS DIFERENCIADAS PARA INCENTIVO DA MICROGERAÇÃO EM PORTUGAL (FONTE: NASCIMENTO, 2008).....	7
TABELA 3. SELEÇÃO DO DIÂMETRO DA VRP (FONTE: CATÁLOGO DA WATTS, 1996).....	17
TABELA 4. DIMENSÕES PADRÃO PARA CAIXAS DE VRP (FONTE: SABESP, 1998). ....	19
TABELA 5. RESULTADOS DO ENSAIO REALIZADO NA BFT COM TUBO DE SUCCÃO. ....	31
TABELA 6. RESULTADOS DO ENSAIO REALIZADO NA BFT COM CONTROLE DE VAZÃO À JUSANTE. ....	32
TABELA 7. RESULTADOS DO ENSAIO REALIZADO NA BFT EM UM <i>BY-PASS</i> . ....	34
TABELA 8. TARIFAS UTILIZADAS PARA REALIZAR A ANÁLISE ECONÔMICA DAS MICROCENTRAIS. ....	49
TABELA 9 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A SELEÇÃO DAS BFTs DA ETA AVELINO JÚNIOR. ....	51
TABELA 10. INVESTIMENTOS DA MICROCENTRAL DA ETA DE CRUZEIRO.....	52
TABELA 11. RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA DA MICROCENTRAL DA ETA CRUZEIRO. ..	53
TABELA 12 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A SELEÇÃO DA BFT DA REDE VISTA ALEGRE. ....	54
TABELA 13 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A SELEÇÃO DA BFT DA REDE VISTA ALEGRE PARA O PERÍODO DE MAIOR PRESSÃO. ....	56
TABELA 14. INVESTIMENTOS DA MICROCENTRAL DA REDE VISTA ALEGRE DE CRUZEIRO.....	58
TABELA 15. RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA DA MICROCENTRAL DA REDE VISTA ALEGRE DE CRUZEIRO. ....	58
TABELA 16. RESULTADOS OBTIDOS PARA A OTIMIZAÇÃO DA VAZÃO ADUZIDA AO RESERVATÓRIO RG.....	61
TABELA 17. RESULTADOS OBTIDOS PARA A SELEÇÃO DA BFT EM CAMPO GRANDE. ....	62
TABELA 18. INVESTIMENTOS DA MICROCENTRAL DE CAMPO GRANDE.....	63
TABELA 19. RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA DE CAMPO GRANDE.....	63

**LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BFT – Bomba Funcionado como Turbina

ETA – Estação de Tratamento de Água

GPV – Válvula Genérica

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

TIR – Taxa Interna de Retorno

VRP – Válvula Redutora de Pressão

WRC – Water Research Centre

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\Delta H$  [m] – perda de carga
- $\Delta p$  [m] - perda de carga da VRP totalmente aberta
- $\varepsilon$  [m] – rugosidade absoluta
- $\eta_c$  [%] – rendimento do grupo gerador
- $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – massa específica da água
- $C_H$  [1] - coeficiente de altura
- $C_Q$  [1] - coeficiente de vazão
- $C_v$  [m<sup>3</sup>/h] - coeficiente de perda de carga relativo da VRP a vazões
- $D$  [m] – diâmetro da tubulação
- $f$  [1] – fator de atrito da tubulação
- $g$  [m/s<sup>2</sup>] – aceleração da gravidade
- $H$  [m] – altura de queda líquida da BFT
- $H_{ob}$  [m] - altura referente às velocidades síncronas
- $H_b$  [m] - altura da bomba que será utilizada como turbina
- $H_t$  [m] - altura disponível no aproveitamento (da BFT)
- $I_v$  [%] – índice de vazamentos em relação à vazão aduzida ao setor;
- $L_{eq}$  [m] – comprimento equivalente da tubulação
- $m$  [1] – coeficiente de vazamento
- $n_{ob}$  [rpm] - velocidade da BFT
- $n_b$  [rpm] - velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante
- $n_{qt}$  [1] - rotação específica da BFT no Sistema Técnico
- $n_{qb}$  [1]- rotação específica da bomba
- $n_t$  [rpm] - rotação da BFT
- $p_1$  [m] – pressão normal
- $p_2$  [m] – pressão reduzida
- $p_1/\rho \cdot g$  [m] – pressão na entrada da turbina
- $p_2/\rho \cdot g$  [m] – pressão na saída da turbina
- $p_m$  [m] – pressão média noturna
- $P_h$  [kW] – potência hidráulica
- $P_{el}$  [kW] – potência elétrica gerada
- $Q$  [m<sup>3</sup>/h] - vazão
- $Q_{ob}$  [m<sup>3</sup>/s] - vazão referente às velocidades síncronas

$Q_1$  [m<sup>3</sup>/h] – vazão do vazamento normal

$Q_2$  [m<sup>3</sup>/h] – vazão do vazamento com a redução da pressão

$Q_b$  [m<sup>3</sup>/s] - vazão da bomba que será utilizada como turbina

$Q_t$  [m<sup>3</sup>/s] - vazão disponível no aproveitamento (da BFT)

$Rey$  [1] – número de Reynolds

$v$  [m/s] – velocidade do escoamento

$v_1$  [m/s] – velocidade na seção de entrada da BFT

$v_2$  [m/s] – velocidade na seção de saída da BFT

$z_1$  [m] – cota de posição na entrada da BFT

$z_2$  [m] – cota de posição na saída da BFT

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. MICROGERAÇÃO E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....	3
2.1.1. <i>Vantagens da Geração Distribuída</i> .....	3
2.1.2. <i>Dificuldades da Geração Distribuída</i> .....	4
2.1.3. <i>Modelos de Incentivo</i> .....	4
2.1.4. <i>Exemplos de Geração Distribuída</i> .....	5
2.1.5. <i>Microgeração no Brasil</i> .....	7
2.2. SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA .....	8
2.2.1. <i>Captação</i> .....	9
2.2.2. <i>Estação de Tratamento</i> .....	9
2.2.3. <i>Estação Elevatória</i> .....	10
2.2.4. <i>Reservatórios</i> .....	10
2.2.5. <i>Aduotoras</i> .....	12
2.2.6. <i>Rede de Distribuição</i> .....	12
2.3. CONTROLE DE PRESSÃO.....	13
2.3.1. <i>Válvulas Redutoras de Pressão</i> .....	15
2.4. BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA .....	20
2.4.1. <i>Método de Seleção Proposto por Chapallaz</i> .....	23
2.4.2. <i>Ensaio Laboratoriais</i> .....	28
2.4.2.1. <i>BFT com Tubo de Sucção</i> .....	31
2.4.2.2. <i>BFT com Controle de Vazão à Jusante</i> .....	32
2.4.2.3. <i>BFT em um by-pass</i> .....	34
3. METODOLOGIA.....	35
3.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL .....	37
3.1.1. <i>SAAE Cruzeiro – SP</i> .....	37
3.1.2. <i>Águas Guariroba (Campo Grande – MS)</i> .....	39
3.2. OBTENÇÃO DOS DADOS .....	41
3.2.1. <i>Vazão</i> .....	42
3.2.2. <i>Pressão</i> .....	43
3.2.3. <i>Nível d'água</i> .....	47

3.2.4. <i>Cotas</i> .....	48
3.2.5. <i>Potência Elétrica</i> .....	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1. SAAE CRUZEIRO .....	50
4.1.1. <i>ETA Avelino Júnior</i> .....	50
4.1.2. <i>Rede Vista Alegre</i> .....	53
4.2. CAMPO GRANDE.....	58
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	64
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66

# 1. INTRODUÇÃO

Devido às questões econômicas e ambientais o setor energético passou a procurar novas formas de produção de energia. Uma das alternativas encontradas foi realizar a produção em pequena escala, próxima ao local de consumo. Este tipo de produção é conhecido por microgeração ou geração distribuída. Atualmente ainda existem barreiras de ordem técnica, econômica e regulatória que dificultam a implantação destas microcentrais.

Entretanto a microgeração pode trazer grandes benefícios a diferentes setores da economia, desde que a energia produzida seja consumida localmente. Estes benefícios podem ser maximizados quando a fonte de energia está sendo desperdiçada no processo. No caso de sistemas de abastecimento de água esta perda é resultado do controle de pressão nas tubulações, seja ela através de válvulas redutoras de pressão ou reservatórios.

Os custos da geração de energia nestes casos são reduzidos, pois diversos componentes necessários já existem no local, tais como tubulações, válvulas e câmara de carga. Porém, devido à baixa potência disponível encontrada nestes locais, o custo dos equipamentos de geração, representados pelo conjunto turbina e gerador, pode inviabilizar o projeto. Uma alternativa encontrada para reduzir o custo é utilizar uma bomba funcionando como turbina (BFT) e o motor de indução como gerador.

Com o objetivo de definir uma metodologia para a avaliação do potencial energético em sistemas de abastecimento de água, foram realizados estudos em três diferentes sistemas. Em todos os casos foi considerada a utilização de bombas funcionando como turbina, com o objetivo de melhorar a viabilidade econômica da implantação de uma microcentral. O primeiro caso apresenta o potencial de uma adutora de água bruta por gravidade. O segundo mostra o estudo da substituição de válvulas redutoras de pressão (VRPs) por BFTs, tanto para controle de pressão na rede quanto para geração de energia. Por fim, é apresentado o estudo em uma adutora de água tratada por gravidade que abastece um reservatório de distribuição. Em cada um dos casos é definida uma metodologia de estudo diferente, considerando as particularidades de cada um dos sistemas, de forma que o abastecimento de água não seja prejudicado. Também foram realizados testes em laboratório para avaliar o comportamento da BFT nas diferentes condições hidráulicas encontradas nos sistemas estudados, verificando assim a viabilidade técnica das microcentrais.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da bibliografia estudada, definindo os conceitos de microgeração, sistemas de abastecimento de água e seus diversos componentes, a

importância do controle de pressão na rede de abastecimento e o conceito da operação de bombas funcionando como turbinas e seu método de seleção. Também são apresentados os ensaios laboratoriais realizados, mostrando o procedimento de ensaio e as comparações entre os resultados obtidos em diferentes condições hidráulicas com os valores teóricos esperados.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta para avaliação do potencial energético em sistemas de abastecimento de água. Também são descritos os locais onde foram realizados os estudos de caso e o levantamento dos parâmetros necessários para determinação do potencial existente e avaliação de sua viabilidade econômica.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos para os estudos de caso realizados, mostrando as particularidades de cada um dos sistemas e buscando alternativas para viabilizar e otimizar cada um dos projetos.

No capítulo 5 são feitas as considerações finais, discutindo e analisando os resultados obtidos.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. MICROGERAÇÃO E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Atualmente, no Brasil, o desenvolvimento do setor elétrico se baseia na centralização da produção de energia em grandes usinas, sejam elas hidrelétricas, térmicas ou eólicas, passando por linhas de transmissão, que podem atingir grandes distâncias, chegando até aos centros de carga, onde é distribuída entre residências, comércio e indústrias. De acordo com Walter et al (2000) este modelo tem sido adotado devido aos seguintes fatores:

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

Este modelo vem sendo discutido devido à questões técnicas e ambientais. Além disso, o crescimento da população e o desenvolvimento econômico contínuos exigem uma oferta de energia cada vez maior, ou seja, a implantação de novas usinas. Neste contexto surge o conceito da geração distribuída. Não há um consenso quanto à potência nem às fontes de energia incluídas na geração distribuída, mas grande parte das definições estabelece que a unidade geradora seja de pequeno porte e que esteja próxima ao centro de carga (Turkson e Wohlgemuth, 2001; Dias et al, 2005; Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE, 2012). Assim, a produção de energia passa a ser feita por operadores independentes e consumidores finais, podendo ou não ser ligada diretamente à rede.

#### **2.1.1. Vantagens da Geração Distribuída**

Segundo Rodríguez (2002) e Moreira (2010) a geração distribuída traz benefícios tanto para o consumidor final quanto para as concessionárias de energia, destacando-se:

- ✓ O consumidor poderá reduzir suas despesas, caso a eletricidade gerada tenha um custo menor do que o de suprimento convencional de energia elétrica;
- ✓ Ideal para locais com baixa densidade populacional ou de difícil acesso da rede elétrica;
- ✓ Redução das perdas nas linhas de transmissão e distribuição;
- ✓ Melhor planejamento de expansão da oferta de energia;

- ✓ Aumento da confiabilidade no suprimento de energia elétrica;
- ✓ Redução dos impactos ambientais;
- ✓ Aumento da autonomia e do poder de decisão dos consumidores individuais e das comunidades locais;

### **2.1.2. Dificuldades da Geração Distribuída**

Apesar de ser uma ótima alternativa para a produção de energia, existem barreiras de ordem técnica, regulatória, econômica e informativa que ainda devem ser superadas para que este modelo se desenvolva no país. Duarte (2010) e Lopes (2011) destacam os seguintes itens:

- ✓ Complexidade da operação da rede elétrica, que passa a ter fluxo bidirecional;
- ✓ Alteração nos procedimentos de operação, controle e proteção da rede de distribuição;
- ✓ Controle da tensão em períodos de baixa demanda;
- ✓ Alteração dos níveis de curto-circuito das redes;
- ✓ Aumento da distorção harmônica da rede;
- ✓ Intermitência da geração, seja pela incerteza da disponibilidade de combustível (vento, radiação solar, água, etc.) ou pela falha dos equipamentos;
- ✓ Alto custo de implantação.

### **2.1.3. Modelos de Incentivo**

De acordo com Quaglia (2010), a adoção de fontes alternativas de geração de energia era feita apenas pensando na autossuficiência energética e em fatores ambientais. Apenas estes fatores não são capazes de estimular e disseminar a microgeração. São necessários incentivos financeiros para que o investimento na microgeração apresente viabilidade econômica, estimulando o investimento nessas tecnologias. Os principais modelos de incentivo observados são:

- ✓ *Dual-metering*: o consumidor pode conectar sua unidade de geração na rede de distribuição, utilizar a energia produzida para atender sua demanda instantânea e, caso houver excedente, a concessionária é obrigada a comprá-la. De acordo com Green e Wan (1998), esta tarifa de compra é baseada nos custos evitados pela concessionária, que chega a ser de 3 a 5 vezes inferior à tarifa normal de um consumidor. Ou seja, para que o benefício seja maior, a produção deve ocorrer simultaneamente ao consumo, o que não é possível no caso de placas fotovoltaicas. Neste caso o medidor

deve ser capaz de registrar tanto a energia consumida quanto o excedente injetado na rede.

- ✓ *Net-metering*: semelhante ao dual-metering, onde a energia excedente será vendida à concessionária com base nos custos evitados. Porém, neste caso não existe a preocupação por parte do consumidor de consumir energia no momento em que ela é produzida. O balanço entre o consumo e a produção é feito ao fim do contrato, geralmente de um ano. Outra vantagem deste modelo é sua simplicidade operacional, pois é necessária apenas uma leitura do medidor, que gira em sentido contrário, caso a produção exceda o consumo.
- ✓ *Feed-in tariffs*: segundo Ackermann et al (2001), são tarifas determinadas pelo governo que as concessionárias devem pagar por cada kWh entregue à rede através de fontes renováveis de energia. De maneira geral, estas tarifas são superiores às praticadas no mercado. Este modelo é amplamente utilizado na Europa, onde há maior preocupação com os fatores ambientais.
- ✓ *Buydown*: consiste em um fundo governamental destinado à concessão de subsídios para aquisição de novas tecnologias de microgeração. Desta forma espera-se que as vendas destes equipamentos aumentem, encorajando os fabricantes a expandirem suas operações, reduzindo assim os custos de instalação.

#### **2.1.4. Exemplos de Geração Distribuída**

Os principais exemplos de geração distribuída estão relacionados com os painéis fotovoltaicos, que convertem a energia solar em energia elétrica. Diversos países adotaram políticas de incentivo para que os consumidores pudessem instalar painéis em suas residências. A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam a evolução da potência proveniente de sistemas fotovoltaicos conectada à rede.

Tabela 1. Evolução de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (Fonte: EPIA, 2012).

País	Potência Conectada [MW]											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
China	0	11	15	10	9	4	12	20	45	228	520	2.200
Europa	53	94	142	201	708	1.002	987	1.972	5.297	5.803	13.367	21.939
America	23	31	46	65	92	117	149	212	349	539	983	2.234
Ásia Pacífico	114	136	186	225	276	296	322	283	563	766	1.618	2.653
Africa e Meio-Oeste Europeu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	45	131
Resto do Mundo	88	56	80	77	29	10	105	42	76	80	284	508
<b>Total Instalado</b>	<b>278</b>	<b>328</b>	<b>469</b>	<b>578</b>	<b>1.114</b>	<b>1.429</b>	<b>1.575</b>	<b>2.529</b>	<b>6.330</b>	<b>7.437</b>	<b>16.817</b>	<b>29.665</b>

País	Potência Total Instalada [MW]											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
China	19	30	45	55	64	68	80	100	145	373	893	3.093
Europa	154	248	389	590	1.297	2.299	3.285	5.257	10.554	16.357	29.777	51.716
America	146	177	222	287	379	496	645	856	1.205	1.744	2.820	5.053
Ásia Pacífico	355	491	677	902	1.178	1.475	1.797	2.080	2.643	3.409	5.116	7.769
Africa e Meio-Oeste Europeu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	205	336
Resto do Mundo	751	807	887	964	993	1.003	1.108	1.150	1.226	1.306	1.209	1.717
<b>Total em Operação</b>	<b>1.425</b>	<b>1.753</b>	<b>2.220</b>	<b>2.798</b>	<b>3.911</b>	<b>5.341</b>	<b>6.915</b>	<b>9.443</b>	<b>15.773</b>	<b>23.210</b>	<b>40.020</b>	<b>69.684</b>

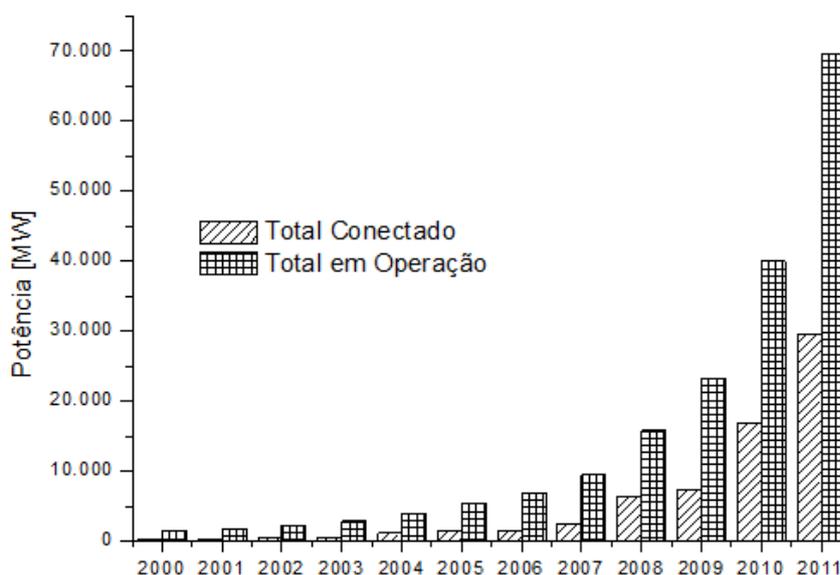


Figura 1. Evolução da potência instalada por ano e do total em operação em todo o mundo (Fonte: EPIA, 2012).

A Alemanha se destaca neste contexto, pois, desde a década de 70, com a crise do petróleo e, em seguida, com o acidente em Chernobyl, programas de incentivo às fontes renováveis de energia vêm sendo desenvolvidos. O programa de painéis fotovoltaicos teve forte crescimento a partir de 2000, quando foi determinada a *feed-in tariff*. Desde então, com

o crescimento dos sistemas fotovoltaicos, seus custos de instalação caíram 16 % (BSW, 2009). A Espanha também adotou a *feed-in tariff* para incentivar o uso da energia solar, inicialmente apenas para grandes centrais, porém seu programa só começou a dar resultados positivos quando foram incluídos sistemas de pequeno porte.

Outro exemplo de sucesso é o programa de Portugal. As tarifas adotadas são diferentes para cada tecnologia de microgeração, como mostra a Tabela 2. Desta forma, tecnologias mais caras como a solar e a eólica serão competitivas e terão um retorno tão bom quanto às outras. Espera-se que até 2015 sejam instaladas 100 minieólicas e 350 mil metros quadrados de painéis fotovoltaicos, atingindo 165 MW de potência instalada através da microgeração (Nascimento, 2008).

**Tabela 2. Tarifas diferenciadas para incentivo da microgeração em Portugal (Fonte: Nascimento, 2008).**

<b>Tecnologia</b>	<b>Tarifa [€/kWh]</b>
<b>Solar</b>	0,650
<b>Eólica</b>	0,455
<b>Hídrica</b>	0,195
<b>Cogeração e Biomassa</b>	0,195

Apesar de tudo, os casos onde se obtêm maiores benefícios através da microgeração são aqueles onde é possível a recuperação de energia de um 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's (Ramos et al, 2010), ou pela recuperação de calor (Sternlicht, 1982). Estes 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.

### **2.1.5. Microgeração no Brasil**

No Brasil a microgeração ainda está em desenvolvimento. 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, a resolução também apresenta o sistema de compensação a ser utilizado, que será o *net-metering*. Caso haja excedente, poderá ser feita a compensação em outras unidades que

sejam pertencentes ao gerador, e que também sejam atendidas pela mesma distribuidora. Este excedente também poderá ser revertido em crédito a ser utilizado nos meses subsequentes, porém, após 36 meses sem uso, eles expirarão. Todos os custos relativos à conexão e à troca do medidor de faturamento serão de responsabilidade do produtor, enquanto que eventuais ampliações ou reforços no sistema de distribuição serão de responsabilidade da concessionária. A resolução deu um prazo de 240 dias para que as concessionárias estabelecessem suas diretrizes para o acesso da microgeração, que expirou no fim de 2012. Concessionárias como a CEMIG e EDP utilizaram os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - (ANEEL, 2012) como base para estabelecerem suas regras, definindo a forma de conexão, padrões de qualidade e sistemas de proteção necessários. Devido aos prazos estabelecidos para aprovação da concessionária, as primeiras micro e minicentraís só deverão começar a se beneficiar do sistema de compensação a partir de março de 2013.

## **2.2. SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

A retirada de água da natureza em quantidade suficiente para abastecimento da população e a adequação de sua qualidade para fins de consumo requerem um complexo sistema capaz de realizar esta tarefa em qualquer momento. 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 7 unidades básicas: captação, estação de tratamento, estação elevatória, reservatórios, adutoras, rede de distribuição e ligações prediais, como mostra a Figura 2.

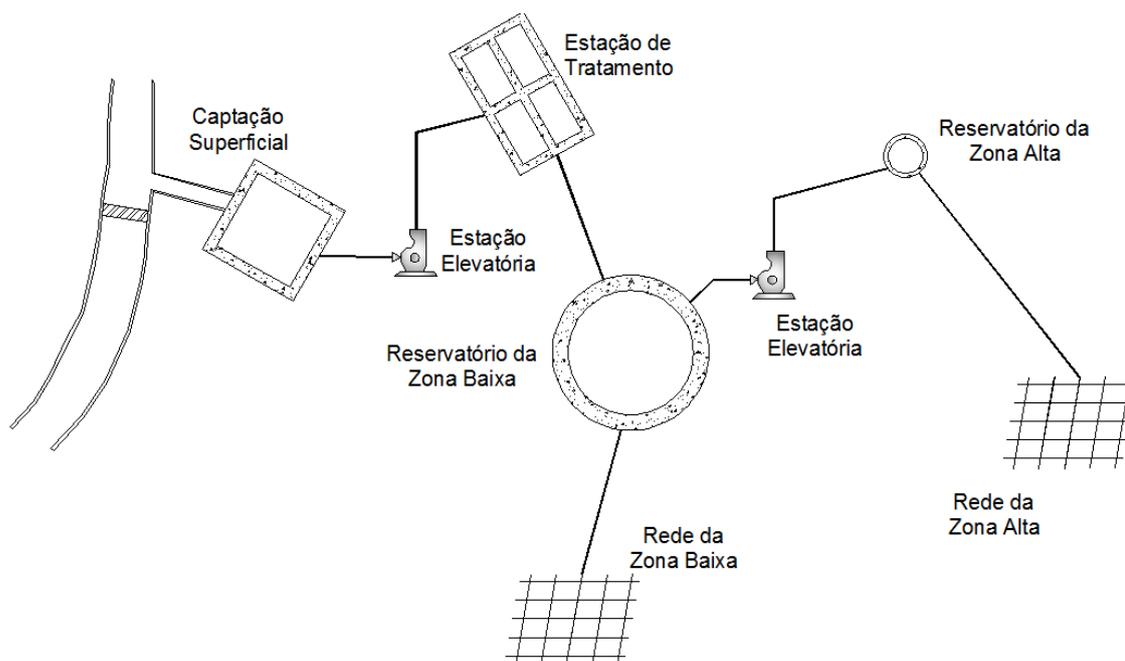


Figura 2. Sistema de abastecimento de Água.

### 2.2.1. Captação

Segundo Baptista (2000), a captação consiste de um leito de rio, um reservatório, artificial ou não, ou um poço artesiano. É composto por estruturas e dispositivos, tais como barragem, comporta e canais que auxiliam a retirada de água do manancial. As condições hidrológicas do local escolhido devem satisfazer a demanda. Caso contrário haverá a necessidade da instalação de mais de uma captação. Além disso, as condições topográficas também são de fundamental importância pois, dependendo de sua elevação com relação ao centro de consumo, pode haver a necessidade de uma estação elevatória, o que pode inviabilizar economicamente a instalação da captação devido ao alto consumo de energia. Outra característica que deve ser observada é a qualidade da água do manancial, que deve ser a melhor possível, reduzindo os gastos com tratamento.

### 2.2.2. Estação de Tratamento

A estação de tratamento é o local onde a água bruta torna-se adequada para o consumo, através da melhoria de suas características físicas, químicas e organolépticas, respeitando os parâmetros de qualidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde através da Portaria nº 518 (2004). A intensidade do tratamento depende da qualidade da água bruta

captada. No Brasil costuma-se realizar as seguintes etapas no caso de captações em mananciais superficiais:

- ✓ Clarificação: tem o objetivo de remover os sólidos presentes na água;
- ✓ Desinfecção: feita para eliminar microrganismos patogênicos;
- ✓ Fluoretação: realizada para a prevenção da cárie dentária, segundo a legislação federal (Portaria nº635/75 do Ministério da Saúde).

### **2.2.3. Estação Elevatória**

As estações elevatórias são responsáveis por cerca de 90 % do consumo de energia em sistemas de abastecimento de água (Eletrobrás, 2009). São formadas por um ou mais conjuntos motobomba, normalmente ligados em paralelo, com o objetivo de fornecer energia à água. Desta forma ela irá atingir a pressão necessária para vencer os desníveis topográficos e perdas de carga, permitindo que o abastecimento seja feito com uma pressão adequada. Em alguns locais, devido à distância ou topografia, é necessária uma estação elevatória intermediária, conhecida como *booster*, onde a bomba normalmente é instalada em linha na rede de distribuição, aproveitando assim a pressão da própria rede. Os *boosters* são muito utilizados em locais em que é feita a setorização, onde a rede é dividida de acordo com sua topografia. Gouveia et al (2011) apresenta um estudo em que mostra ser mais viável economicamente utilizar um reservatório em uma cota baixa e *boosters* para abastecer setores mais elevados da rede ao invés de utilizar um reservatório em uma cota elevada para atender toda a rede. Além disso, com a setorização as pressões na rede se mantêm dentro de uma faixa mais adequada, sem que hajam pontos com pressões elevadas, reduzindo assim o risco de rompimento das tubulações e o volume de vazamentos.

### **2.2.4. Reservatórios**

A principal função dos reservatórios em sistemas de abastecimento de água é atender às variações de consumo horário, ou seja, ele é usado para garantir que no horário de maior demanda não ocorra falta de água. Além disso, ele também serve para atender casos de emergência, como em combate à incêndios e interrupções no sistema produtor e adutor. De acordo com Gomes (2009) eles podem ser classificados de acordo com:

a) *Localização em relação à rede de distribuição:*

- ✓ De montante: localizado entre a captação e a distribuição;

✓ De jusante: localizado após a distribuição. Só recebe água nos horários de consumo mínimo;

✓ De quebra de pressão: em terrenos com desníveis acentuados;

*b) localização em relação ao nível do terreno:*

✓ Enterrado;

✓ Semi-enterrado;

✓ Apoiado;

✓ Elevado;

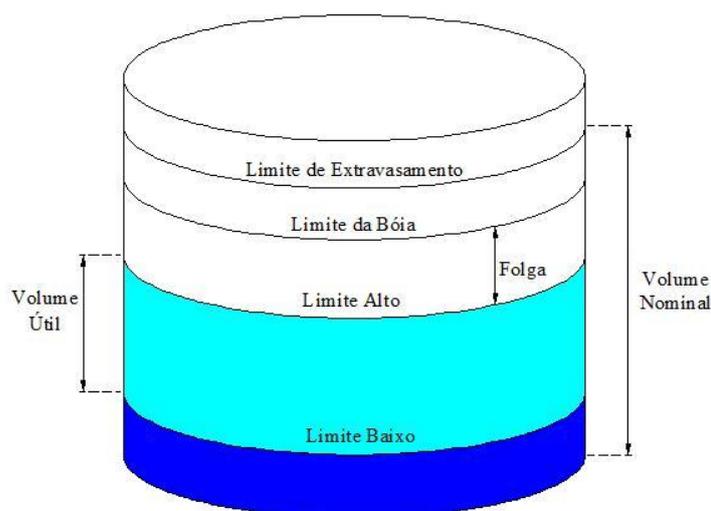
*c) material de construção:*

✓ Concreto armado: geralmente os elevados;

✓ Alvenaria: enterrados e semi-enterrados;

✓ Aço: mais utilizado nas indústrias;

Existem critérios normativos de dimensionamento de reservatórios, úteis para projetistas de sistemas. Porém, para um dimensionamento mais preciso e uma operação mais correta é fundamental conhecer a curva de demanda do dia de maior consumo, obtida preferencialmente de uma longa série de dados. Desta forma, em reservatórios de montante, é possível determinar qual o volume útil (Figura 3) necessário para suprir a demanda no horário de ponta, permitindo assim que as bombas que o alimentam sejam desligadas durante este período, reduzindo os gastos com energia.



**Figura 3. Limites de níveis em um reservatório.**

### 2.2.5. Adutoras

Segundo Sarzedas (2009), o objetivo do sistema de adução é transportar uma grande quantidade de água ao longo de grandes distâncias, em geral entre as principais instalações do sistema, como captação e ETA, ETA e reservatórios e reservatórios e rede de distribuição. Seu dimensionamento deve levar em conta aspectos econômicos. No caso de adutoras por gravidade deve ser selecionado o menor diâmetro possível para a vazão desejada. Desta forma a escolha da tubulação é feita para que todo o potencial (queda) seja convertido em perda de carga. Já em adutoras que transportam água de estações elevatórias, devem ser levados em conta, além dos gastos com a tubulação, os gastos com energia ao longo da vida útil do projeto. Assim, para diâmetros maiores o gasto com energia é menor, pois há menos perda de carga e, portanto, a potência requerida pela bomba também será menor, porém o investimento com a implantação da tubulação será maior. Assim, deve ser feita uma análise para que se encontre o custo mínimo do sistema, como mostra a Figura 4.

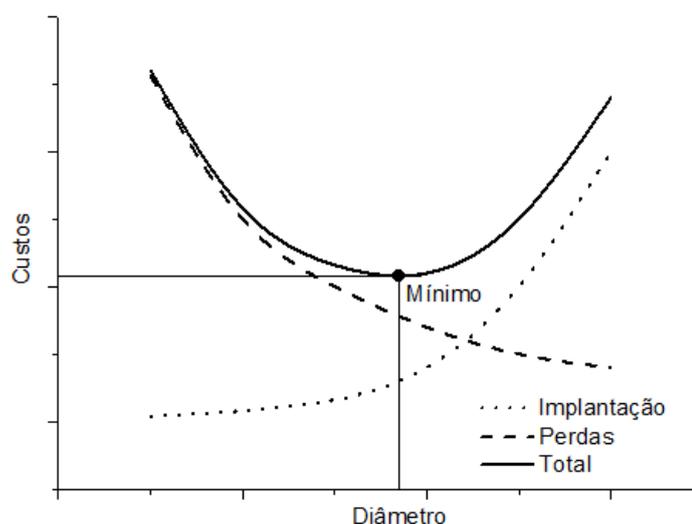


Figura 4. Determinação do diâmetro econômico de uma adutora.

### 2.2.6. Rede de Distribuição

A rede de distribuição é formada por um conjunto de tubulações com o objetivo de conduzir a água até as ligações prediais, ou seja, até o ponto final do sistema, onde o controle passa a ser feito pelo consumidor. A rede de distribuição é dimensionada de acordo com as características de demanda destes consumidores, permitindo que o abastecimento seja feito de forma contínua, com vazão e pressão adequadas. A rede de distribuição é a unidade do

sistema com maior relevância no custo de implantação, representando de 50 a 75 % do total. Além disso, a rede de distribuição é a unidade que mais sofre com o problema de vazamentos, que pode influenciar nos gastos de todas as etapas anteriores. Desta forma o controle de pressão na rede, seja pela setorização ou através de válvulas redutoras de pressão pode ser vantajoso para a economia de energia e de água do sistema.

## 2.3. CONTROLE DE PRESSÃO

O gerenciamento de pressões procura minimizar as pressões do sistema e a faixa de duração das pressões máximas, e, ao mesmo tempo, assegura os padrões mínimos de serviço para os consumidores. Estes objetivos são atingidos pelo projeto específico e setorização dos sistemas de distribuição, pelo controle de bombeamento direto na rede (*boosters*) ou pela introdução de válvulas redutoras de pressão (VRP's). Segundo Menezes (2006) o controle de pressão na rede resulta em:

- ✓ Redução do volume perdido em vazamentos, economizando recursos de água e custos associados;
- ✓ Redução da frequência de rompimento de tubulações e consequentes danos que têm reparos onerosos, minimizando também as interrupções de fornecimento e os perigos causados ao público usuário de ruas e estradas;
- ✓ Serviço com pressões mais estabilizadas ao consumidor, diminuindo a ocorrência de danos às instalações internas dos usuários até a caixa d'água (tubulações, registros e bóias);
- ✓ Redução dos consumos relacionados com a pressão da rede, como por exemplo, a rega de jardins através do uso de aspersores.

Diversos estudos comprovam estes benefícios. Viegas (2001) realizou um estudo na cidade de Santa Maria - RS onde havia um alto índice de rompimento de tubulações. A solução adotada foi a instalação de VRP's para controle da pressão. Com isto o número de rompimentos anual caiu cerca de 50 %, além de reduzir as perdas de água. Já Reis e Cheung (2006) utilizaram algoritmos genéticos para determinar as condições ótimas de operação de uma VRP, enquanto que Marunga et al (2006) utilizaram uma VRP para controlar a pressão de serviço, obtendo uma redução de 25 % nas perdas por vazamento na cidade de Mutare, no Zimbábue.

O estudo realizado pela Water Research Centre – WRC - (1985), onde diferentes experiências de controle de pressão foram avaliadas, propõe a relação da pressão média noturna em uma zona do sistema com seu índice de vazamentos. Neste estudo obteve-se a curva empírica da Figura 5 e a Equação 1, que podem ser utilizadas para estimar a redução de vazamentos de acordo com a redução da pressão.

$$I_v = 0,5 \cdot p_m + 0,0042 \cdot p_m^2 \quad (1)$$

onde:

$I_v$  [%] – índice de vazamentos em relação à vazão aduzida ao setor;

$p_m$  [m] – pressão média noturna.

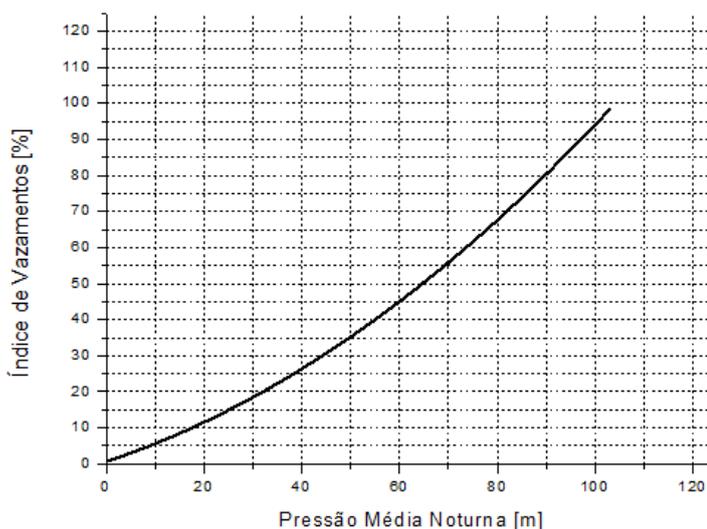


Figura 5. Relação do índice de vazamento com a pressão (Fonte: WRC, 1985).

Para converter as taxas de vazamentos noturno em quantidades diárias é necessário considerar as variações de pressão que ocorrem ao longo do período de 24 horas, pois à noite as pressões são mais elevadas que durante o dia. Para permitir essa conversão recomenda-se definir um fator noite/dia para determinar o volume de vazamento diário. Segundo os estudos da WRC (1985), na Inglaterra este fator é da ordem de 20 horas, ou seja, é como se o vazamento noturno ocorresse por 20 horas e nas 4 horas restantes não houvesse vazamentos.

Novas pesquisas vêm sendo desenvolvidas e novos conceitos empíricos estabelecidos, atualizando os resultados obtidos pela WRC. Verificou-se que tubos de materiais plásticos têm uma deformação na área de vazamento (furo ou trinca) de acordo com o aumento da

pressão. Com este aumento de área há um conseqüente aumento do volume do vazamento. Os resultados experimentais têm chegado à seguinte relação entre pressão e vazão:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^m \quad (2)$$

onde:

$Q_1$  [m<sup>3</sup>/h] – vazão do vazamento normal;

$Q_2$  [m<sup>3</sup>/h] – vazão do vazamento com a redução da pressão;

$p_1$  [m] – pressão normal;

$p_2$  [m] – pressão reduzida;

$m$  [1] - 0,5 para tubos rígidos, 1,5 para tubos plásticos e 1,15 na média geral da rede de distribuição.

### 2.3.1. Válvulas Redutoras de Pressão

A principal função das VRP's é limitar a pressão em sua saída, independentemente da pressão de montante. Seu funcionamento consiste no fechamento de uma válvula através do acionamento de um dispositivo de controle quando a pressão de jusante for elevada, aumentando assim a perda de carga localizada no sistema e reduzindo a pressão de jusante ao valor determinado. Caso ocorra o contrário, ou seja, a pressão de jusante estiver muito baixa, o dispositivo de controle abre a válvula, reduzindo a perda de carga localizada até que a pressão de trabalho determinada seja atingida. Portanto a operação da VRP pode ocorrer de três formas:

- ✓ Ativa: ocorre quando a VRP provoca uma perda de carga para limitar a pressão de jusante;
- ✓ Passiva: ocorre quando a pressão de montante é menor ou igual à pressão mínima de trabalho estabelecida. Neste caso a VRP opera totalmente aberta, minimizando a perda de carga localizada;
- ✓ Como válvula de retenção: ocorre quando a pressão de jusante é maior que a de montante. Neste caso a VRP fecha totalmente, evitando o refluxo.

O controle das VRP's pode ser feito mecânica ou eletronicamente, permitindo realizar o controle para um único valor de pressão ou para diferentes situações de consumo, o que permite uma gestão mais eficiente da pressão de serviço e um melhor desempenho hidráulico do sistema. Basicamente são quatro os sistemas de funcionamento das VRP's:

- ✓ Carga constante: qualquer que seja a pressão e vazão de montante a VRP reduz a pressão de jusante a um valor constante determinado;
- ✓ Queda constante: qualquer que seja a pressão e vazão de montante a VRP introduz uma perda de carga constante, deixando que a pressão de jusante varie de acordo com a pressão de montante, porém sempre com a mesma diferença de carga;
- ✓ Carga constante ajustável: qualquer que seja a pressão e vazão de montante a VRP reduz a pressão de jusante a um valor constante determinado, porém este valor varia em intervalos de tempo pré-definidos. O mais comum é utilizar dois valores: um para o período diurno e outro para o noturno;
- ✓ Carga variável: neste caso a pressão de jusante é ajustada automaticamente em função da vazão ou da variação de pressão em pontos críticos da rede.

O dimensionamento de uma VRP é feito com base nos seguintes parâmetros da rede no ponto de instalação:

- ✓ Pressões máxima e mínima de entrada;
- ✓ Pressão de saída;
- ✓ Vazão máxima horária;
- ✓ Vazão mínima horária.

Cada fabricante tem sua metodologia para o dimensionamento de sua válvula, mas, de maneira geral, a velocidade mínima deve ser de 1,2 m/s e a máxima de 7,5 m/s. Caso seja mantida uma vazão constante, esta não deve ter velocidade superior a 6 m/s. A escolha do diâmetro da válvula deve ser feita de acordo com os parâmetros fornecidos pelo fabricante, como mostra a Tabela 3, retirada do catálogo da Watts (1996).

O diâmetro escolhido deve ser aquele com a vazão máxima nominal igual ou maior que a vazão máxima horária do local a ser controlado. A vazão mínima nominal não poderá ser maior que a vazão mínima horária. Caso isso ocorra, deve-se utilizar uma segunda VRP de diâmetro menor (dimensionada para operar com as vazões mínimas) em paralelo à VRP principal, onde a somatória das vazões máximas seja superior à vazão máxima requerida.

Tabela 3. Seleção do diâmetro da VRP (Fonte: catálogo da Watts, 1996).

Diâmetro Nominal		Vazão [m <sup>3</sup> /h]		C <sub>v</sub> [m <sup>3</sup> /h]
[mm]	[pol.]	Mínima	Máxima*	
32	1 1/4"	3	26	8,40
38	1 1/2"	5	36	9,09
50	2"	8	59	12,49
65	2 1/2"	14	84	21,58
80	3"	22	129	28,39
100	4"	34	227	49,97
150	6"	76	522	104,48
200	8"	136	886	190,79
250	10"	212	1363	317,98
300	12"	305	1953	392,93
350	14"	416	2385	522,40
400	16"	543	3180	670,03

\* Para vazões constantes utilizar um valor 25 % menor.

É necessário verificar se a válvula escolhida não produz uma perda de carga superior à perda desejada (pressão de entrada mínima menos a pressão de saída) durante a vazão máxima horária. A perda de carga a ser produzida pela válvula totalmente aberta é determinada através da Equação 3:

$$\Delta p = \left( \frac{Q}{C_v} \right)^2 \quad (3)$$

onde:

$\Delta p$  [m] - perda de carga da válvula totalmente aberta;

$Q$  [m<sup>3</sup>/h] - vazão;

$C_v$  [m<sup>3</sup>/h] - coeficiente de perda de carga relativo a vazões.

Caso a perda de carga da válvula seja superior ou fique muito próxima da perda desejada, deve-se escolher uma válvula com diâmetro nominal imediatamente superior e recalculer a perda de carga. Caso os valores fiquem muito próximos, é preciso verificar a perda de carga dos demais elementos do sistema.

Ainda é necessário verificar o risco de cavitação da válvula. Os fabricantes fornecem curvas como a apresentada na Figura 6, onde é obtido o ponto de interseção da pressão máxima de entrada da VRP com a pressão de saída requerida. Caso este ponto caia dentro da zona de cavitação, é sinal de que haverá, além de ruídos, danos físicos à válvula. Nesse caso

deve-se prever instalação em série de válvulas de mesmo diâmetro, reduzindo a queda de pressão em cada uma delas, diminuindo assim o risco de cavitação. Outra opção é reavaliar a concepção do sistema, criando-se mais de um plano piezométrico na área onde se pretende reduzir a pressão.

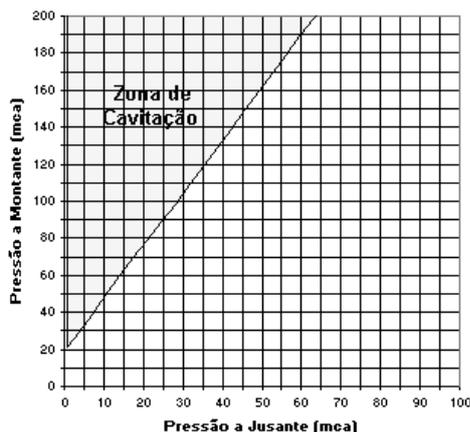


Figura 6. Gráfico para verificação de cavitação na VRP (Fonte: catálogo da Watts, 1996).

A instalação de uma VRP não é simples, e requer o uso de diferentes acessórios. Normalmente são feitas as seguintes etapas:

- ✓ Execução das caixas;
- ✓ Execução do “*by-pass*” e instalação de registros gaveta;
- ✓ Instalação da VRP, acessórios e do filtro a montante;
- ✓ Instalação de hidrômetro e de controlador, quando for necessário.

A inclusão de um filtro a montante da VRP é fundamental para garantir a operacionalidade da válvula, evitando entupimentos, que trariam problemas no controle da pressão, além de danificar o equipamento. Também é recomendável a instalação de uma ventosa na cabeça da válvula em locais onde há intermitência no abastecimento, pois se houver entrada de ar na cabeça da válvula o sistema hidráulico operacional será afetado.

O hidrômetro, necessário para utilização de modulador por vazão, deve ser instalado 12 diâmetros a jusante da primeira conexão e 5 diâmetros a montante da primeira conexão, para garantir a sua precisão.

A SABESP (1998) recomenda que as dimensões das caixas de válvulas possuam os valores mínimos da Tabela 4. A caixa I é utilizada para abrigar o conjunto de peças para uma VRP sem modulação por vazão ou uma com modulação de vazão, que abrigará apenas o hidrômetro, a VRP e a válvula de bloqueio de jusante. A caixa II é utilizada para abrigar a

válvula de bloqueio de montante e o filtro, sendo somente necessária no caso de VRP modulada por vazão.

Tabela 4. Dimensões padrão para caixas de VRP (Fonte: SABESP, 1998).

Diâmetro [mm]	Dimensão	Caixa I [mm]	Caixa II [mm]
100 a 200	A (largura)	1200	1200
	B (comprimento)	4000	2700
	C (profundidade)	2000	2000
250 a 400	A (largura)	1500	1500
	B (comprimento)	6000	6000
	C (profundidade)	2000	2000

A Figura 7 mostra um esquema da instalação de uma VRP dotada de controlador de vazão, onde é necessária a instalação de um hidrômetro.

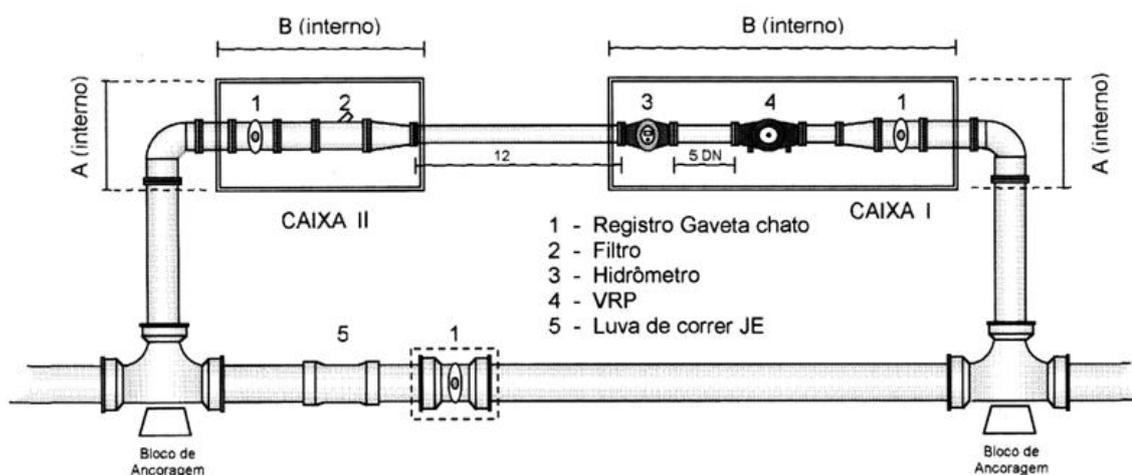


Figura 7. Esquema hidráulico típico de montagem da VRP com hidrômetro (Fonte: SABESP, 1998).

Antes de começar a operar a VRP normalmente é necessário seguir o seguinte procedimento de medição para verificar o comportamento da VRP:

a) *Medições com a válvula aberta*

Estas medições devem ser realizadas durante um período mínimo de 24 horas. É necessário medir a vazão de entrada na VRP e as pressões de entrada e saída. Também é necessário fazer a medição de pressão nos pontos críticos da rede, geralmente pontos altos onde há menor pressão, e também em um ponto que represente a pressão média noturna. Nessa campanha, a VRP deve ficar em sua posição totalmente aberta.

Os seguintes dados devem ser considerados:

- ✓ Vazão total entrando na área de influência da VRP;

- ✓ Vazão mínima noturna;
- ✓ Pressão mínima e máxima no ponto crítico;
- ✓ Cálculo da vazão de vazamento;
- ✓ Pressão média noturna da região.

*b) Teste controlado com pressões de saída reduzidas*

Primeiramente deve-se regular a VRP para reduzir a pressão máxima do sistema em estágios de aproximadamente 5 m e monitorar as vazões e as pressões por 24 horas. Em seguida, obter os resultados como mostrado no item anterior. Deve-se repetir o teste até que a pressão desejada no ponto crítico seja atingida. Todas as etapas serão supervisionadas de forma a confirmar os resultados das características estimadas nos estudos preliminares.

*c) Teste adicional para válvulas com modulação pela vazão*

No caso de uma válvula com modulação pela vazão, todos os testes acima citados precisam ser efetuados com o modulador de vazão desligado. Depois a modulação deve ser aplicada com pelo menos 24 horas de monitoramento. É possível reduzir a pressão com a modulação pela vazão para atingir a pressão mínima desejada (geralmente entre 10 e 15 mca) no ponto crítico do sistema. Depois o monitoramento é feito novamente, durante 24 horas.

*d) Pré-operação das instalações e medição de performance do sistema*

A pré-operação de cada VRP sempre que possível deve ser feita em três etapas:

- ✓ Redução inicial de pressão, seguida de monitoramento das pressões e vazão;
- ✓ Segunda diminuição de pressão, seguida de monitoramento das pressões e vazão;
- ✓ Ajuste da pressão desejada, seguido de monitoramento das pressões e vazão, por duas semanas, com eventuais ajustes finos do perfil de pressão a jusante da VRP.

## **2.4. BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA**

Apesar de desempenharem processos opostos, quando comparados os aspectos construtivos e hidráulicos, as bombas e turbinas hidráulicas assemelham-se. O mesmo acontece quando a comparação é feita entre máquinas elétricas motoras e geradoras. A Figura 8 apresenta uma comparação entre uma bomba, onde é fornecida energia mecânica para que esta seja convertida em energia hidráulica (máquina geratriz), e sua operação como turbina, onde ela recebe energia hidráulica, convertendo-a em energia mecânica (máquina motriz).

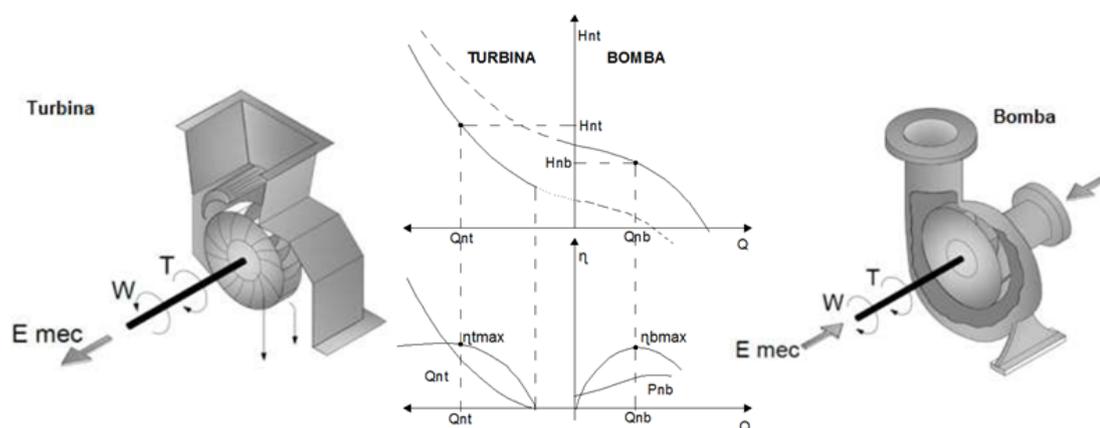


Figura 8. Comparação entre a operação de uma bomba com sua operação como turbina.

De acordo com Ricardo (2007) a grande vantagem da utilização de bombas funcionando como turbina é seu custo reduzido, que é de 2 a 3 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. Por esta razão, países como EUA, Alemanha e França vêm utilizando bombas e motores para gerar energia elétrica em pequenos aproveitamentos (Viana et al, 2004). De acordo com Chapallaz et al (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, como mostra a Figura 9.

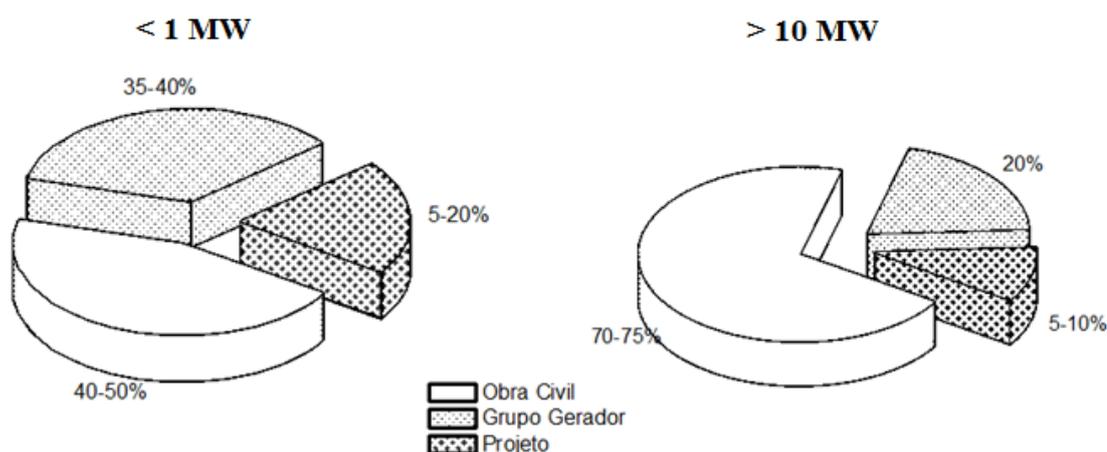


Figura 9. Distribuição dos custos de investimento para centrais de pequeno e grande porte.

Além do baixo custo, Willians (2003) ressalta outras vantagens de se utilizar BFT's para geração de energia:

- ✓ Maior disponibilidade de 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;
- ✓ Instalação mais simples;
- ✓ A bomba e o motor podem ser adquiridos em conjunto, com acoplamento direto, reduzindo as perdas na transmissão de potência através de correias, por exemplo.

Entretanto, ao contrário das turbinas convencionais, as bombas não possuem nenhum dispositivo para controle da vazão para que a rotação se mantenha praticamente constante, mesmo que haja variação da demanda. Assim, é necessário que a BFT opere com vazão e altura constantes. Além disso, Chapallaz et al (1992) ainda levanta as seguintes questões:

- ✓ O rotor de uma 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 BFT's estão mais sujeitas a sofrerem com a cavitação, e por isso o tubo de sucção deve ser dimensionado com grande cautela;
- ✓ Quando a operação ocorre abaixo de seu ponto de funcionamento (controle através de uma válvula), há uma rápida queda em seu rendimento.

Para que o rendimento na operação como turbina seja o mesmo da bomba é necessário realizar a correta seleção do equipamento, que é feita com base nos dados de vazão e altura do aproveitamento. Diversos estudos já foram realizados para que esta seleção seja feita da melhor maneira, como os de Stepanoff (1957) e McClaskey (1976), que propõem uma relação da vazão e altura com o rendimento da bomba. Entretanto, testes realizados mostraram que há uma grande discrepância para o procedimento proposto. Yedidiah (1983) propõe um método baseado na geometria da bomba, porém devido ao grande número de parâmetros envolvidos e a dificuldade de obtê-los ele se torna inconveniente. Os métodos considerados mais práticos e com melhores resultados são aqueles baseados na rotação específica da bomba, onde se considera que uma bomba com a mesma rotação específica irá operar em condições de vazão e altura similares como turbina. Dentre estes trabalhos destacam-se o de Kittredge (1963), Diederich (1967), Buse (1981), Lewinski-Kesslitz (1987) e Viana (1987). Contudo, devido ao grande número de testes realizados e à diversidade de bombas analisadas, o método proposto por Chappalaz et al (1992) é o que fornece melhores resultados.

### 2.4.1. Método de Seleção Proposto por Chapallaz

Neste método a vazão e a altura da BFT operando como bomba são determinadas através dos dados do aproveitamento e dos coeficientes experimentais  $c_Q$  e  $c_H$ . Assim, o ponto de operação da BFT como bomba é calculado pelas Equações 4 e 5.

$$H_b = \frac{H_t}{C_H} \quad (4)$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{C_Q} \quad (5)$$

onde:

$H_b$  [m] - altura da bomba que será utilizada como turbina;

$H_t$  [m] - altura disponível no aproveitamento (da BFT);

$C_H$  [1] - coeficiente de altura;

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

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

$C_Q$  [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. Utilizando a Figura 10 é possível selecionar qual o tipo de bomba mais adequada para o aproveitamento.

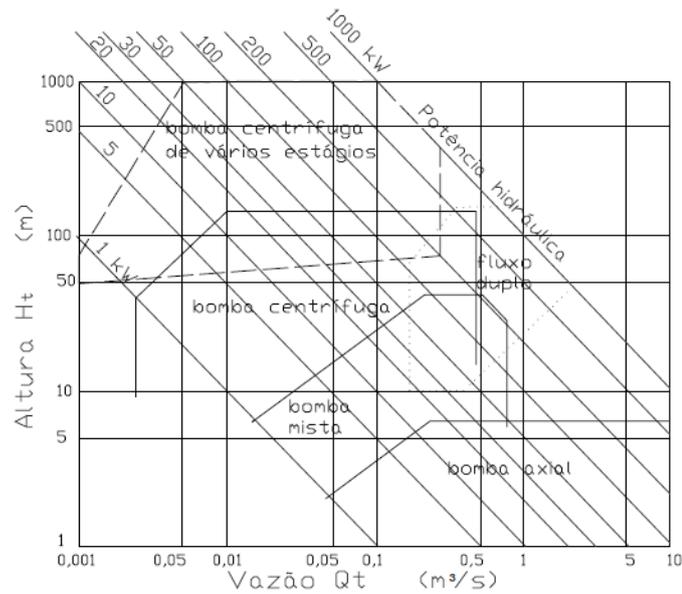


Figura 10. Pré-seleção da BFT (Fonte: Chapallaz et al, 1992).

É necessário então calcular a rotação específica da BFT no sistema técnico (Equação 6). Caso a bomba selecionada seja de fluxo duplo, a vazão deve ser dividida por 2. Já para bombas multiestágio, é necessário escolher quantos estágios deverão ser utilizados e então dividir a altura pela quantidade definida. A rotação nominal da turbina deve ser a maior possível dentre as velocidades síncronas (3600, 1800, 1200 ...). Desta forma reduz-se o tamanho da BFT e conseqüentemente seus custos.

$$n_{qt} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{3/4}} \quad (6)$$

onde:

$n_{qt}$  [1] - rotação específica da BFT no Sistema Técnico;

$n_t$  [rpm] - rotação da BFT;

$Q_t$  [m<sup>3</sup>/s] - vazão da BFT;

$H_t$  [m] - altura da BFT.

De acordo com os ensaios realizados por Chapallaz et al (1992), a relação entre a rotação específica da operação como turbina e como bomba é praticamente constante, como mostra a Figura 11. Assim, a rotação específica da bomba pode ser calculada pela Equação 7.

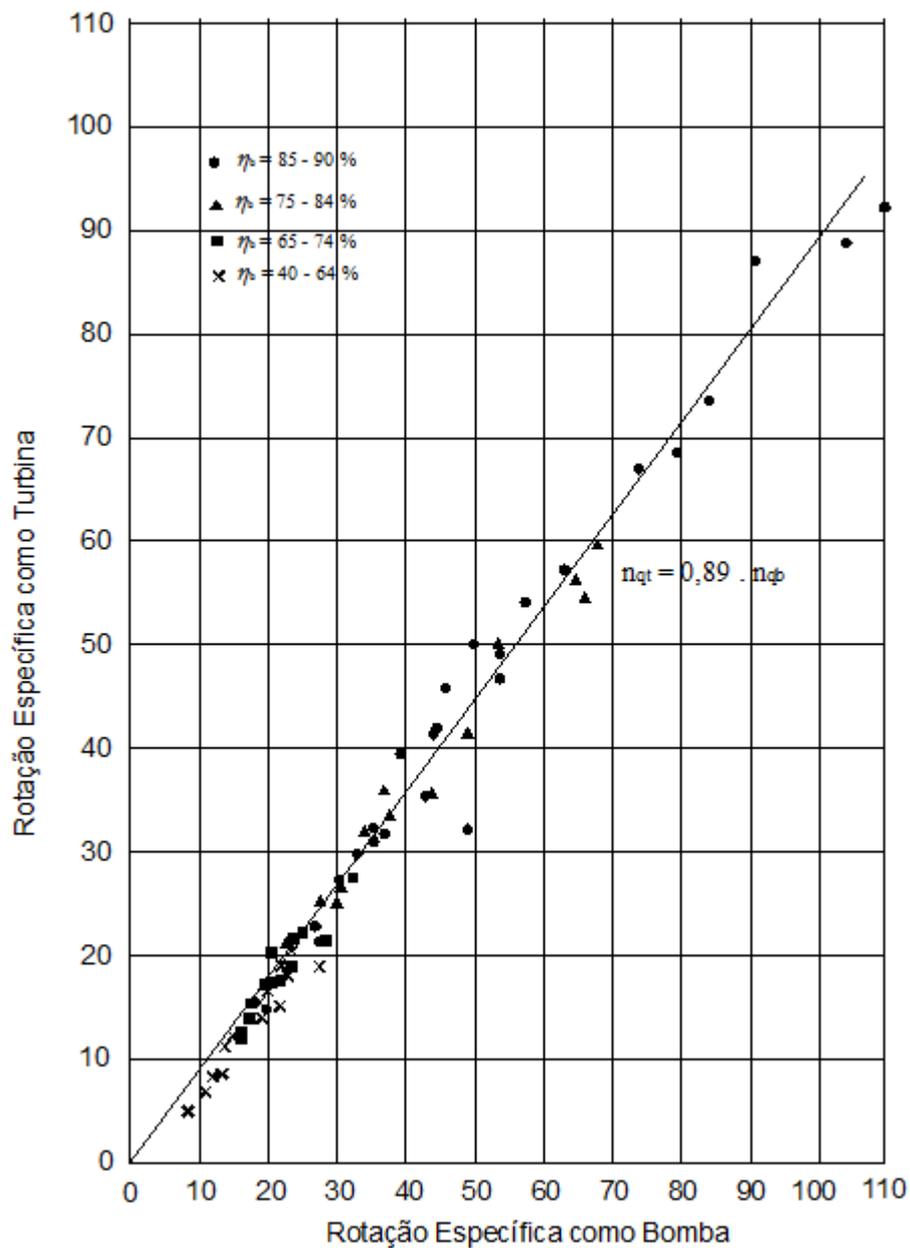


Figura 11. Relação entre a rotação específica como turbina e bomba (Fonte: Chapallaz et al, 1992).

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (7)$$

onde:

$n_{qb}$  [1]- rotação específica da bomba;

$n_{qt}$  [1] - rotação específica da BFT (Equação 6).

Chapallaz et al (1992) também propõe a estimativa da vazão da bomba através da Equação 8. Este procedimento é feito para facilitar a determinação do rendimento máximo da bomba, que pode ser obtido através da Figura 12.

$$Q_b = \frac{Q_t}{1,3} \quad (8)$$

onde:

$Q_b$  [m<sup>3</sup>/s] - vazão da bomba;

$Q_t$  [m<sup>3</sup>/s] - vazão da BFT.

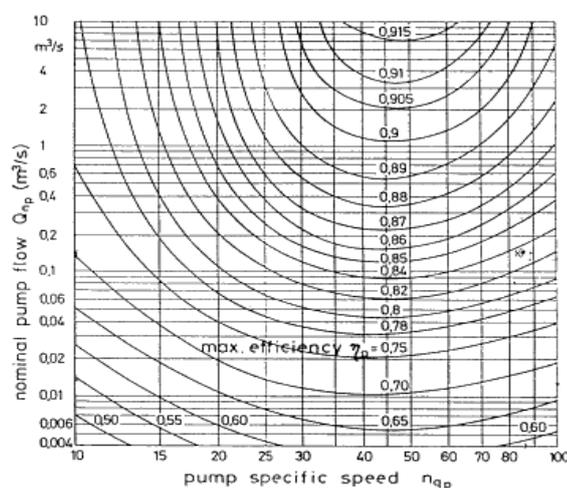


Figura 12. Máximo rendimento da bomba em função da rotação específica e da vazão (Fonte: Chapallaz et al, 1992).

Conhecendo-se o rendimento e rotação específica da bomba, determinam-se os coeficientes de altura e vazão através da Figura 13.

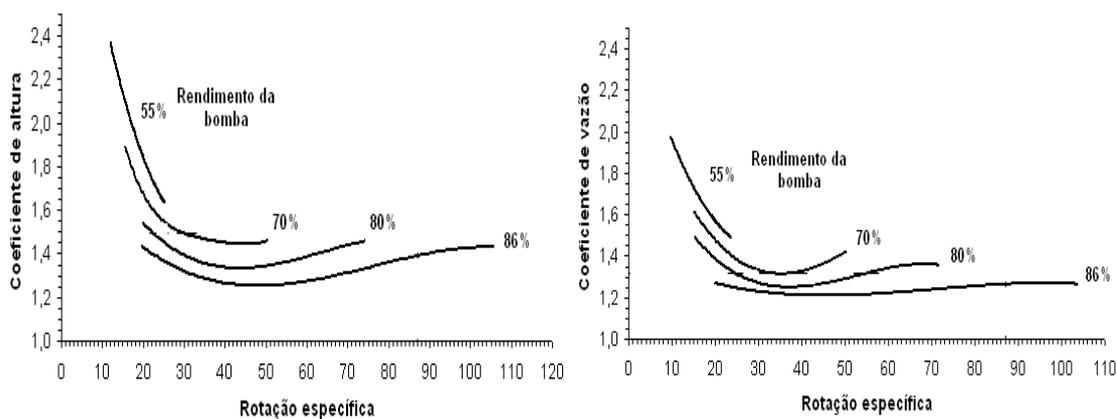


Figura 13. Coeficientes de altura e vazão (Fonte: Chapallaz et al, 1992).

Assim, calcula-se o ponto de operação como bomba através das Equações 4 e 5. Porém, a rotação das bombas é diferente da utilizada para a geração (velocidade síncrona). Portanto, é necessário realizar a correção da vazão e altura de acordo com a rotação fornecida nos catálogos dos fabricantes antes de realizar a seleção da bomba, através das leis de semelhança, Equações 9 e 10 (Porto, 2006).

$$H_b = \left( \frac{n_b}{n_{0b}} \right)^2 \cdot H_{0b} \quad (9)$$

$$Q_b = \frac{n_b}{n_{0b}} \cdot Q_{0b} \quad (10)$$

onde:

$H_b$  [m] - altura referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante;

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

$n_{0b}$  [rpm] - velocidade da BFT;

$H_{0b}$  [m] - altura referente às velocidades síncronas;

$Q_b$  [m<sup>3</sup>/s] - vazão referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante;

$Q_{0b}$  [m<sup>3</sup>/s] - vazão referente às velocidades síncronas.

Seleciona-se então a bomba que apresente menor relação custo-benefício, ou seja, aquela que tenha o menor custo com maior rendimento.

Em alguns casos é interessante conhecer o comportamento hidráulico da BFT fora de seu ponto de máximo rendimento. Para isto Chapallaz et al (1992) propõe o uso da Figura 14, onde são relacionados os valores de altura e vazão no ponto de máxima eficiência ( $H_t$  e  $Q_t$ ) com valores afastados ( $H_{nt}$  e  $Q_{nt}$ ), em função da rotação específica. Assim é possível criar uma curva aproximada de sua operação com os quatro pontos obtidos, além do ponto de máximo rendimento conhecido.

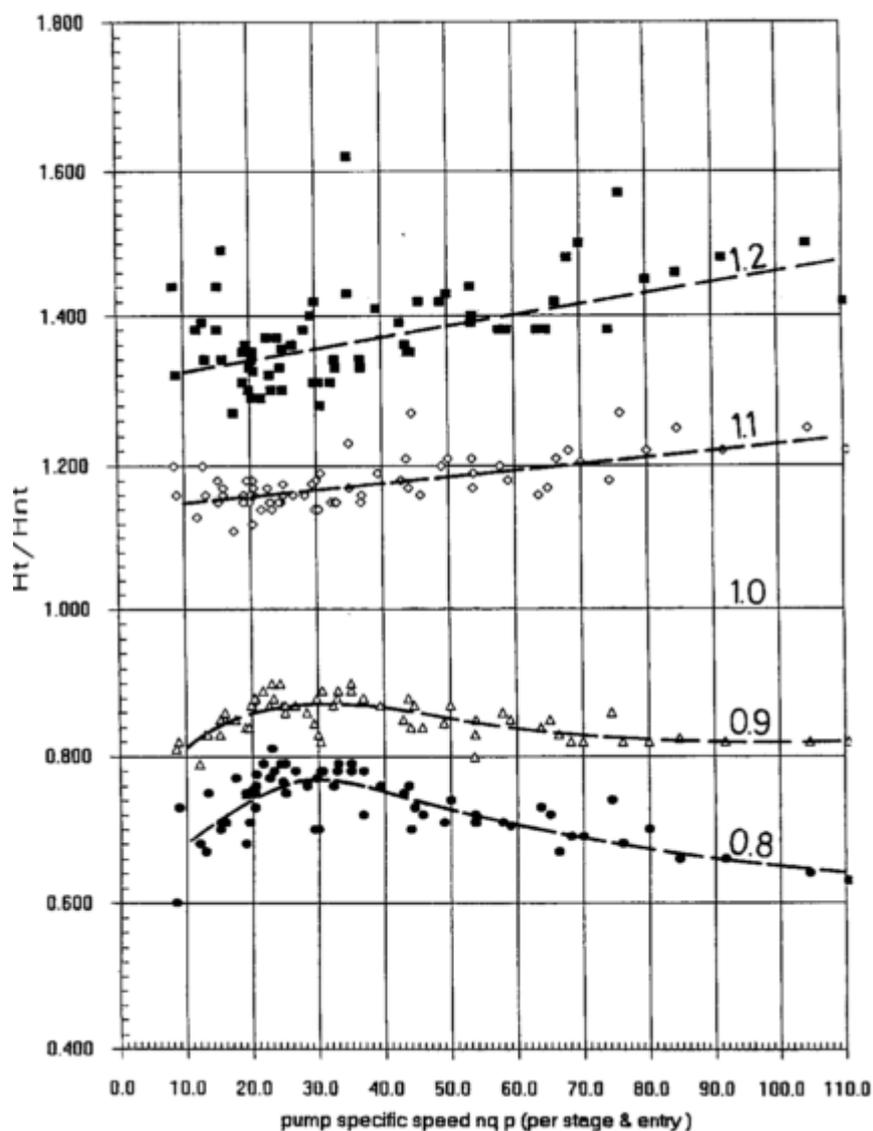


Figura 14. Comportamento da BFT fora do ponto de máximo rendimento (Fonte: Chapallaz et al, 1992)

## 2.4.2. Ensaios Laboratoriais

Com o objetivo de verificar o comportamento de uma BFT em diferentes condições hidráulicas foram realizados ensaios laboratoriais. Assim, foram montadas três diferentes bancadas para avaliar a operação da BFT nas seguintes condições:

- ✓ *BFT com tubo de sucção*: é o ensaio de referência, onde a bomba irá operar como se fosse realmente uma turbina, utilizando seus resultados para comparação com os outros casos. O controle de vazão é feito à montante da BFT, reduzindo a pressão de entrada;
- ✓ *BFT com controle de vazão na saída*: neste ensaio são simuladas as condições de operação de um sistema de abastecimento típico, onde o controle de vazão é feito

devido ao consumo da população, à jusante da BFT. Neste caso a pressão de entrada irá aumentar com a redução da vazão e a BFT irá atuar no controle de pressão;

- ✓ *By-pass com BFT*: o objetivo deste ensaio é verificar se a BFT instalada no by-pass de uma adutora, juntamente com uma VRP, irá operar com altura e vazão constantes, independentemente do controle feito na tubulação principal.

A Figura 15 apresenta um esquema das bancadas utilizadas para o ensaio. Uma bomba de maior potência, juntamente com um conversor de frequência, simula a queda da BFT. Resistências são utilizadas para dissipar a energia gerada. Desta forma controla-se a rotação da BFT, colocando-se mais ou menos carga.

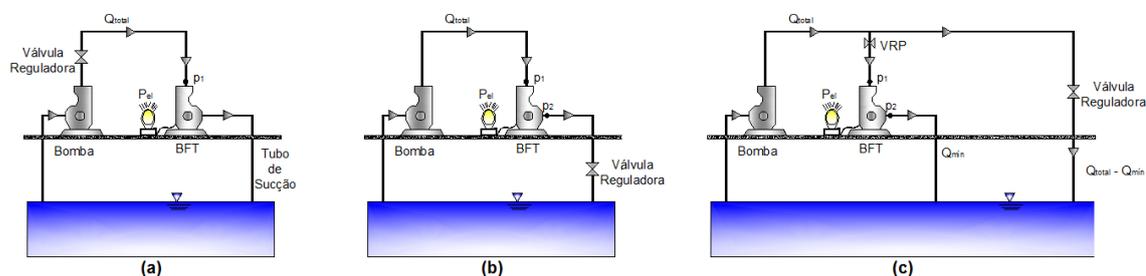


Figura 15. Esquema das bancadas de ensaio: a) BFT com tubo de sucção; b) BFT com controle de vazão à jusante; c) BFT em um *by-pass*.

A medição de vazão é feita através de medidores ultrassônicos da marca Thermo Polysonics, enquanto que as medidas de pressão são feitas através de transdutores de pressão da marca SMAR. A potência elétrica é medida através do medidor de grandezas elétricas Yokogawa CW 140. Também é feita a medida de rotação da BFT através do tacômetro ótico da marca Icel, para evitar que a máquina dispare, mantendo assim sua velocidade constante. Assim, é possível calcular a altura de queda líquida da BFT, a potência hidráulica fornecida e seu rendimento através das Equações 11 a 14.

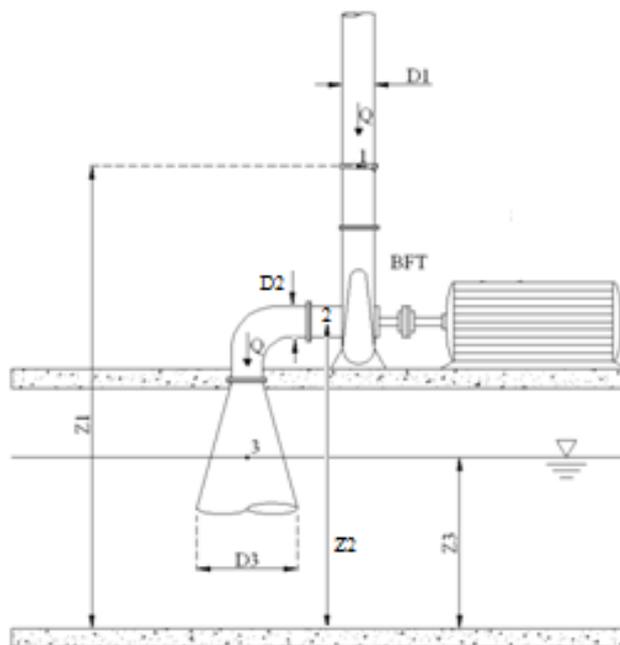


Figura 16. Esquema para cálculo da altura de queda líquida da BFT.

$$H = \left( \frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} \right) + \frac{(v_1^2) - (v_2^2)}{(2 \cdot g)} + (z_1 - z_2) \quad (11)$$

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (12)$$

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

$$\eta_c = \frac{P_{el}}{P_h} \quad (14)$$

onde:

$H$  [m] – altura de queda líquida da BFT;

$p_1/\rho \cdot g$  [m] – pressão na entrada da turbina;

$p_2/\rho \cdot g$  [m] – pressão na saída da turbina. No caso da BFT com tubo de sucção considera-se nula.

$v_1$  [m/s] – velocidade na seção de entrada da BFT;

$v_2$  [m/s] – velocidade na seção de saída da BFT. No caso da BFT com tubo de sucção

considera-se a seção final do tubo de sucção ( $D_3$ );

$z_1$  [m] – cota de posição na entrada da BFT;

$z_2$  [m] – cota de posição na saída da BFT. No caso da BFT com tubo de sucção considera-se o nível d'água do canal de fuga ( $z_3$ );

$Q$  [ $m^3/s$ ] – vazão turbinada;

$D$  [m] – diâmetro da seção considerada (entrada ou saída);

$P_h$  [kW] – potência hidráulica;

$\rho$  [ $kg/m^3$ ] – massa específica da água;

$\eta_c$  [%] – rendimento do grupo gerador;

$P_{el}$  [kW] – potência elétrica gerada.

### 2.4.2.1. BFT com Tubo de Sucção

O ensaio realizado na BFT utilizando o tubo de sucção apresentou os resultados da Tabela 5 e Figura 17.

Tabela 5. Resultados do ensaio realizado na BFT com tubo de sucção.

$Q$ [ $m^3/h$ ]	$p_1/\rho.g$ [m]	$H$ [m]	$P_{el}$ [kW]	$P_h$ [kW]	$\eta_{gg}$ [%]
16,50	31,72	28,05	0,12	1,16	8,23
18,58	31,32	29,27	0,29	1,40	17,86
21,19	35,48	30,21	0,47	1,58	22,26
22,82	37,55	31,04	0,63	1,72	26,38
24,56	39,38	32,21	0,84	1,91	31,18
25,97	40,90	32,87	1,00	2,05	33,78
29,31	44,14	33,82	1,42	2,32	39,41
31,05	47,73	34,77	1,74	2,47	42,28
32,32	49,74	35,31	1,92	2,57	42,91
33,31	52,20	35,85	2,11	2,65	43,72
34,48	55,30	36,30	2,35	2,72	44,44
37,47	57,00	36,98	2,57	2,99	45,94
39,32	59,45	37,47	2,80	3,13	46,04
41,17	61,90	37,91	3,03	3,27	45,62

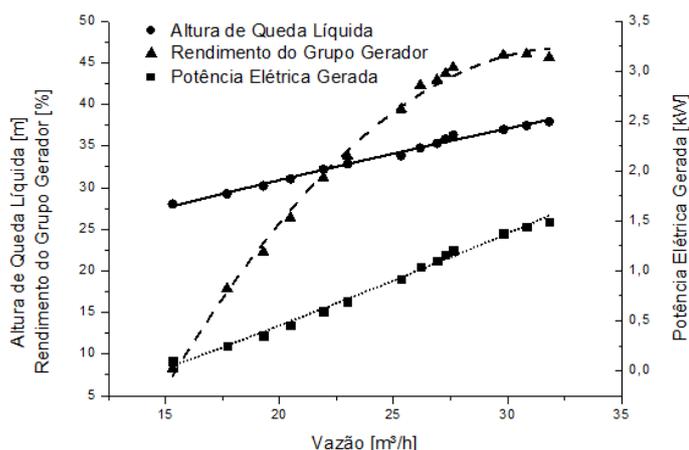


Figura 17. Curvas de altura de queda líquida, rendimento do grupo gerador e potência elétrica gerada para a BFT com tubo de sucção.

#### 2.4.2.2. BFT com Controle de Vazão à Jusante

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos no ensaio, enquanto que a Figura 18 ilustra as curvas características da BFT.

Tabela 6. Resultados do ensaio realizado na BFT com controle de vazão à jusante.

Q [m³/h]	$p_1/\rho.g$ [m]	$p_2/\rho.g$ [m]	H [m]	$P_{el}$ [kW]	$P_h$ [kW]	$\eta_{gg}$ [%]
36,69	62,99	9,13	38,75	1,84	3,87	47,66
32,09	70,63	26,00	36,36	1,30	3,17	41,05
26,58	75,34	35,94	34,81	0,83	2,52	33,04
25,26	76,44	39,06	34,04	0,71	2,34	30,56
23,56	77,46	41,25	32,80	0,54	2,10	25,76
22,56	78,51	44,06	32,17	0,43	1,97	21,61
21,45	79,42	46,56	30,84	0,29	1,80	15,95

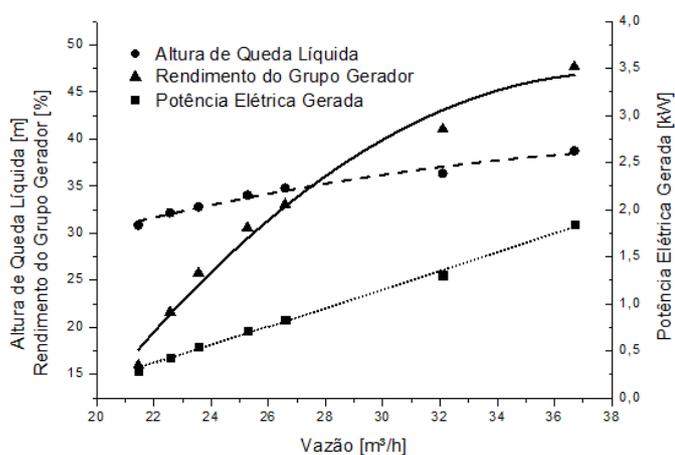
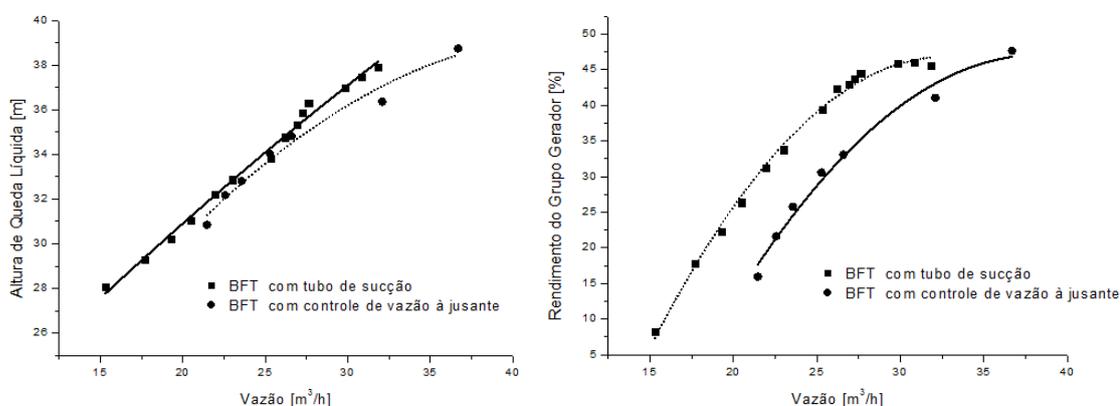


Figura 18. Curvas de altura de queda líquida, rendimento do grupo gerador e potência elétrica gerada para a BFT com controle de vazão à jusante.

Comparando as curvas de altura e de rendimento obtidas com as curvas da operação da BFT com tubo de sucção (Figura 19), percebe-se que há uma diferença significativa da curva de rendimento entre os dois modelos, sendo que a BFT com controle de vazão à jusante sempre opera com um rendimento menor. Isto pode ser explicado pela ausência do tubo de sucção, que permite que o escoamento atinja o nível de jusante de maneira uniforme, além de recuperar parte da energia cinética do fluido que passa pelo rotor. Apesar da queda de rendimento, as duas curvas de altura obtidas se mantiveram próximas, indicando a viabilidade técnica ao se utilizar uma BFT para controle de pressão na rede.



**Figura 19. Comparação da altura e rendimento para a operação da BFT com tubo de sucção e com controle de vazão à jusante.**

Além desta comparação, também foi avaliada a diferença entre as curvas de altura e rendimento teóricos, obtidas de acordo com o procedimento descrito no item 3.4.1. A Figura 20 mostra esta comparação. Percebe-se que o erro é alto, em torno de 20 % para baixas vazões. A partir de 70 % da vazão nominal o erro passa a ser de cerca de 5 %. O mesmo ocorre com o rendimento, que tem a diferença reduzida ao se aproximar da vazão nominal. Portanto, quando for feito o estudo da viabilidade técnica e econômica para utilizar uma BFT para controle de pressão, deve-se tomar cuidado ao utilizar as curvas teóricas obtidas, principalmente quando a variação de vazão for grande, ou seja, quando a BFT precisar operar com baixas vazões.

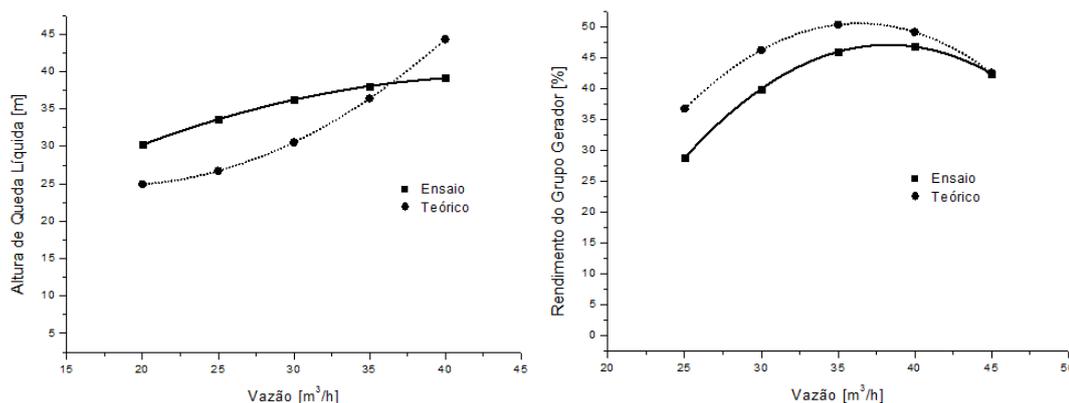


Figura 20. Comparação das curvas teóricas de altura e rendimento com os resultados do ensaio.

### 2.4.2.3. BFT em um *by-pass*

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no ensaio. É possível observar que independentemente da vazão total do sistema, a vazão turbinada pela BFT se manteve constante devido ao controle de pressão em sua entrada. Da mesma forma, a potência elétrica gerada também se manteve constante. Isto mostra a viabilidade do uso de uma VRP para regularizar a operação da BFT, facilitando a aplicação da energia gerada, já que esta não sofrerá alterações.

Tabela 7. Resultados do ensaio realizado na BFT em um *by-pass*.

Ponto	$Q_{\text{total}}$ [m³/h]	$Q_{\text{turbinada}}$ [m³/h]	$p_1$ [m]	$P_{\text{el}}$ [W]
1	38,3	25,1	33,3	743
2	33,5	25,4	33,4	727
3	29,6	25,2	33,5	737
4	25,5	25,5	33,7	749
<i>Média</i>	-	25,3	33,5	739
<i>Desvio-padrão</i>	-	0,17	0,17	9,41
<i>Desvio [%]</i>	-	0,68	0,50	1,27

### 3. METODOLOGIA

Para definir o potencial energético em sistemas de abastecimento de água, foi elaborado o fluxograma apresentado na Figura 21, considerando a utilização de BFT's. O primeiro passo é definir o local onde deverá ser instalada a BFT. Neste caso a adução deverá ser feita por gravidade. Caso contrário, a BFT irá introduzir uma perda de carga que deverá ser superada pela estação elevatória, aumentando seu consumo de energia, que será maior que a potência gerada.

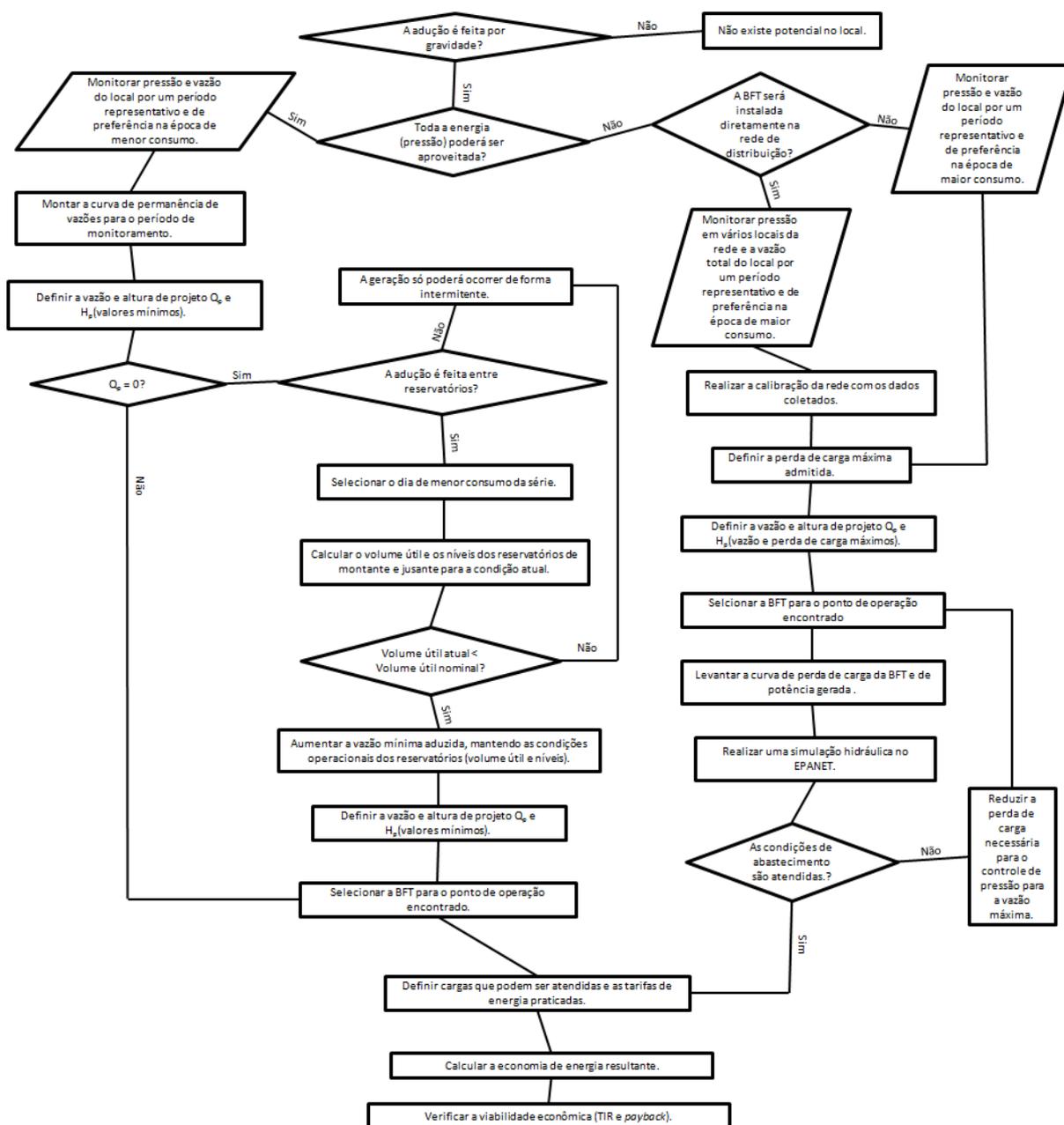


Figura 21. Fluxograma para determinação do potencial energético em sistemas de abastecimento de água.

As adutoras por gravidade podem ser divididas em dois tipos: aquelas em que é possível aproveitar toda a energia (pressão), que é o caso de adutoras entre a captação e ETA e entre reservatórios, e aquelas em que a pressão de saída da BFT ainda deverá ser capaz de atender uma demanda, caso de adutoras da rede de distribuição e dos filtros da ETA.

No primeiro caso, onde 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 altura de 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. Caso a vazão de projeto seja nula e a adução ocorra entre reservatórios, é possível alterar sua operação para elevar a vazão mínima aduzida. Caso não seja possível, a geração só poderá ocorrer de forma intermitente.

No segundo caso, onde apenas parte da energia disponível poderá ser aproveitada, é necessário definir 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. Em 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.

As curvas de altura e potência da BFT deverão ser levantadas e uma simulação no *software* EPANET 2.0 (Rossman, 2000) deverá ser feita para garantir a operação do sistema. Caso as pressões na rede fiquem muito baixas deverá ser selecionada uma nova BFT com altura menor. Neste caso a geração irá ocorrer de forma variável, de acordo com o consumo de água do local. Para que a energia seja utilizada para acionar uma carga constante, deverá ser considerada a potência mínima encontrada. Nos períodos onde houver uma geração maior que o consumo o excedente deverá ser dissipado.

Em todos os casos deverá ser feito o estudo para verificar a viabilidade econômica do projeto. A seguir serão descritos os locais onde a metodologia proposta foi aplicada e os levantamentos realizados para a determinação do potencial energético.

## 3.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL

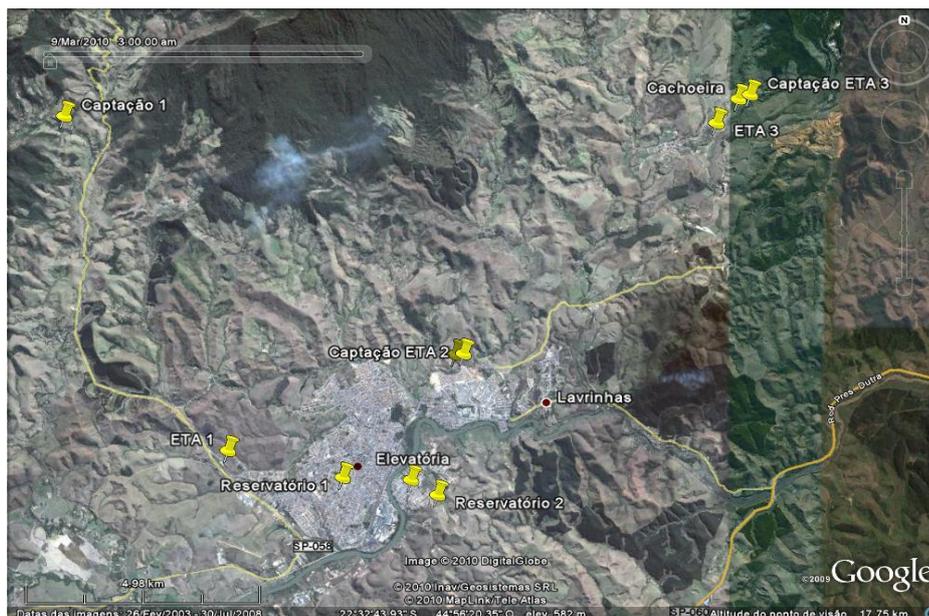
### 3.1.1. SAAE Cruzeiro – SP

Cruzeiro é uma cidade localizada na região Leste do Estado de São Paulo, próxima à Serra da Mantiqueira, inserida dentro da Bacia do Rio Paraíba do Sul. De acordo com os dados do último censo realizado (IBGE, 2010) a cidade possui uma área de aproximadamente 306 km<sup>2</sup>, com uma população de 77.039 habitantes.



**Figura 22. Localização de Cruzeiro em São Paulo (Fonte: Prefeitura Municipal de Cruzeiro, 2012).**

O sistema de abastecimento é municipal, composto por três sistemas de captação e tratamento em diferentes locais, como mostra a Figura 23. O estudo foi realizado apenas no sistema 1, responsável por cerca de 60 % do abastecimento de água da cidade, com 13.966 ligações (SAAE Cruzeiro, 2011).



**Figura 23. Localização das captações, ETAs, reservatórios e estações elevatórias do SAAE Cruzeiro (Fonte: Google Earth, 2012).**

Neste sistema a captação é feita no rio Batedor, e é composta por uma barragem de concreto com comporta em sua margem esquerda, alimentando um canal de adução, que se divide em dois, alimentando uma ETA, utilizada apenas para decantação da água em situações onde há grande concentração de sedimentos, principalmente no período chuvoso, e também uma câmara de carga, de onde saem duas adutoras, uma de 10'' e outra de 12'', que abastecem a Estação de Tratamento de Água Avelino Júnior. Na chegada da ETA existe um pequeno reservatório para reduzir a pressão e mantê-la a um nível praticamente constante, em torno de 7 m. Logo em seguida a água bruta passa pelo processo de filtração e desinfecção. A água tratada é então armazenada em um reservatório, de onde saem 4 adutoras, responsáveis por alimentar alguns bairros próximos e outro reservatório, conhecido como a caixa d'água da cidade, de onde é feito o abastecimento por gravidade, além de fornecer água à estação elevatória de Itagaçaba, que por sua vez alimenta o reservatório Bela Vista. A Figura 24 apresenta um esquema deste sistema e os locais onde serão estudadas a implantação de duas microcentrais: a primeira logo na chegada das adutoras de água bruta na ETA Avelino Júnior e a segunda na rede de distribuição Vista Alegre, abastecida pelo reservatório Bela Vista.

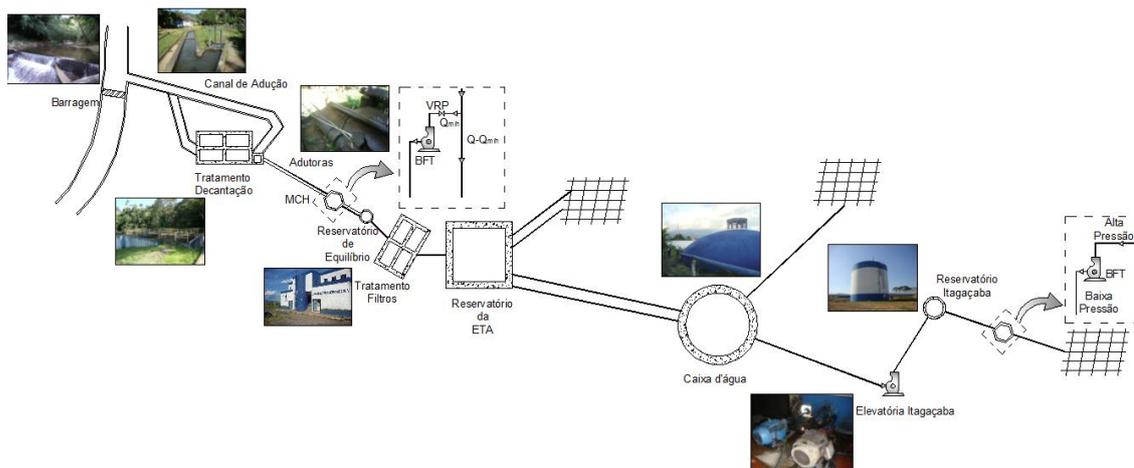


Figura 24. Esquema do sistema de abastecimento de água e localização das MCHs em Cruzeiro.

### 3.1.2. Águas Guariroba (Campo Grande – MS)

O município de Campo Grande, capital do Estado de Mato Grosso do Sul, está localizado no centro do Estado. Possui uma área de 8.096 km<sup>2</sup> e 796.252 habitantes (IBGE, 2010). O município não possui grandes rios, pois se encontra sobre o divisor de águas das bacias do Paraná e Paraguai. Entretanto, o Estado é o detentor da maior porcentagem do aquífero Guarani dentro do território brasileiro.



Figura 25. Localização de Campo Grande em Mato Grosso do Sul (Fonte: Prefeitura Municipal de Campo Grande, 2012).

Ao contrário de Cruzeiro, em Campo Grande há uma concessionária, chamada Águas Guariroba, responsável desde 23 de outubro de 2000 pela gestão dos serviços de captação, adução, produção, tratamento e distribuição de água potável, além de realizar a coleta, afastamento, tratamento e disposição final do esgoto.

O sistema de abastecimento de água e coleta de esgoto possui as seguintes características:

- ✓ 2 captações de água superficial;
- ✓ 2 estações de tratamento de água;
- ✓ 119 captações de água subterrânea;
- ✓ 96 reservatórios;
- ✓ 44 elevatórias de água tratada;
- ✓ 3 estações de tratamento de esgoto;
- ✓ 26 elevatórias de esgoto;
- ✓ 6.240.607 m<sup>3</sup>/mês de volume disponibilizado de água;
- ✓ 22.675 cv de potência instalada (7.050.997 kWh/mês, equivalente a 2,7 % da energia distribuída pela Enersul).

Como pode ser observado, este sistema é muito maior e mais complexo do que o descrito para o município de Cruzeiro. Outra diferença observada é a preocupação da concessionária com ações de racionalização do uso de energia elétrica e água, realizando os seguintes projetos:

- ✓ Análise tarifária de energia elétrica de cada unidade operacional;
- ✓ Análise de perfil e custo operacional de cada unidade operacional;
- ✓ Retorno para o mercado cativo da Captação Guariroba;
- ✓ Redução da operação em horário de ponta;
- ✓ Redução do consumo de energia reativa;
- ✓ Redução das perdas de carga nas tubulações;
- ✓ Redução de perdas no sistema de abastecimento de água;
- ✓ Substituições e recuperações de bombas;
- ✓ Investimento em novos sistemas produtivos de água, com ênfase em perfuração de poços;
- ✓ Investimento em reservatórios;
- ✓ Interligação de sistemas de abastecimento;
- ✓ Automação e desenvolvimento do controle operacional de abastecimento de água;

Com o objetivo de manter o sistema em constante melhoria, foi estudada a

possibilidade da implantação de uma microcentral no sistema Guariroba. Este sistema é composto por uma captação superficial, aduzindo água bruta por gravidade (tubulação sem pressurização) até um reservatório que irá alimentar três bombas. Esta elevatória abastece a ETA Guariroba. Após tratada a água é armazenada em quatro grandes reservatórios, que irão abastecer direta ou indiretamente a população. No sub-sistema conhecido como RG, a água segue para um reservatório menor, por gravidade, de onde será distribuída para a população através de duas adutoras, uma por gravidade e outra através de bombeamento. O estudo para a implantação da microcentral será feito na adutora de água tratada, entre os reservatórios da ETA e RG. A Figura 26 apresenta um esquema do sistema e o local para implantação da microcentral.

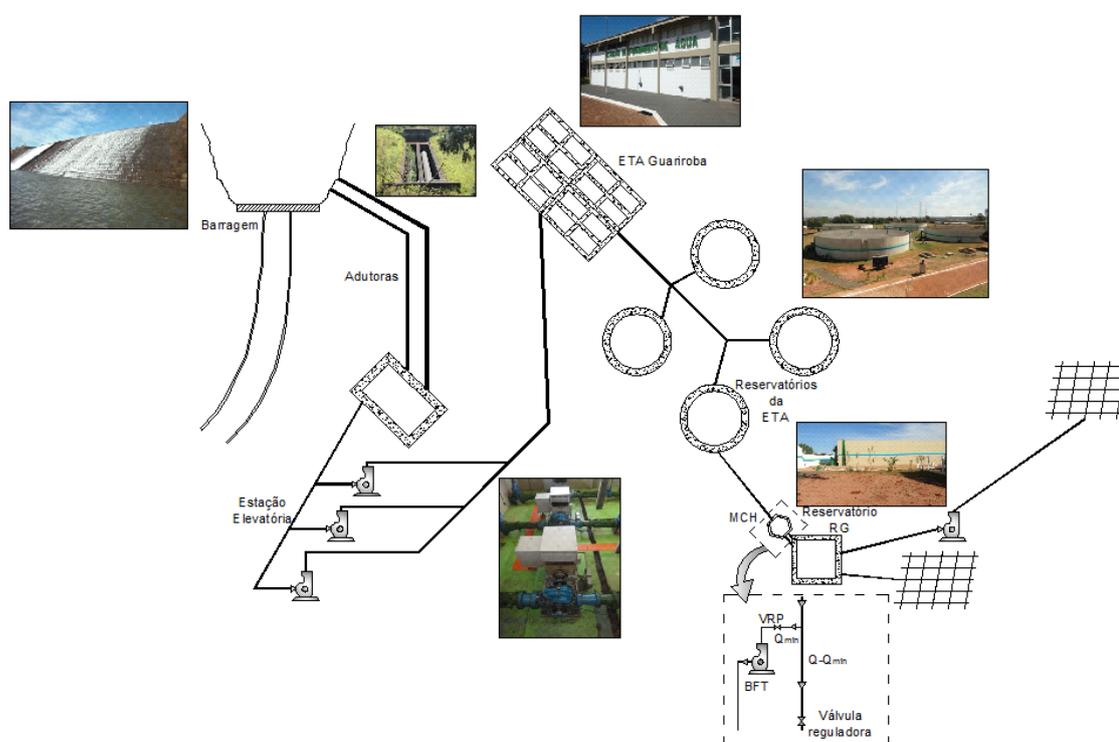


Figura 26. Esquema do sistema de abastecimento de água e localização da MCH em Campo Grande.

### 3.2. OBTENÇÃO DOS DADOS

Apesar dos estudos de caso apresentarem diferentes características, em todos eles é necessário definir os seguintes parâmetros:

- ✓ Local mais adequado para instalação da microcentral;
- ✓ Vazão e altura de projeto;
- ✓ Carga a ser atendida;

- ✓ Viabilidade econômica.

A seguir serão descritos como foram obtidos os dados necessários para a realização do estudo.

### 3.2.1. Vazão

Para os estudos realizados no SAAE Cruzeiro, a medida de vazão foi realizada através de um medidor de vazão ultrassônico da marca Thermo Polysonics (Figura 27). A utilização deste equipamento foi feita devido à sua facilidade de instalação, que é feita externamente. Este medidor é utilizado na medição de líquidos limpos e seu princípio de funcionamento se baseia no tempo de trânsito de pulsos de ultrassom emitidos e recebidos pelos dois sensores acoplados na parede externa da tubulação. Os dados coletados foram armazenados em um *datalogger* da marca Contemp, com taxa de aquisição de 1 minuto, durante uma semana. Para o estudo da microcentral na ETA Avelino Júnior a instalação foi feita logo após o tanque de estabilização, quando as duas adutoras passam para uma tubulação única de 600 mm. Também foi feita a medição pontual da vazão nas duas adutoras para determinar a contribuição de cada uma na vazão total. No caso da microcentral da rede Vista Alegre, a instalação foi feita logo na saída do reservatório de distribuição e a coleta de dados durou apenas 24 h. A vazão em cada um dos nós da rede foi obtida relacionando a vazão total com sua área de influência, considerando que o vazamento possui a mesma proporção em todos os pontos da rede.



Figura 27. Medidor de vazão ultrassom e sistema de aquisição de dados em Cruzeiro.

Para o estudo realizado em Campo Grande foram coletados os dados de três meses da macromedição realizada pela concessionária através de um medidor eletromagnético,

instalado logo na chegada ao reservatório de jusante (Figura 28), com uma taxa de aquisição de 1 minuto.



**Figura 28. Medidor de vazão eletromagnético de Campo Grande.**

### **3.2.2. Pressão**

As medidas de pressão em Campo Grande foram realizadas através de um *datalogger*. Ao contrário da medida de vazão, a pressão não faz parte do sistema de macromedição, e, portanto, foi necessária a instalação do *datalogger* (Figura 29), com horário sincronizado ao sistema de aquisição de vazão, na chegada do reservatório de jusante, local onde deverá ser instalada a BFT. A taxa de aquisição utilizada foi de 1 minuto, porém a medida durou apenas dois dias.



**Figura 29. Datalogger utilizado em Campo Grande.**

Já no caso de Cruzeiro, onde a microcentral será instalada na rede Vista Alegre, é necessário realizar a medida de pressão em diferentes pontos, para que seja possível realizar a calibração da rede, e posteriormente, determinar as zonas de pressão através do *software* EPANET 2.0 (Rossman, 2000), definido assim o melhor local para a instalação da BFT. Assim como para a medida de vazão a aquisição durou 24 horas, também com taxa de aquisição de 1 minuto. A Figura 30 mostra os pontos de medidas de pressão, feitas no cavalete das residências, além da medida do nível do reservatório de distribuição. A diferença entre a cota onde foi feita a coleta dos dados e a rede de distribuição foi considerada para realizar a calibração e simulação da rede.



Figura 30. Localização dos *dataloggers* na rede Vista Alegre (Fonte: *google earth*).

No caso da microcentral da ETA Avelino Júnior, não foi possível realizar a medida de pressão, pois antes do tanque de equalização, local onde deverá ser instalada a BFT, não há ponto para tomada de pressão, além do fato do poço de visitas sofrer inundações constantes devido à descarga de água no local, o que danificaria o equipamento. Desta forma optou-se por obter a medida de pressão neste ponto através da diferença da queda bruta e as perdas de carga ao longo das duas adutoras. A queda bruta, bem como o perfil e o comprimento das adutoras foram obtidos através do DGPS (*Differential Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global Diferencial) ProMark 3, apresentado na Figura 31. Este sistema consiste na instalação de um receptor GPS em um local fixo, denominado de base, enquanto que o segundo receptor, denominado móvel, é instalado nos pontos onde se deseja conhecer as coordenadas. Isto permite a correção diferencial do erro, já que a base servirá de referência para todos os outros pontos, fornecendo precisão centimétrica. Porém, para que se obtenham as coordenadas reais dos pontos é necessário que a base seja instalada em um ponto georreferenciado, o que não foi possível de realizar neste trabalho. A Figura 32 apresenta os perfis transversal e longitudinal da adutora, e as cotas da tomada d'água na captação e da casa de máquinas na ETA.



Figura 31. Instalação do DGPS base e móvel.

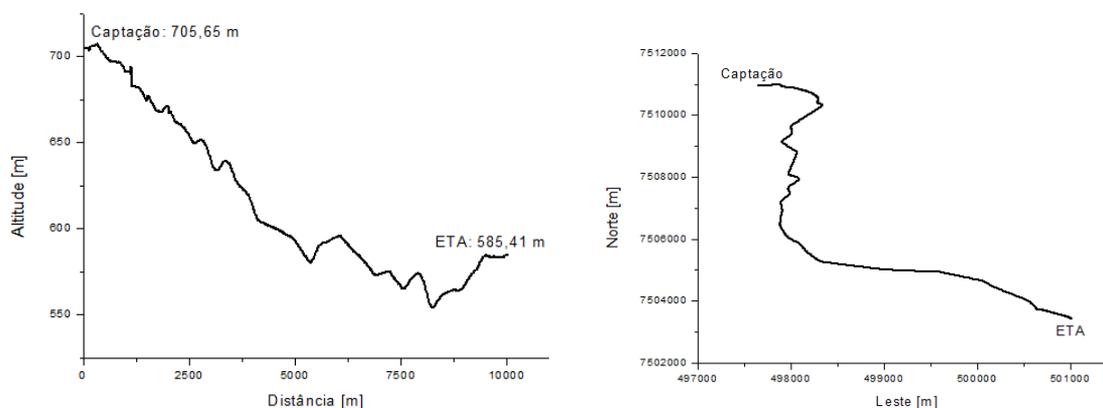


Figura 32. Perfil transversal e longitudinal das adutoras.

Conhecendo o comprimento da tubulação, seu diâmetro e seu material, determinou-se a perda de carga para cada ponto da série de vazões obtida através das Equações 15 e 16 (Porto, 2006). As perdas de carga localizadas não foram consideradas, pois, segundo Azevedo Netto (1998), quando o comprimento da adutora for superior a 4000 vezes seu diâmetro, estas são desprezíveis em relação à perda distribuída.

$$\Delta H = f \cdot \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (15)$$

onde:

$\Delta H$  [m] – perda de carga;

$f$  [1] – fator de atrito da tubulação;

$L_{eq}$  [m] – comprimento equivalente da tubulação;

$D$  [m] – diâmetro da tubulação;

$v$  [m/s] – velocidade do escoamento;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – aceleração da gravidade.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (16)$$

onde:

$f$  [1] – fator de atrito da tubulação;

$\varepsilon$  [m] – rugosidade absoluta;

$D$  [m] – diâmetro da tubulação;

$Rey$  [1] – número de Reynolds.

### 3.2.3. Nível d'água

No estudo realizado em Campo Grande a medida do nível d'água é de grande importância para a otimização da operação do sistema, a fim de maximizar a geração de energia. Assim, foram coletados os níveis dos reservatórios de montante e jusante através de medidores de nível ultrassônicos, que fazem parte do sistema de macromedição da concessionária.

Em Cruzeiro o nível d'água do reservatório de distribuição da rede Vista Alegre também é de grande importância para a calibração e simulação da rede. A medida foi feita logo na saída do reservatório, como mostra a Figura 33, onde a pressão é praticamente igual à coluna de água dentro do reservatório (pressão estática), através de *dataloggers*.



Figura 33. Medida de nível d'água do reservatório de Cruzeiro utilizando *datalogger*.

### 3.2.4. Cotas

Para o estudo da microcentral da rede Vista Alegre foi necessário determinar a cota dos nós da rede de distribuição. Desta forma, foi feito um levantamento topográfico utilizando o DGPS para determinar estes valores em alguns pontos da rede (Figura 34). A cota dos nós restantes foi obtida através da interpolação dos valores.

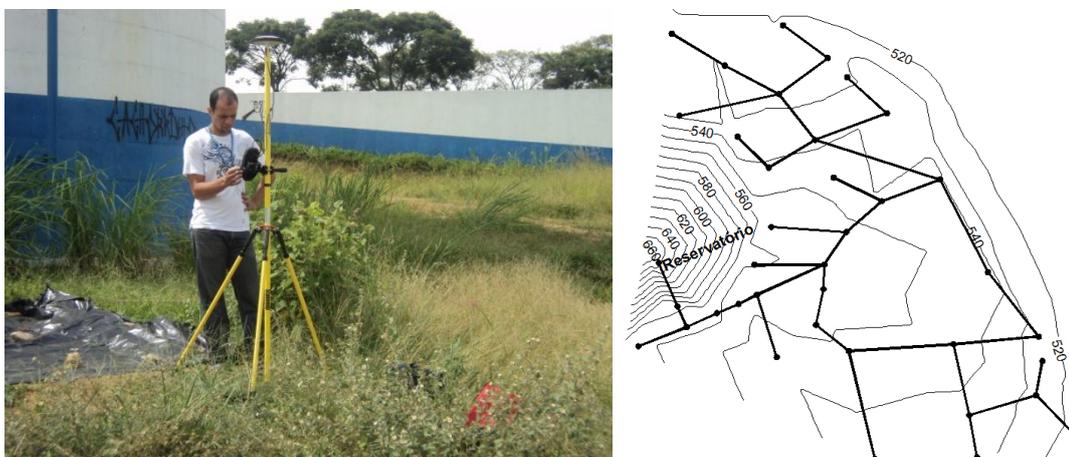


Figura 34. Levantamento topográfico da rede Vista Alegre.

### 3.2.5. Potência Elétrica

Para avaliar a economia no consumo de energia elétrica é necessário conhecer qual a carga a ser abastecida e qual a sua demanda. No caso da ETA Avelino Júnior, em Cruzeiro, como a demanda é muito baixa, optou-se por monitorar o consumo de toda a unidade. Para isto foi instalado um medidor de grandezas elétricas no quadro de comando (Figura 35). Como a geração deve ser maior que a demanda, considerou-se que o excedente será comercializado com a concessionária de energia.



Figura 35. Instalação do medidor de grandezas elétricas para monitoramento da demanda na ETA em Cruzeiro.

Para a microcentral da rede Vista Alegre, devido à sua localização, que deverá ficar no meio da rede de distribuição, e, portanto, longe do centro de consumo do SAAE, considerou-se que toda a energia gerada será vendida diretamente para a concessionária de energia elétrica.

Já no caso de Campo Grande, existem bombas submersas próximas ao local de implantação da microcentral, que poderão ser atendidas. Neste caso considerou-se que as bombas operam continuamente, 24 horas por dia.

Além de conhecer a carga, também é necessário definir as tarifas que serão utilizadas para realizar a análise econômica. Nos casos em que a energia será comercializada utilizou-se o valor de 87,00 R\$/MWh (Oliveira et al, 2011), porém não foram considerados os custos de conexão e nem a TUSD, que podem reduzir os ganhos observados. Para os casos de consumo próprio a tarifa será aquela praticada pela concessionária, já que o gasto com energia será evitado. A Tabela 8 apresenta os valores de tarifa adotados para realizar a análise econômica.

Tabela 8. Tarifas utilizadas para realizar a análise econômica das microcentrais.

Local	Tarifa [R\$/kWh]
ETA Avelino Júnior - Caso 1	0,32308 <sup>*</sup>
ETA Avelino Júnior – Caso 2	0,087 <sup>**</sup>
Rede Vista Alegre	0,087 <sup>**</sup>
Campo Grande <sup>***</sup>	0,137972 (fora de ponta)
	1,174351 (horário de ponta)

\* tarifa convencional baixa tensão

\*\* Oliveira et al (2011)

\*\*\* tarifa de demanda: 12,35 [R\$/kW] (Enersul, 2012)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. SAAE CRUZEIRO

#### 4.1.1. ETA Avelino Júnior

Com o local definido e os dados de pressão e vazão coletados, foi feita a curva de permanência de vazões aduzidas durante o período de monitoramento, que foi realizado entre os dias 22 e 29 de junho de 2011, como mostra a Figura 36. Uma série ideal deveria compreender um ano inteiro, para que seja possível identificar os valores mínimos de altura e vazão para o sistema. Apesar da série de dados utilizada ser curta, ela foi obtida no início do inverno, onde segundo a Associação Nacional de Conservação da Natureza (2009) o consumo das famílias é 15 % menor que em outras épocas do ano.

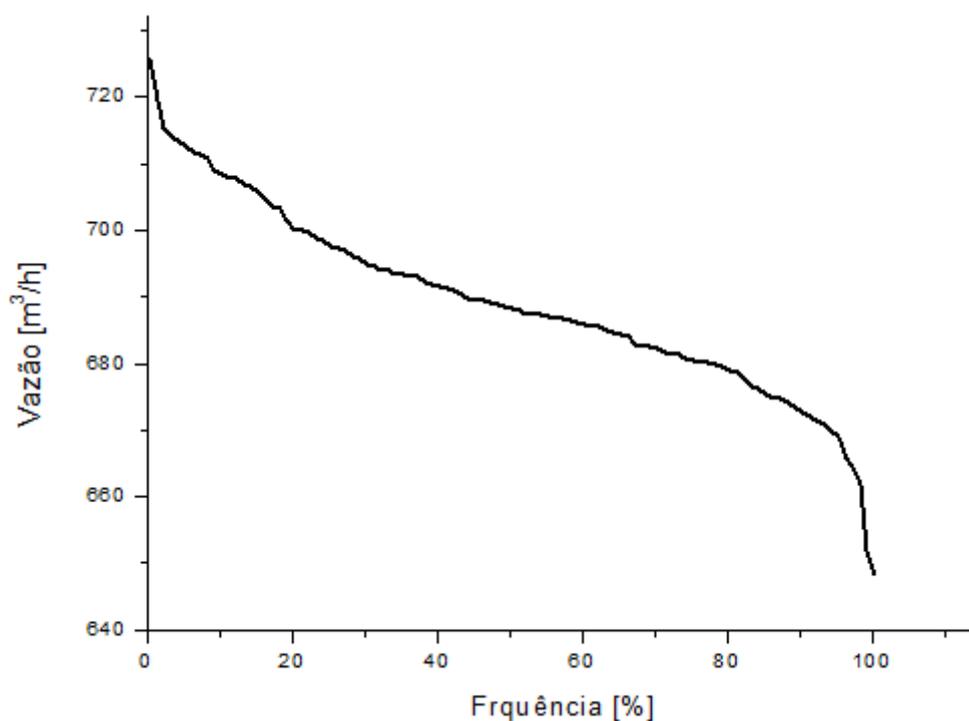


Figura 36. Curva de permanência de vazões aduzidas em Cruzeiro.

Como pode ser observado não há grande variação da vazão aduzida. O valor máximo observado foi de 726,22 m<sup>3</sup>/h, enquanto que a mínima foi de 648,59, uma diferença de 11,26 %, o que faz com que a curva tenha uma queda pouco acentuada. Apesar desta característica, optou-se por utilizar a vazão mínima encontrada para realizar o projeto da microcentral, já que a BFT não possui dispositivo para controle e regulação de vazão. Assim, propõe-se o uso de

um *by-pass* para que a vazão mínima seja turbinada, enquanto que o restante passe normalmente pela tubulação. Apesar desta alternativa regularizar a vazão turbinada, a pressão continuará oscilando. Assim, propõe-se também o uso de uma VRP para estabilizar a pressão na entrada da BFT, ou seja, a pressão de entrada na BFT também será a mínima observada, o que ocorre na máxima vazão. Desta forma obtém-se o potencial de 282 m<sup>3</sup>/h e 33 m para a tubulação de 10'' e 367 m<sup>3</sup>/h e 61 m para a tubulação de 12''.

Com estes dados de projeto utiliza-se o método de Chapallaz, descrito no item 3.4.1 para selecionar a BFT. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos na seleção da BFT.

Tabela 9 – Resultados obtidos para a seleção das BFTs da ETA Avelino Júnior.

Tubulação de 10''		Tubulação de 12''	
<b>H<sub>t</sub> [m]</b>	33,00	<b>H<sub>t</sub> [m]</b>	61,00
<b>Q<sub>t</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,08	<b>Q<sub>t</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,10
<b>Tipo</b>	Centrífuga	<b>Tipo</b>	Centrífuga
<b>n<sub>gg</sub> [rpm]</b>	1800	<b>n<sub>gg</sub> [rpm]</b>	3600
<b>n<sub>b</sub> [rpm]</b>	1750	<b>n<sub>b</sub> [rpm]</b>	3500
<b>n<sub>qt</sub></b>	36,59	<b>n<sub>qt</sub></b>	52,66
<b>n<sub>qb</sub></b>	41,11	<b>n<sub>qb</sub></b>	59,17
<b>Estimativa Q<sub>b</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,06	<b>Estimativa Q<sub>b</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,08
<b>η<sub>b</sub> [%]</b>	82,20	<b>η<sub>b</sub> [%]</b>	84,00
<b>C<sub>H</sub></b>	1,304	<b>C<sub>H</sub></b>	1,318
<b>C<sub>Q</sub></b>	1,224	<b>C<sub>Q</sub></b>	1,265
<b>H<sub>b</sub> [m]</b>	25,30	<b>H<sub>b</sub> [m]</b>	46,29
<b>Q<sub>b</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,06	<b>Q<sub>b</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,08
<b>H<sub>b</sub> corrigido [m]</b>	23,91	<b>H<sub>b</sub> corrigido [m]</b>	43,76
<b>Q<sub>b</sub> corrigido [m<sup>3</sup>/h]</b>	223,94	<b>Q<sub>b</sub> corrigido [m<sup>3</sup>/h]</b>	281,98

Em seguida deve ser avaliada a carga que será atendida. A Figura 37 apresenta a demanda média da ETA ao longo do dia. Percebe-se um aumento na demanda a partir das 18:00 h até as 5:00 h, devido à carga de iluminação da ETA. Além disso, nota-se que com apenas uma das BFTs é possível sustentar toda a demanda da ETA, que durante todo o período de medição atingiu um valor máximo de 14,9 kW.

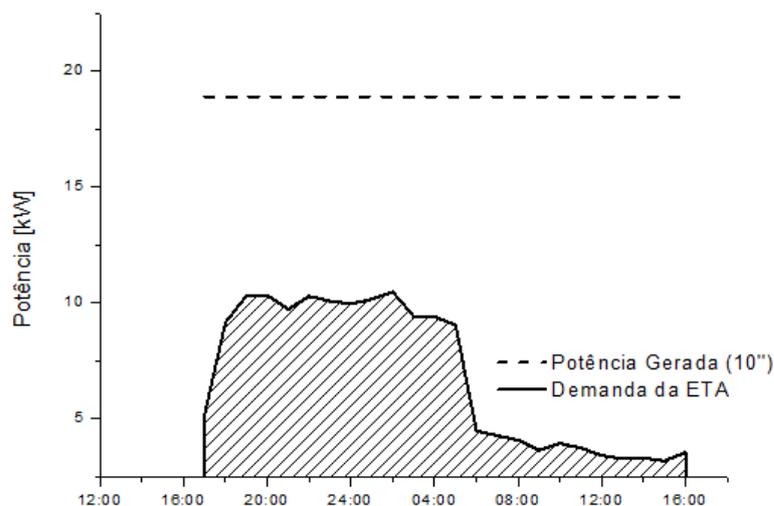


Figura 37. Curva de demanda média da ETA de Cruzeiro.

Para avaliar a economia proveniente da microcentral calculou-se a energia economizada diariamente, que corresponde à área abaixo da curva de demanda (Figura 37). Como a energia gerada pela microcentral será constante, num valor de 18,9 kW para a tubulação de 10'', a área entre a curva de demanda e a curva de potência gerada corresponde à energia que será vendida a concessionária. No caso da tubulação de 12'', que irá gerar 46,1 kW, toda a energia gerada será comercializada. Para finalizar a análise devem ser levantados os custos do grupo gerador, das obras necessárias, do quadro de proteção e também de operação e manutenção, apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Investimentos da microcentral da ETA de Cruzeiro.

Cenário	Autossuficiência	Comercialização
<b>BFT</b>	4.737	10.941
<b>MIG</b>	5.210	14.200
<b>Obras</b>	10.898	21.796
<b>Quadro de Proteção</b>	16.050	32.100
<b>Operação e manutenção (anual)</b>	3.690	7.903

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos na análise econômica para o caso onde a energia será consumida apenas internamente e para o caso em que o excedente será comercializado. Percebe-se que tanto o *payback* quanto a TIR indicam grande atratividade para o investimento. Além disso, o custo do kW instalado está bem abaixo do estimado para PCHs, que é de R\$5.000,00 (Tiago Filho, 2008). Isto ocorre devido à existência de alguns componentes necessários a uma usina, como câmara de carga e conduto forçado.

Tabela 11. Resultados da análise econômica da microcentral da ETA Cruzeiro.

Cenário	Autossuficiência	Comercialização
Investimento Inicial [R\$]	36.895	79.037
Economia Anual [R\$]	19.382	63.708
TIR [%]	42,5	70,6
Payback [anos]	2,92	1,64
Custo Específico [R\$/kW]	2.476	1.216

#### 4.1.2. Rede Vista Alegre

Com os dados coletados entre os dias 10 e 11 de fevereiro de 2011 e os resultados da calibração da rede obtidos por Viana et al (2011), foi feita a simulação hidráulica da rede Vista Alegre. A Figura 38 mostra as zonas de pressão para três diferentes períodos. Percebe-se uma zona ao norte que em todos os períodos apresenta alta pressão. Assim, identificou-se o trecho 22, como sendo o mais adequado para a instalação da BFT.

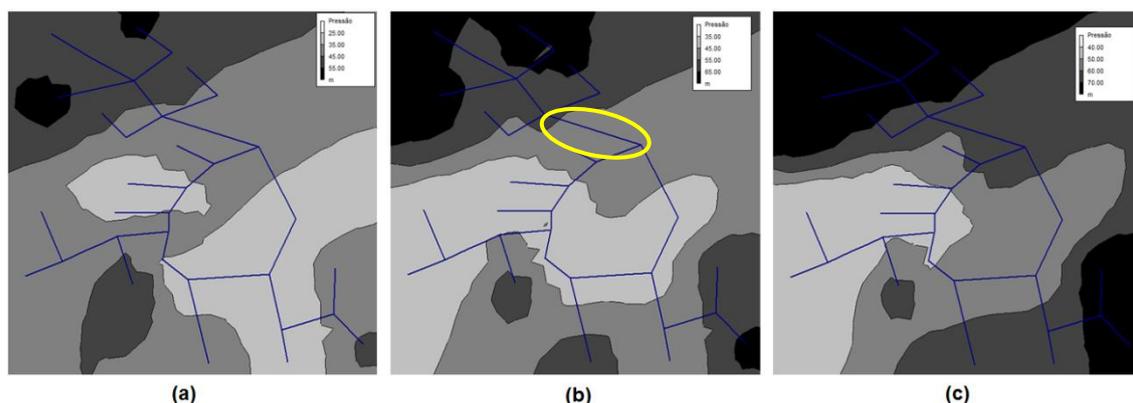


Figura 38. Localização do trecho a ser implantada a BFT e zonas de pressão da rede Vista Alegre sem controle de pressão: a) Mínima; b) Média; c) Máxima.

Observando os resultados da simulação, dentro da zona de influência da BFT, o nó 26 é o mais crítico, ou seja, onde ocorrem as menores pressões. Desta forma, para o período de vazão máxima, de  $13,2 \text{ m}^3/\text{h}$ , observou-se que a pressão no nó 26 é de 38,9 m, conforme mostra a Figura 39.

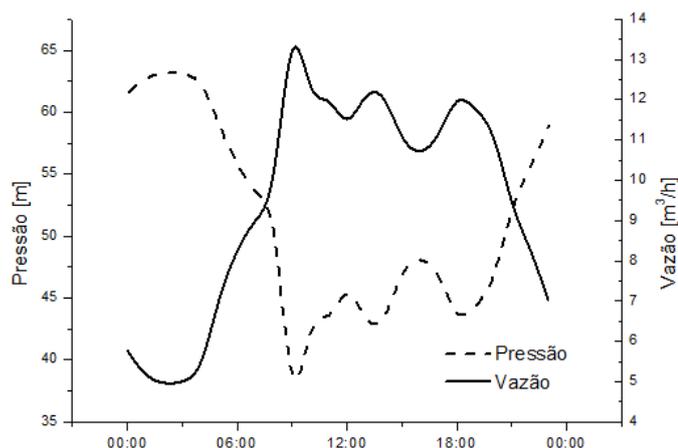


Figura 39. Variação de vazão no setor e pressão no nó crítico.

Assim, admitiu-se que para esta condição de vazão a perda de carga provocada pela BFT irá manter 10 m de pressão neste nó, valor mínimo recomendado pela NBR 12218 (ABNT, 1994). Portanto, a altura de projeto da BFT será de 28,9 m. A Tabela 12 apresenta a seleção da BFT para a rede Vista Alegre.

Tabela 12 – Resultados obtidos para a seleção da BFT da rede Vista Alegre.

<b><math>H_t</math> [m]</b>	28,9
<b><math>Q_t</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,00343
<b>Tipo</b>	Centrífuga
<b><math>n_{gg}</math> [rpm]</b>	3600
<b><math>n_b</math> [rpm]</b>	3500
<b><math>n_{qt}</math></b>	16,92
<b><math>n_{qb}</math></b>	19,01
<b>Estimativa <math>Q_b</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,00264
<b><math>\eta_b</math> [%]</b>	45
<b><math>C_H</math></b>	1,893
<b><math>C_Q</math></b>	1,6
<b><math>H_b</math> [m]</b>	15,27
<b><math>Q_b</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,00214
<b><math>H_b</math> corrigido [m]</b>	14,43
<b><math>Q_b</math> corrigido [m<sup>3</sup>/h]</b>	7,503

Utilizando o método proposto no item 3.4.1, encontrou-se a curva de altura da BFT. Para realizar sua simulação no *software* EPANET 2.0 (Rossman, 2000) utilizou-se uma válvula genérica (GPV), que permite que sua curva de perda de carga seja inserida. As novas zonas de pressão obtidas apresentaram uma grande redução de pressão, como mostra a Figura 40.

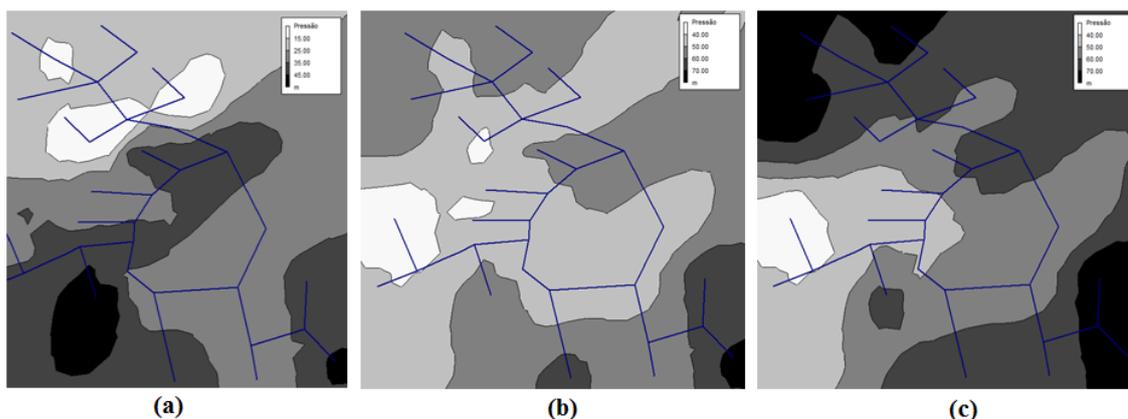


Figura 40. Zonas de pressão da rede Vista Alegre utilizando uma BFT para controle de pressão: a) Mínima; b) Média; c) Máxima.

Comparando-se apenas pressão no nó 26 ao longo do dia (Figura 41), observa-se que apesar do controle efetuado, nos períodos de maior pressão a queda não foi tão acentuada. Isto se deve ao fato da vazão ser muito baixa nestes períodos, e, portanto, a BFT não insere uma perda de carga suficiente para manter uma pressão adequada. O mesmo pode ser observado com a potência elétrica gerada, já que a potência hidráulica é maior com o aumento da vazão. Mesmo assim, a redução de pressão observada em média é de 38,5 %, o que representa uma redução diária nos vazamentos de  $108,3 \text{ m}^3$ , enquanto que a potência gerada média é de 247,8 W.

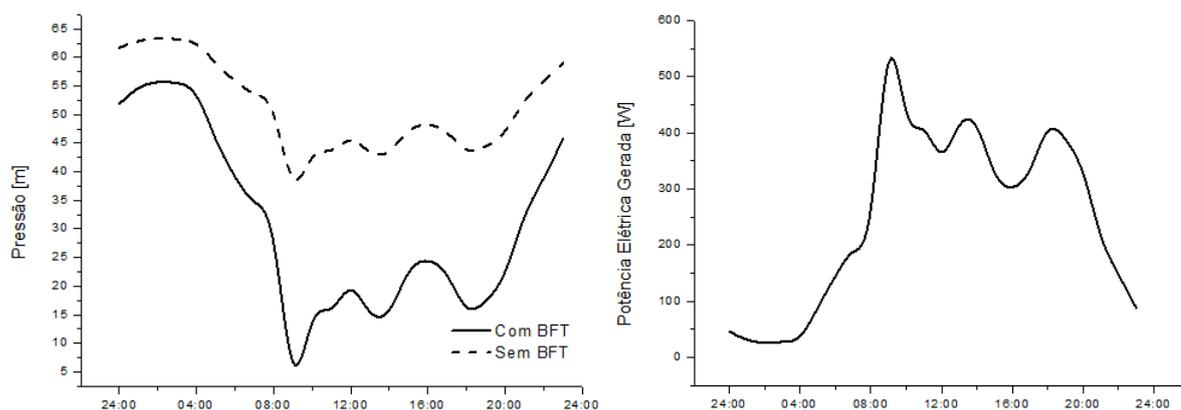


Figura 41. Comparação das pressões no ponto mais crítico da rede e potência elétrica gerada utilizando uma BFT.

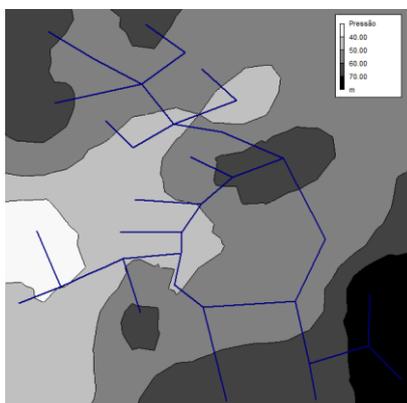
Para otimizar a geração e também o controle de pressão, Budris (2011) sugere o uso de múltiplas BFTs em paralelo. Desta forma, optou-se por utilizar dois conjuntos para dois períodos de consumo definidos: o primeiro, compreende o horário de maior demanda, entre as

7 e 22h, que terá os mesmos dados de projeto do caso com apenas uma BFT, enquanto que o segundo compreende o horário de menor consumo, entre as 23 e 6 h, onde a pressão é mais elevada. Neste caso a vazão de projeto será de 8,24 m<sup>3</sup>/h enquanto que a altura será de 45,9 m. A Tabela 13 apresenta os resultados da seleção desta BFT.

**Tabela 13 – Resultados obtidos para a seleção da BFT da rede Vista Alegre para o período de maior pressão.**

<b>H<sub>t</sub> [m]</b>	45,9
<b>Q<sub>t</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,00229
<b>Tipo</b>	Centrífuga
<b>n<sub>gg</sub> [rpm]</b>	3600
<b>n<sub>b</sub> [rpm]</b>	3500
<b>n<sub>qt</sub></b>	9,77
<b>n<sub>qb</sub></b>	10,97
<b>Estimativa Q<sub>b</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,00176
<b>η<sub>b</sub> [%]</b>	45
<b>C<sub>H</sub></b>	2,4
<b>C<sub>Q</sub></b>	1,9
<b>H<sub>b</sub> [m]</b>	19,13
<b>Q<sub>b</sub> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,00121
<b>H<sub>b</sub> corrigido [m]</b>	18,08
<b>Q<sub>b</sub> corrigido [m<sup>3</sup>/h]</b>	0,00117

Assim como feito anteriormente a curva de altura da nova BFT foi levantada, e em seguida, realizou-se a simulação da rede para seu período de funcionamento. A Figura 42 apresenta a nova zona de pressão obtida para a o período noturno (máxima pressão). Percebe-se que os valores se aproximam mais da média, devido ao melhor controle da pressão.



**Figura 42. Zonas de pressão da rede Vista Alegre utilizando duas BFT para controle de pressão no período de pressão máxima.**

Ao se comparar os resultados apenas do nó 26 (Figura 43) é possível observar melhor a estabilização da pressão na rede. A potência elétrica gerada também se elevou, já que uma BFT mais adequada foi selecionada para o período de menor consumo. Em média a redução de pressão foi de 47,3 %, reduzindo 123,8 m<sup>3</sup> de água perdida em vazamentos diariamente, enquanto que a potência gerada média foi de 290,1 W. O mesmo procedimento poderia ser feito para que uma terceira BFT operasse nos picos de pressão ainda existentes, mas desta forma a operação se tornaria mais complexa. Outra alternativa a ser estudada é o uso de um conversor de frequência para manter a pressão no nó crítico constante e igual ao valor mínimo estabelecido, variando sua rotação conforme a necessidade de uma maior ou menor perda de carga localizada.

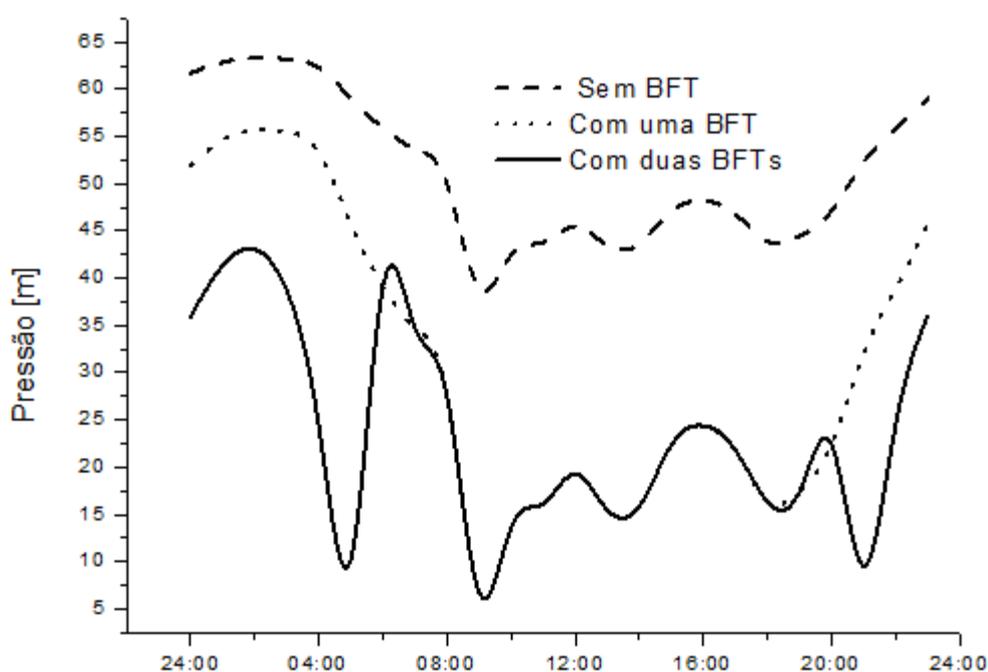


Figura 43. Comparação das pressões no ponto mais crítico da rede.

Apesar da redução do volume de vazamentos, a análise econômica deve considerar apenas o benefício encontrado devido à geração de energia. Isto porque uma VRP exerce a mesma função de controle de pressão, ou seja, a vantagem do uso da BFT se dá exclusivamente devido à produção de energia e ao seu menor preço quando comparada à VRP. As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados obtidos. Devido à baixa potência encontrada nenhum dos dois casos apresentou viabilidade econômica.

Tabela 14. Investimentos da microcentral da rede Vista Alegre de Cruzeiro.

<b>Cenário</b>	<b>1 BFT</b>	<b>2 BFTs</b>
<b>BFT + MIG</b>	405	810
<b>Obras</b>	13.780	19.970
<b>Quadro de Proteção</b>	5.500	11.000
<b>Operação e manutenção (anual)</b>	1.200	2.400

Tabela 15. Resultados da análise econômica da microcentral da rede Vista Alegre de Cruzeiro.

<b>Cenário</b>	<b>1 BFT</b>	<b>2 BFTs</b>
<b>Investimento Inicial [R\$]</b>	19.685	31.780
<b>Economia Anual - Energia [R\$]</b>	189	221
<b>TIR [%]</b>	-	-
<b>Payback [anos]</b>	-	-
<b>Custo Específico [R\$/kW]</b>	79.439	109.548

## 4.2. CAMPO GRANDE

Assim como para o caso da ETA Avelino Júnior, obteve-se primeiramente a curva de permanência de vazões aduzidas, apresentada na Figura 44. Neste caso a série utilizada é maior, entre os dias 01 de março e 25 de maio de 2011, devido à existência do macromedidor de vazão na chegada ao reservatório RG. Porém este não é o período de menor consumo, o que pode representar um aumento do potencial realmente disponível.

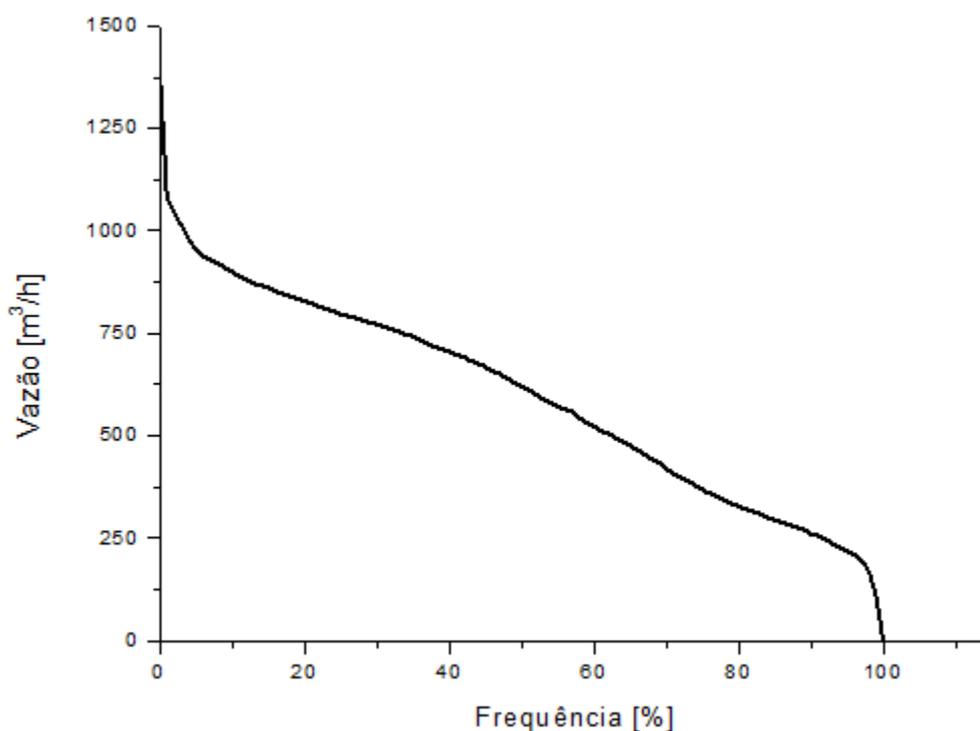


Figura 44. Curva de permanência de vazões aduzidas em Campo Grande.

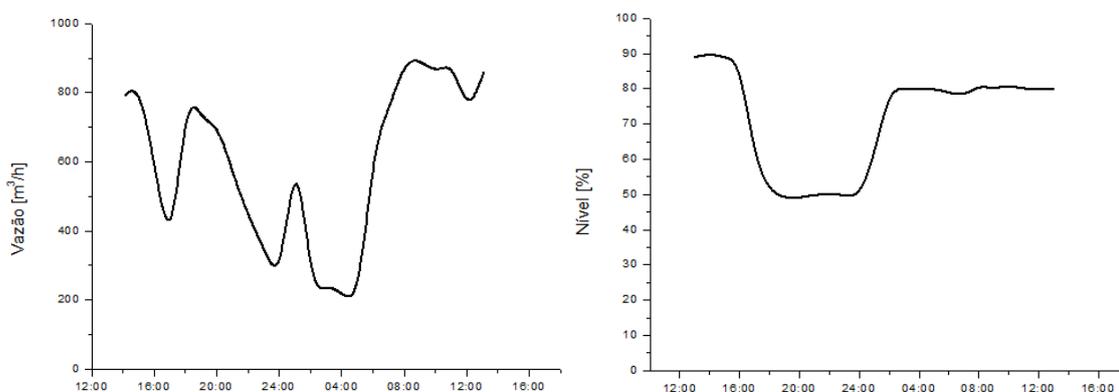
Pode se observar que a curva tem uma queda um pouco mais acentuada, ou seja, há uma maior variação na vazão aduzida. Isto ocorre pois a adução é controlada de acordo com o nível observado no reservatório RG. Pode-se observar também que a vazão mínima é nula, ou seja, em determinados momentos da operação a adução é interrompida devido ao elevado nível do reservatório. Assim, para que a geração seja possível algumas alternativas podem ser adotadas.

- ✓ Realizar a geração apenas nos horários com maior demanda de água, quando a vazão aduzida é maior, enquanto que em outros períodos não haverá geração;
- ✓ Realizar a geração com duas ou mais BFTs em paralelo, permitindo a geração de energia por um período maior;
- ✓ Redefinir o esquema de adução e controle de nível para elevar a vazão mínima, mantendo as condições operacionais dos reservatórios e adutoras, e assim gerar energia durante todo o dia.

A alternativa escolhida depende da necessidade e das condições de operação da carga a ser atendida. Nas duas primeiras alternativas haverá momentos em que outra fonte de energia deverá suprir a carga. Para evitar este problema optou-se por estudar a viabilidade de alterar a operação de adução. Caso a energia disponível supere a necessidade da carga, será

considerado que o excedente será comercializado.

Selecionou-se o dia de menor consumo para avaliar a possibilidade do aumento da vazão aduzida. A Figura 45 mostra as variações de vazão e nível ao longo do dia de menor consumo observado. Percebe-se que durante o horário de ponta a vazão aduzida não é a máxima, pois a produção de água tratada é interrompida, ou seja, há necessidade de se controlar o nível do reservatório da ETA. Conseqüentemente o nível do reservatório RG sofre uma queda, mas se mantém bem acima de seu nível mínimo de 20 %. Também é possível observar que apesar do total aduzido durante o dia ser o mínimo observado, o valor extremo foi de 195 m<sup>3</sup>/h, superior ao da série histórica.



**Figura 45. Variações da vazão aduzida e do nível do reservatório RG no dia de menor consumo.**

Para avaliar a possibilidade de alterar a operação dos reservatórios foi feita a análise utilizando o método dos volumes diferenciais (Gomes, 2009). Os novos valores de vazão aduzida para cada intervalo de tempo de 1 hora, foram obtidos através de um processo de otimização utilizando programação não-linear. Assim o problema ficará sujeito às seguintes condições:

- ✓ Maximizar a economia de energia;
- ✓ Variáveis (vazão aduzida) com valores entre 0 e 1.393 m<sup>3</sup>/h;
- ✓ Níveis dos reservatórios da ETA e RG entre 20 e 100 %;
- ✓ Vazão média de entrada igual à vazão média de saída;
- ✓ Somatória das diferenças positivas e negativas entre as vazões de entrada e saída dos reservatórios devem ser iguais e inferiores ao volume útil do reservatório.

A Tabela 16 e a Figura 46 apresentam os resultados da otimização. Ressalta-se que apenas a vazão aduzida ao reservatório RG foi alterada. Caso houvesse necessidade ainda poderia ser feita a otimização da produção de água na ETA. Esta alternativa também é válida

para um cenário onde outros reservatórios que recebam água por gravidade da ETA também venham a ter uma microcentral. Percebe-se que a vazão aduzida se mantém próxima de um valor constante por um período maior, porém o reservatório chega a trabalhar em seu nível mínimo no fim do horário de ponta. Já as condições operacionais do reservatório da ETA pouco mudaram. Desta forma conseguiu-se aumentar a vazão mínima para 411,7 m<sup>3</sup>/h.

Tabela 16. Resultados obtidos para a otimização da vazão aduzida ao reservatório RG.

Horário	RG			ETA		
	Q <sub>entra</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>saída</sub> [m <sup>3</sup> /h]	NA [%]	Q <sub>entra</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>saída</sub> [m <sup>3</sup> /h]	NA [%]
14:00	600	783	32,23	5.094	5.135	68,28
15:00	845	840	32,59	5.094	4.872	70,13
16:00	748	592	43,00	5.094	3.627	82,35
17:00	788	745	45,83	2.938	1.634	93,22
18:00	955	962	45,38	0	3.139	67,06
19:00	572	737	34,36	0	2.722	44,38
20:00	529	714	22,00	0	1.862	28,87
21:00	528	558	20,00	4.631	4.904	26,59
22:00	430	430	20,00	5.094	4.671	30,12
23:00	412	347	24,31	5.094	4.605	34,19
00:00	450	253	37,46	5.094	4.233	41,37
01:00	588	522	41,86	5.094	3.927	51,09
02:00	412	216	54,91	5.094	4.110	59,29
03:00	427	247	66,90	5.094	3.747	70,52
04:00	416	214	80,35	5.094	3.669	82,40
05:00	498	203	100,00	5.094	4.013	91,41
06:00	679	679	100,00	5.094	4.433	96,92
07:00	502	774	81,86	3.240	3.294	96,47
08:00	732	857	73,55	3.240	5.279	79,47
09:00	724	919	60,57	3.240	4.109	72,23
10:00	687	844	50,13	3.240	4.130	64,81
11:00	726	908	38,02	3.240	3.769	60,40
12:00	783	736	41,18	3.631	3.208	63,92
13:00	917	868	44,42	4.094	3.529	68,62
<i>Média</i>	623	623	-	3.859	3.859	-

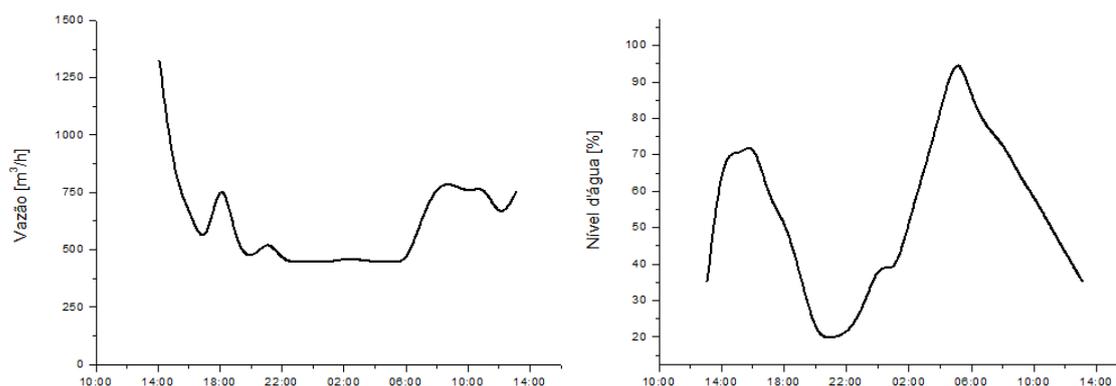


Figura 46. Variações da vazão aduzida e do nível do reservatório RG após a otimização.

Sabendo-se também que a altura mínima, que ocorre quando a vazão é máxima, durante o período de observação foi de 21,75 m, foi feita a seleção da BFT para este ponto de operação (Tabela 17).

Tabela 17. Resultados obtidos para a seleção da BFT em Campo Grande.

<b><math>H_t</math> [m]</b>	21,75
<b><math>Q_t</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,114
<b>Tipo</b>	Centrífuga
<b><math>n_{gg}</math> [rpm]</b>	1800
<b><math>n_b</math> [rpm]</b>	1750
<b><math>n_{qt}</math></b>	60,44
<b><math>n_{qb}</math></b>	67,91
<b>Estimativa <math>Q_b</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,088
<b><math>\eta_b</math> [%]</b>	82,0
<b><math>C_H</math></b>	1,373
<b><math>C_Q</math></b>	1,322
<b><math>H_b</math> [m]</b>	15,85
<b><math>Q_b</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,087
<b><math>H_b</math> corrigido [m]</b>	14,98
<b><math>Q_b</math> corrigido [m<sup>3</sup>/h]</b>	302,82

Assim, calculou-se que a potência elétrica disponibilizada será de 19,22 kW, sendo necessário então definir qual a carga a ser atendida. Neste caso não há a curva de demanda de nenhuma carga próxima ao local (iluminação e bombas submersas). Portanto será considerado que a energia disponível acionará dois conjuntos motobombas submersos que captam água de poços artesianos e que estes operam 24 horas por dia com potência constante. Estes conjuntos têm potência nominal de 12,5 cv, ou seja, devem consumir aproximadamente 19 kW, consumindo toda a energia produzida. Devido à falta de um melhor conhecimento da carga,

também será avaliado o cenário onde a energia será apenas comercializada. A Tabela 18 apresenta os investimentos necessários para a implantação da central enquanto que a Tabela 19 os resultados da análise econômica. Percebe-se que mesmo no cenário de comercialização, onde o benefício é menor, o investimento ainda apresenta grande atratividade. Assim como em Cruzeiro o custo do kW também é inferior ao estimado para uma PCH.

**Tabela 18. Investimentos da microcentral de Campo Grande.**

<b>BFT</b>	4.737
<b>MIG</b>	5.210
<b>Obras</b>	10.898
<b>Quadro de Proteção</b>	16.050
<b>Operação e manutenção (anual)</b>	3.670

**Tabela 19. Resultados da análise econômica de Campo Grande.**

<b>Cenário</b>	<b>Consumo</b>	<b>Comercialização</b>
<b>Investimento Inicial [R\$]</b>	36.895	36.895
<b>Economia Anual [R\$]</b>	47.894	14.649
<b>TIR [%]</b>	129,8	39,7
<b>Payback [anos]</b>	0,93	4,56
<b>Custo Específico [R\$/kW]</b>	1.919	1.919

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho 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. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2010), o Brasil possui aproximadamente 660 prestadores de serviços de água, sendo que em muitos deles existe um potencial energético.

Para que estes aproveitamentos possam ser viáveis técnica e economicamente é necessário estudar a operação de cada sistema, pois sua operação é única, e dificilmente será igual à de outro sistema. Com os estudos realizados nos três sistemas foi possível atingir o objetivo de criar metodologias específicas para análise do potencial em cada um dos casos. Dentre as alternativas propostas destacam-se:

- ✓ Utilização de *by-pass* e VRP em adutoras por gravidade, a fim de manter a BFT em um ponto de operação constante, aumentando a confiabilidade para o atendimento da carga;
- ✓ Alteração na operação de reservatórios que recebem água através de adutoras por gravidade, com o objetivo de maximizar a potência disponível;
- ✓ Utilizar BFT's específicas para diferentes períodos do dia no lugar de VRP's, melhorando o controle de pressão na rede.

Devido à existência de componentes de uma central, tais como câmara de carga e conduto forçado, os casos das adutoras de água bruta e tratada se mostraram atrativos economicamente. No caso da utilização da BFT para controle de pressão não houve viabilidade econômica, já que esta deve ser avaliada considerando apenas os benefícios resultantes da geração de energia e à redução do investimento inicial, devido ao menor custo da BFT com relação à VRP, já que ambas exercem a função de controle de pressão. Sistemas que utilizem VRP's em setores com maior consumo de água podem apresentar viabilidade, já que a potência gerada será maior.

Entretanto, os testes realizados em laboratório mostraram que há uma queda no rendimento quando a BFT opera com controle de vazão à jusante. Além disso, os métodos propostos para determinar o comportamento da BFT fora de seu ponto de máxima eficiência mostraram diferenças quando comparados com os resultados obtidos em laboratório. Isto pode acarretar em erros no projeto da microcentral, que podem definir sua viabilidade.

Portanto, sempre que possível, recomenda-se que seja feito o ensaio na BFT para obter suas reais condições de operação, e assim, garantir o sucesso do projeto. Já o ensaio realizado para verificar a regularização do ponto de operação da BFT através do uso de uma VRP mostrou que é possível manter a potência elétrica gerada constante, o que facilita a aplicação da energia em cargas específicas.

Algumas novas linhas de pesquisa podem ser criadas a partir deste tema, como o aprimoramento dos métodos de obtenção das curvas teóricas das BFT's para melhorar a previsão de seu comportamento hidráulico, a utilização de conversores de frequência para controlar a pressão na saída da BFT, realizando a geração em rotação variável, avaliação da cavitação da BFT nas diferentes condições hidráulicas encontradas, o estudo do potencial energético em sistemas de esgotamento sanitário e o comportamento das BFT's neste caso.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 12218 - Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público**, 1994.

ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SODER, L. **Overview of Government and Market Driven Programs for the Promotion of Renewable Power Generation**, Renewable Energy, n° 22, pp. 197-24, 2001.

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, pp. 404-414, 2012.

ANCN - Associação Nacional de Conservação da Natureza. **Relatório Final: EcoFamílias – Água**, Portugal, 2009.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa n° 482/2012**, Diretoria Geral, Brasília, Brasil, 2012.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Diretoria Geral, Brasília, Brasil, 2012.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al, **Manual de Hidráulica**, 8ª Ed., Editora Edgard Blucher, 670 p., 1998

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

BAPTISTA, J. M. **Como Melhorar a Qualidade em Sistemas de Abastecimento de Água**. 16p. 3<sup>th</sup> World Water Congress, Portugal, 2000.

BSW-SOLAR - Bundesverband Solarwirtschaft. **Statistics for the German solar power industry (photovoltaics)**, Alemanha, 2009.

BUDRIS, A. R., **Multiple "Pump As Turbine" Installations Keep Efficiency High Over Wide Flow Range**, Water World, 2011.

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

CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; **Manual on Pumps Used as Turbines**; MHPG Series; Vol. 11; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany, 1992.

DIAS, M. V. X., BORTONI, E. C., HADDAD, J. **Geração Distribuída no Brasil: Oportunidades e Barreiras**, Revista Brasileira de Energia, vol. 11, nº 2, 2005.

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.

DUARTE, T. A. F. **A Microgeração e o Poder Local**. 50p. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Economia Local- Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2010.

ELETROBRÁS. **Informativo Eletrobrás do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**, nº 81, 2009.

ENERSUL, <http://www.redenergia.com>, site acessado em 30/03/2012.

EPIA - European Photovoltaic Industry Association. **Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2016**, Bélgica, 2012

GREEN, H., WAN, Y. **Current Experience with Net-Metering Programs**, National Renewable Energy Laboratory, 1998.

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

GOUVEIA, R. M. M., GOMES, H. P., CARNEIRO, G. B., SOUSA, R., ALMEIDA, T. S. MELO, W. I. G. ROCHA, B. S., TORRES, T. G., CARDOS, P. H. **Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água com Múltiplos Bombeamentos**, Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, 2011.

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

KITTREDGE, C.P. **Centrifugal Pumps Used a Hydraulic Turbines**. Journal of Engineering for Power, Trans. ASME, p. 74-78, 1963.

LEWINSKI-KESSLITZ. **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, pp. 531-537, 1987.

LOPES, P. H. S. **O Papel da Aneel na Regulação da Geração Distribuída**, Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição, São Paulo, 2011.

MARUNGA, A. HOKO, Z. KASEKE, E. **Pressure Management as a Leakage Reduction and Water Demand Management Tool: The Case of the City of Mutare, Zimbabwe**. *Physics and Chemistry of the Earth*, n. 31, pp. 763-770, 2006.

MCCLASKEY, J. A. **Can you justify hydraulic turbines?**, *Hydrocarbon Processing*, 1976.

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

MOREIRA, R. I. P. **Avaliação do Potencial Eólico em Regime de Microgeração**. 131 p. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010.

MS – Ministério da Saúde. **Portaria nº 518**, 2004.

NASCIMENTO, T. **A Febre da Microprodução**, *Revista Extra*, pp. 77-81, 2008.

OLIVEIRA, K.C.F.; et. al. **Estudo do Aproveitamento do Potencial Residual no Trecho Seco da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, Volta Grande do Rio Xingu**. IX Conferência de PCH: Mercado e Meio Ambiente, São Paulo, 2011.

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

QUAGLIA, R. B. **Incentivo à Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos: Cenários para o Setor Elétrico Brasileiro**, 114 p. Dissertação (Pós Graduação em Energia), Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010.

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, pp. 39-49, 2010.

REIS, L. F. R., CHEUNG, P. B. **Redução de Vazamentos Via Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs)**. VI SEREA – Seminário Íbero-americano Sobre Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2006.

RICARDO, M. **Estudo de Grupos Moto-Bomba Operando como Grupos Geradores em Microcentrais Hidrelétricas**. 240 p. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

RODRÍGUEZ, C. R. C. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede**. 135 p. Dissertação para obtenção do título de mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2002.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0 User's Manual**. Drinking Water Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, 2000.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Apostila para o Curso de Controle de Pressão, através de Válvulas Reguladoras de Pressão (VRP's)**, 1998.

SARZEDAS, G. L. **Planejamento para a Substituição de Tubulações em Sistemas de Abastecimento de Água. Aplicação na Rede de Distribuição de Água da Região Metropolitana de São Paulo**. 114 p. Dissertação para obtenção do título de mestre em Engenharia- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2010**. Brasília, DF, 2010.

STEPANOFF, A. J., **Special Operating Conditions of Centrifugal Pumps**, cap. 13, John Wiley & Sons Inc., New York, 1957.

STERNLICHT, B. **Waste Energy Recovery: an Excellent Investment Opportunity**, Energy Conversion and Management, vol. 22, pp. 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, pp. 329-332, 2008.

TIAGO FILHO, G. L. **Oportunidades em PCH – Desafios de Mercado e tecnológico**. VI Conferência de PCH: Mercado e Meio Ambiente, São Paulo, 2008.

TURKSON, J.; WOHLGEMUTH, N. **Power Sector Reform and Distributed Generation in Sub-Saharan Africa**, Energy Policy, n° 26, pp. 135-145, 2001.

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

VIANA, A.N.C. et al. **Conservação Hidroenergética**. Projeto de Pesquisa, Eletrobrás, 2011.

VIEGAS, J. V. **Redução de Pressão – Uma Alternativa Técnica para Melhorar a Eficiência Operacional**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2001.

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

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.

WATTS Regulator Co. **Catálogo Watts Automatic Control Valves**. 1996.

WILLIAMS, A. **Pumps as Turbines: A User's Guide**, 2ª ed., Practical Action Publishing, 2003.

WRC – Water Research Centre. **Leakage Policy and Practice**. Report 26. Inglaterra, 1985.