



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**USO DE BOMBAS FUNCIONANDO NO SENTIDO REVERSO COMO UMA  
ALTERNATIVA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA EM  
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.**

**Discente:**

SIMÃO, Riquito José

**Supervisor:**

Eng.<sup>o</sup> Jaime Matavele

**Co-Supervisor:**

Eng.<sup>o</sup> Paxis Roque, Ms

Maputo, Abril de 2024



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**USO DE BOMBAS FUNCIONANDO NO SENTIDO REVERSO COMO UMA  
ALTERNATIVA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA EM  
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.**

**Discente:**

SIMÃO, Riquito José

**Supervisor:**

---

Eng.<sup>o</sup> Jaime Matavele

Maputo, Abril de 2024



**Uso de bombas funcionando no sentido reverso como uma alternativa para a geração de energia eléctrica em sistemas de abastecimento de água. Simão Riquito José**

**[Lombada]**

## ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA ..... | I    |
| AGRADECIMENTOS .....  | II   |
| DEDICATÓRIA.....  | III  |
| DECLARAÇÃO DE HONRA .....                                       | IV   |
| ÍNDICE DE TABELA .....  | V    |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | VI   |
| LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....                           | VII  |
| RESUMO .....  | VIII |
| ABSTRACT .....  | IX   |
| CAPITULO 1-INTRODUÇÃO .....                                     | 1    |
| 1.1. Introdução.....  | 1    |
| 1.2. Objectivo geral .....                                      | 2    |
| 1.3. Objectivos específicos .....                               | 2    |
| 1.4. Estrutura do trabalho .....                                | 2    |
| CAPITULO 2-REVISÃO DE LITERATURA .....                          | 3    |
| 2.1. Matriz energética mundial .....                            | 3    |
| 2.2. Sistemas de abastecimento de água .....                    | 4    |
| 2.3. Turbomáquinas Hidráulicas.....                             | 6    |
| 2.3.1. Tipos de bombas.....                                     | 6    |
| 2.3.2. Tipos de turbinas .....                                  | 7    |
| 2.3.2.1. Turbinas de acção .....                                | 7    |
| 2.3.2.2. Turbinas de reacção .....                              | 9    |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 2.3.2.3.   | A escolha das turbinas .....  | 10 |
| 2.4.   | Bombas funcionando como turbina (BFT) .....                             | 11 |
| 2.5.   | Tipos de geradores .....  | 13 |
| 2.6.   | Modificações a serem realizadas na BFT .....                            | 15 |
| 2.7.   | Potencial energético em sistemas de abastecimento de água .....         | 16 |
| 2.7.1.   | Conceitos gerais de dimensionamento .....                               | 16 |
| 2.7.2.   | Aspectos gerais de funcionamento das válvulas redutoras de pressão..... | 18 |
| 2.8.   | Aproveitamento de energia em sistemas de abastecimento de água .....    | 19 |
| 2.8.1.   | Utilização de bombas como turbina .....                                 | 20 |
| 2.8.2.   | Seleção da bomba a funcionar como turbina.....                          | 23 |
| 2.9.   | Condições de trabalho da BFT .....                                      | 25 |
| 2.10.  | Aplicações das BFT 2 no mundo .....                                     | 27 |
| 2.11.  | Modelação e Simulação .....   | 28 |
| CAPITULO 3- CONTEXTUALIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO ..... |   | 31 |
| 3.1.   | Descrição do Local .....  | 31 |
| 3.2.   | Características do sistema de abastecimento .....                       | 35 |
| CAPITULO 4-METODOLOGIA .....                         |   | 37 |
| 4.1.   | Simulação hidráulica .....  | 38 |
| 4.2.   | Seleção da Bomba pelo Método de Chapallaz.....                          | 38 |
| 4.3.   | Potência disponível .....   | 39 |
| 4.4.   | Energia produzível.....   | 40 |
| 4.5.   | Análise Económica .....   | 40 |
| 4.6.   | Impacto ambiental .....   | 41 |

|   |    |
|---|----|
| CAPITULO 5-ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ..... | 42 |
| CAPITULO 6-CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....          | 53 |
| 6.1. Conclusão .....                                | 53 |
| 6.2. Recomendações .....                            | 54 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                    | 55 |
| ANEXOS.....   | 59 |

**TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA**

Declaro que o estudante Riquito José Simão entregou no dia \_\_\_\_/\_\_\_\_/2024 as três cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: \_\_\_\_\_, intitulado: **Uso de bombas funcionando no sentido reverso (BFT) como uma alternativa para a geração de energia eléctrica em sistemas de abastecimento de água (SSA).**

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2024

Chefe da Secretaria

\_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e de todos agradeço a Deus pelo dom da vida e pela grade misericórdia, ao meu pai José Simão pelo apoio e compressão que nunca faltaram.

Aos meus orientadores Eng.º Jaime Matavele, Eng.º Paxis Roque e Professor Dr. Geraldo Nhumaió que sempre se mostraram disponíveis a ajudar e a esclarecer as minhas dúvidas, um grande bem-haja.

A todos meus irmãos de sangue e em Cristo, em especial a minha irmã Júlia José Simão

Quero agradecer aos meus amigos Fernando Massingue e Estevão pelo apoio e contributos para que a realização desse trabalho fosse possível.



## DEDICATÓRIA

*Ao meu Pai, José Simão, e em memória  
a minha querida mãe, Efi António Raulí.*

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Riquito José Simão declaro por minha honra que a presente tese é exclusivamente de minha autoria, não constituindo cópia de nenhum trabalho realizado anteriormente e as fontes usadas para a realização do trabalho encontram-se referidas na bibliografia.

---

Riquito José Simão

## ÍNDICE DE TABELA

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Classificação de turbinas .....   | 7  |
| Tabela 2. Diferenças do funcionamento BFB e BFT .....                                     | 12 |
| Tabela 3. Demanda por Área.....   | 36 |
| Tabela 4. Cálculo para selecção da BFT pelos métodos propostos por Viana e Chapallaz..... | 39 |
| Tabela 5. Pressões dos nós da área 4 sem dispositivo de controlo de pressão.....          | 43 |
| Tabela 6. Pressões dos nós da área 4 após a introdução da VRP .....                       | 45 |
| Tabela 8. Parâmetro para selecção da BFT .....  | 46 |
| Tabela 9. Pressões dos nós da área 4 após a introdução das BFT's .....                    | 48 |
| Tabela 10. Recuperação de energia no SSA ao ano nas 12h de operação BFT .....             | 49 |
| Tabela 11. Custos do projecto .....   | 50 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Energia primaria total consumida a nível mundial .....  | 3  |
| Figura 2. Sistema de abastecimento de água.....   | 5  |
| Figura 3. Turbina Pelton.....   | 8  |
| Figura 4. Princípio de funcionamento de uma turbina.....  | 8  |
| Figura 5. Turbina Francis.....  | 9  |
| Figura 6. Turbina Francis.....  | 9  |
| Figura 7. tipo de turbina a usar de acordo com queda, caudal .....  | 10 |
| Figura 8. Bomba funcionando como turbina.....   | 11 |
| Figura 10. Fluxo de água na bomba quando da operação de bombeamento (A) e da geração de energia mecânica (B)..... | 12 |
| Figura 11. Motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo .....  | 14 |
| Figura 12. Esquema de um sistema gravítico adutor.....  | 17 |
| Figura 13. Esquema de válvula redutora de pressão de controlo por mola.....                                       | 18 |
| Figura 14. Modo genérico de funcionamento de uma VRP convencional.....  | 19 |
| Figura 15. Operação de uma VRP e de BFT.....  | 19 |
| Figura 16. Localização do distrito de Namaacha .....  | 31 |
| Figura 17. Ilustra a composição do sistema de abastecimento.....  | 35 |
| Figura 18. Divisão da região em áreas .....   | 36 |
| Figura 19. Fluxograma da metodologia desenvolvida e implementada neste trabalho .....                             | 37 |
| Figura 20. Pré-selecção da BFT.....   | 38 |
| Figura 21. Comportamento das pressões na primeira simulação .....   | 42 |
| Figura 22. Comportamento das pressões com actuação da VRP .....   | 44 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

|            |  |
|------------|--|
| SAA        | Sistema de abastecimento de água                               |
| BFT        | Bomba a funcionando como turbina                               |
| PAT        | Pump as Turbine  |
| BFB        | Bomba a funcionando como bomba                                 |
| VRP        | Válvula redutora de pressão                                    |
| $\Delta P$ | Variação da pressão  |
| VAL        | Valor Actualizado líquido                                      |
| TIR        | Taxa interna de rendibilidade                                  |
| ETA        | Estação de tratamento de água                                  |
| VRC        | Válvula Reguladora de Caudal                                   |
| VPCF       | Válvula de Perda de Carga Fixa                                 |
| VA         | Válvula de Controlo da Pressão a Montante ou Válvula de Alívio |
| VB         | Válvula de Controlo de Perda de Carga ou Válvula de Borboleta  |
| EPA        | Environmental Protection Agency                                |
| GEE        | Gases de efeito estufa   |

## RESUMO

O presente trabalho visa, objectivamente, estudar a viabilidade do aproveitamento da energia hidráulica excedente em condutas dos sistemas de abastecimento de água em que a distribuição ao consumidor é feita por gravidade, através da implantação de bombas funcionando como turbina (BFT) acoplados a geradores eléctricos.

A utilização de bombas funcionando como turbina em substituição às válvulas redutoras de pressão (VRP) é uma alternativa que vem sendo estudada em todo o mundo, tendo em vista que esta concilia o controlo de pressão com a geração de energia eléctrica. A priori, as turbinas são os equipamentos mais apropriados, mas as BFT vêm se destacando por apresentarem baixo custo, facilidade e rapidez na aquisição e obtenção de peças para a reposição, pois são equipamentos robustos e produzidos em grande escala pela indústria. Trata-se de um método de mitigação para controlar as perdas referidas convergindo no âmbito da eficiência energética.

Esta pesquisa apresenta uma metodologia que detalha a regulação da pressão em um projecto de abastecimento de água para o município de Namaacha. Os valores das variáveis hidráulicas foram obtidos por meio do software EPANET 2.00, onde por meio desta efectuaram-se diversas simulações hidráulicas.

Foram feitas comparações do comportamento das válvulas redutoras de pressão com as bombas funcionando como turbina, sob ponto de vista de controlo de pressão do sistema de abastecimento. Estimou-se a energia produzida anualmente com a instalação de duas BFT's que resultou em cerca de 46,866 kwh/ano, e avaliou-se a viabilidade económica e ambiental do projecto com um VAL de 644 017,1 Mzn.

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que o projecto de instalação das BFT's é viável, e por fim foram indicadas algumas recomendações.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade, Sistemas de abastecimento de água, BFT, Microgeração de energia.

## ABSTRACT

The present work aims, objectively, to study the feasibility of using surplus hydraulic energy in pipelines of water supply systems in which the distribution to the consumer is made by gravity, through the implementation of pumps working as PAT turbines coupled to electric generators.

The use of pumps working as a turbine to replace pressure reducing valves (PRV) is an alternative that has been studied all over the world, considering that it reconciles pressure control with the generation of electricity. the turbines are the most appropriate equipment, but PATs have been standing out for their low cost, ease and speed in acquiring and obtaining spare parts, as they are robust equipment and produced on a large scale by the industry. It is a mitigation method to control the aforementioned losses, converging in the field of energy efficiency.

This research presents a methodology that details the regulation of pressure in a water supply project for the municipality of Namaacha. The values of the hydraulic variables were obtained using the EPANET 2.00 software, where several hydraulic simulations were performed.

Comparisons were made of the behavior of the pressure reducing valves with the pumps operating as a turbine, from the point of view of pressure control of the supply system. The energy produced annually with the installation of two PAT`s was estimated, that resulted in 46,866 kwh/year, and the economic and environmental viability of the project was assessed with NPL de 644 017,1 Mzn.

Based on the results obtained, it was possible to conclude that the PAT`s installation project is viable, and finally some recommendations were indicated.

**Keywords:** Sustainability, Water supply systems, PAT, Micro energy generation.

## CAPITULO 1-INTRODUÇÃO

### 1.1. Introdução

Uma das principais prioridades das populações é o atendimento por abastecimento de água e energia eléctrica em quantidade e qualidades adequadas.

Segundo a UNESCO (2009), água e energia estão sujeitas a pressões de mesma natureza: demográficas, económicas, sociais e tecnológicas. Nesse contexto, promover a eficiência hidráulica e energética de sistemas de abastecimento de água, torna-se um objectivo estratégico para o alcance da sustentabilidade de cidades e nações, uma vez que, na sua maioria, tais sistemas demandam grandes montantes de energia eléctrica para bombeamento, ao mesmo tempo em que perdem significativa parcela da água captada durante o processo de disponibilização.

Os sistemas de abastecimento de água não são estáticos, sendo que respondem a condições dinâmicas de operação, onde devem adaptar-se a condições de caudais e pressões de consumo. Portanto para regular e controlar essas variáveis são geralmente instaladas válvulas, contudo o seu uso muitas vezes reflecte-se em energia dissipada.

As bombas funcionando no sentido reverso BFT surgem neste âmbito como uma alternativa para o controle da pressão e uma medida de mitigação relativamente às perdas energéticas do sistema. Quando comparadas às unidades hidro geradoras convencionais, as unidades BFTs podem ser referenciadas como um método novo de conversão hidráulico-mecânica, a intenção dos estudos deste tipo é de minimizar os custos de implantação do sistema hidro gerador.

O presente trabalho visa avaliar a viabilidade no uso da tecnologia BFT como uma fonte de geração de energia não convencional em sistemas de abastecimento de água em que a distribuição de água ao consumidor é feita por gravidade.

O aproveitamento hidroeléctrico em sistemas de abastecimento, feitas em larga escala, reduziriam a demanda por novas fontes de energia, reduzindo os custos e impactos ambientais



## **1.2. Objectivo geral**

- Avaliar a viabilidade do uso da tecnologia bomba funcionando no sentido reverso (BFT) para a geração de energia eléctrica em um sistema de abastecimento de água (SAA) em Namaacha.

## **1.3. Objectivos específicos**

- Comparar o comportamento das válvulas redutoras de pressão por bombas funcionando no sentido reverso BFT, para o controle da pressão no SAA;
- Estimar a energia produzida pela BFT;
- Analisar a viabilidade económica e as vantagens ambientais de utilização da tecnologia BFT no SAA.

## **1.4. Estrutura do trabalho**

O Capítulo 1 versa sobre as considerações iniciais, a motivação do trabalho, seus objectivos e a estrutura do trabalho;

No Capítulo 2 é relatada a revisão de literatura, onde são apresentados os principais conceitos e teorias relevantes para a presente abordagem;

No Capítulo 3 será feita a contextualização da investigação, onde será feita a descrição do caso de estudo;

No Capítulo 4 será feita a descrição da metodologia desenvolvida e implementada neste trabalho, bem como os passos a seguir para a resolução do problema;

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da pesquisa;

Por último, no Capítulo 6 são apresentados as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

## CAPITULO 2-REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Matriz energética mundial

É inquestionável que para o mundo continuar a crescer e se desenvolver no ritmo actual a humanidade deve Planear seu desenvolvimento pautado em preocupação crescente com o binómio meio ambiente e energia (Gilpin, 1995).

Uma das formas de conciliar crescimento económico com respeito ao meio ambiente é por meio da utilização de uma matriz energética limpa.

Matriz energética é o conjunto de fontes de energia disponíveis para atender a demanda de um determinado local cidade, estado, país etc. A matriz energética pode ser dividida entre dois tipos de fontes de energia: as renováveis, como a hidráulica, eólica, solar e biomassa e as não renováveis, como petróleo, carvão mineral e gás natural.

Segundo a Agência Internacional de Energia a matriz energética mundial em 2022 era composta por 32% de petróleo e derivados; 27% de carvão mineral; 23% de gás natural; 10% de biomassa, 5% de energia nuclear, 3% de energia hidráulica e 2% de outros.

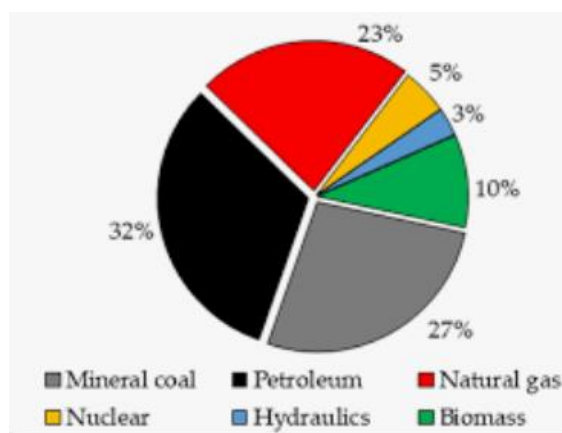


Figura 1. Energia primaria total consumida a nível mundial [International Energy Agency, 2022].

É possível observar com base na Figura (1) que ainda existe uma forte dependência e dominância dos hidrocarbonetos na matriz energética mundial, e isso é igualmente observado em África e em particular em Moçambique, com graves repercussões no meio ambiente, que tem exigido a mudanças da estrutura da matriz energética para uma nova, que será dominada por fontes de energia de baixa intensidade de carbono.

O sector energético passou a procurar novas formas de geração de energia devido a essas questões. Uma das opções encontrada, foi implementar uma geração de energia em pequena

quantidade, próxima ao local de consumo. Esse tipo de produção de energia é conhecido como microgeração. Essa tecnologia, baseada em uma fonte renovável e tecnicamente dominada por factores de ordem técnica, económica e regulatória, principalmente, em função do seu alto custo inicial de implantação, considerado alto em relação a outras fontes de geração de energia.

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

Recentemente, as entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água tem tomado atitudes mais pró-activas no sentido de melhorar a eficiência energética através da produção de energia eléctrica obtida pela recuperação da energia dissipada em algumas etapas dos seus processos produtivos. Sendo assim uma fonte alternativa de energia, e diversificando assim a matriz energética nas empresas prestadoras de serviços de saneamento.

A optimização desses sistemas, feitas em larga escala, reduziriam a demanda por novas fontes de energia, reduzindo os custos e impactos ambientais.

## 2.2. Sistemas de abastecimento de água

Entende-se por Sistema de Abastecimento de Água, um conjunto de diversas unidades/infra-estruturas de construção civil organizados com objectivo de levar água potável para o uso no consumo doméstico, indústria, serviço público, entre outros (Tsutiya, 2006).

*Os sistemas de abastecimento apresentam os seguintes componentes básicos a saber:*

- **Manancial:** é o corpo de água superficiais ou subterrâneo, de onde é retirada a água para o abastecimento. Deve fornecer vazão suficiente para atender a demanda de água no período de projecto, e a quantidade dessa água deve ser adequada sob o ponto de vista sanitário (Tsutiya, 2006)
- **Captação:** conjunto de estruturas e dispositivos construídos ou montados junto ao manancial, para retirada de água destinada ao sistema de abastecimento (Tsutiya, 2006)
- **Estação elevatória:** conjunto de obras equipamentos destinados a recalcar a água para unidade seguinte. (Tsutiya, 2006)

- **Adução:** canalização que se destina conduzir água entre as unidades que precedem a rede de distribuição, não distribuem água aos consumidores. O escoamento nas condutas do sistema, dependendo das exigências topográficas do terreno e das localizações dos pontos a servir, pode ser feito por gravidade ou por elevação, recorrendo usualmente a equipamento electromecânico (Tsutiya, 2006).
- **Estação de Tratamento de água:** Conjunto de unidades destinadas a tratar a água de modo a adequar as suas características aos padrões de potabilidade (Tsutiya, 2006).
- **Reservatório:** é o elemento do sistema de distribuição de água destinado a regularizar as vazões entre vazões de adução e condicionar as pressões na rede de distribuição (Tsutiya, 2006).
- **Rede de Distribuição:** Na fase de distribuição, a água já tratada é enviada para o consumo através de um sistema de tubos, A essa tubulação é dado o nome de rede de distribuição de água (Tsutiya, 2006).
- **Nós:** são pontos da rede onde as condutas se ligam entre si e onde a água entra e sai da rede (Tsutiya, 2006).

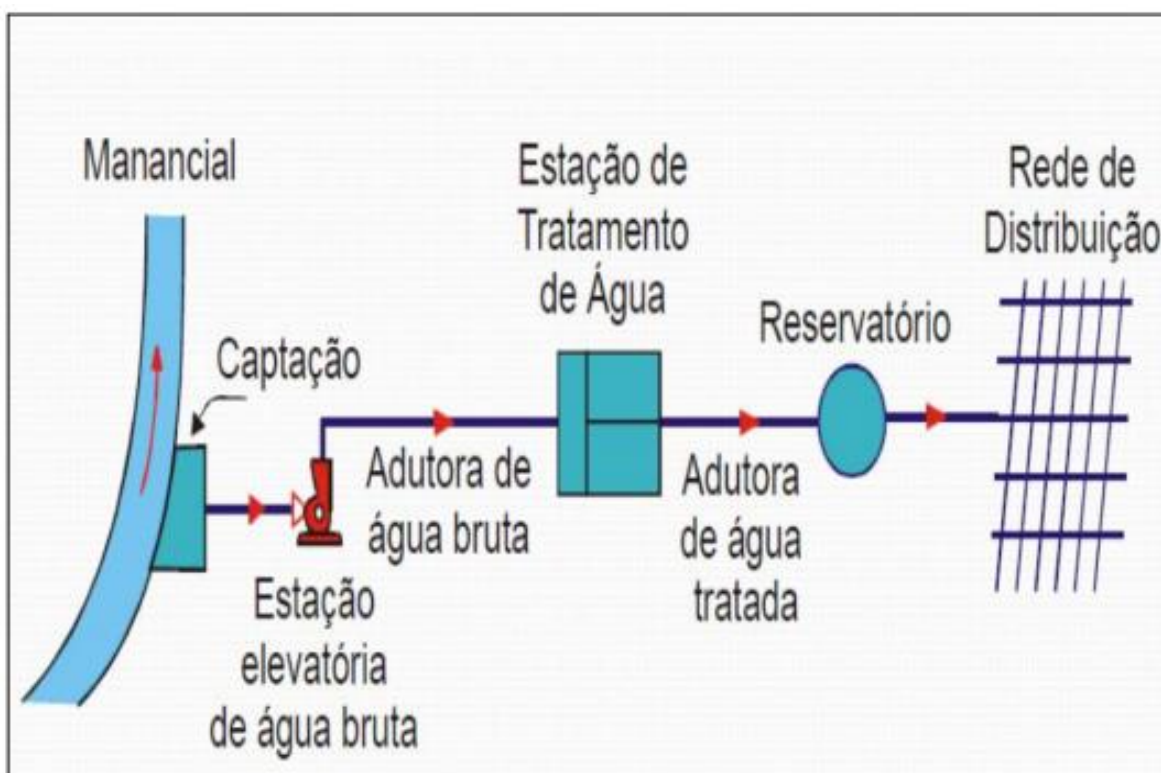


Figura 2. Sistema de abastecimento de água [Alem, 2013].

### 2.3. Turbomáquinas Hidráulicas

Máquinas hidráulicas são mecanismos utilizados na transformação de energia hidráulica em energia mecânica, ou vice-versa (Prieto, 2012). Elas podem ser divididas em três grupos de acordo com o seu princípio de transformação de energia

- **Bombas** são turbomáquinas que transferem energia ao fluido em questão. As bombas convertem a energia mecânica recebidas por elas em energia de pressão para o fluido.
- **Turbinas** atuam de forma inversa as bombas, ou seja, elas recebem a energia cedida pelo fluido. As turbinas convertem a energia cinética do fluido em energia mecânica.
- **Turbinas – Bombas** são um tipo de máquina hidráulica que podem funcionar tanto como uma turbina recebendo energia do fluido ou como bomba cedendo energia ao fluido. A inversão de sentido de escoamento faz com que essa categoria de turbo máquina seja capaz de actuar como Bomba ou Turbina.

#### 2.3.1. Tipos de bombas

As bombas podem ser classificadas de acordo com a forma de transformação do trabalho em energia hidráulica.

**Turbo bombas ou bombas centrífugas** - O agente receptor ou fornecedor de energia é um fluido em escoamento contínuo pelas fronteiras do volume de controlo. O fluido não se encontra confinado na bomba em momento algum.

**Bombas Volumétricas ou de Deslocamento Positivo** - A movimentação do líquido se deve pelo movimento do mecanismo da bomba e as forças geradas pela bomba tem a mesma direcção que seu deslocamento. O líquido preenche o espaço predefinido no interior da bomba e é excluído com a acção do mecanismo.

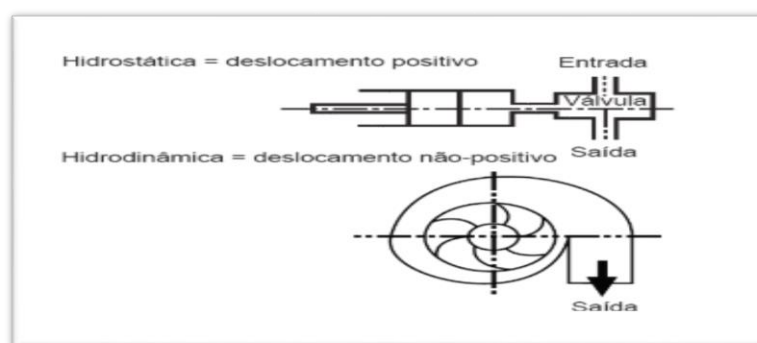


Figura 3. Classificação das bombas [Alem, 2013].

### 2.3.2. Tipos de turbinas

As turbinas hidráulicas são máquinas que promovem uma transformação de energia hidráulica em energia mecânica de rotação. Como solução comum utilizada nos microaproveitamentos hidroeléctricos, podem classificar-se as turbinas segundo o princípio de operação, dividido em dois grandes grupos (Lopes de Almeida, 2007):

- **Turbinas de reacção** - Se a água, sob pressão, atuam nas pás do rotor, estando a turbina completamente imersa no escoamento;
- **Turbina de acção ou impulsão** - Se a pressão da água é convertida em energia cinética, actuando nas pás do rotor á pressão atmosférica, ou seja, estando a turbina emersa.

No quadro seguinte apresentam-se os principais tipos de turbina segundo o princípio de operação.

Tabela 1. Classificação de turbinas [Harvey, 1993]

| Reacção | Acção                     |
|---------|---------------------------|
| Kaplan  | Pelton                    |
| Hélice  | Cross-Flow (Banki/Michel) |
| Francis | Turgo                     |

#### 2.3.2.1. Turbinas de acção

As turbinas de acção são constituídas essencialmente pela roda e um ou mais órgãos, designados por injectores, cuja função é transformar a energia de pressão do escoamento em energia cinética e dar saída a jatos convenientemente orientados para a roda. (Penche, 2004).

As **turbinas Pelton** (ver figura 4), aplicadas em aproveitamentos com caudais pequenos e altura de queda útil elevada. Nos pequenos aproveitamentos hidroeléctricos costuma-se utilizar turbinas de eixo horizontal, porque assim utiliza-se um gerador de eixo horizontal que tem um custo menor. Em grandes aproveitamentos, este tipo de turbinas só é considerado para quedas superiores a 50 metros.

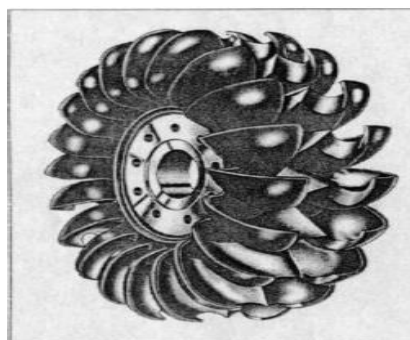


Figura 4. Turbina Pelton [Quintela, 2009].

A **turbina Turgo** é muito semelhante a uma turbina Pelton, pelo que partilha o mesmo princípio de funcionamento. No entanto apresentam diferenças ao nível das conchas e o jato não incide na turbina de forma perpendicular, mas sob um ângulo típico de  $20^\circ$  como se pode ver na figura 5.

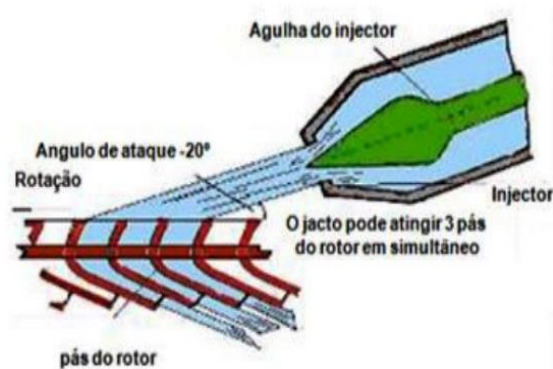


Figura 5. Princípio de funcionamento de uma turbina [Rocha, 2008].

As **turbinas Cross-flow** podem ser chamadas de Banki-Mitchell ou Ossberger. Este tipo de turbina é usado principalmente na gama de baixas potências. O seu rendimento é inferior aos das turbinas de projectos convencional, mas mantém-se elevado ao longo de uma extensa gama de caudais.

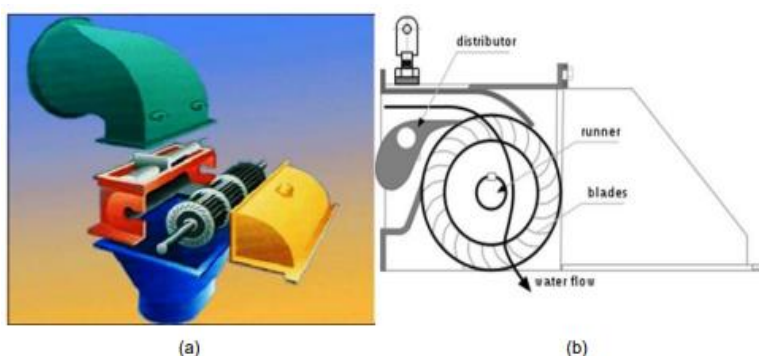


Figura 6. (a) Esquema global de uma turbina Cross-flow e (b) princípio de funcionamento [Rocha, 2008].

### 2.3.2.2. Turbinas de reacção

As turbinas de reacção, além da roda, incluem (Penche, 2004):

- Um distribuidor, com função de transformar parte da energia de pressão do escoamento em energia cinética, de orientar a água para a roda, distribuindo-a uniformemente em toda a periferia, e de regular o caudal absorvido pela turbina;
- Uma evoluta a montante do distribuidor que alimenta de água este órgão;
- Um difusor, constituído por uma conduta de secção progressivamente crescente, de forma a promover a recuperação parcial da energia cinética à saída da roda.

A **turbina Francis** caracteriza-se por ter uma roda formada por uma coroa de alhetas fixas, que constituem uma série de canais hidráulicos que recebem a água radialmente e a orientam para a saída do rotor numa direcção axial.



Figura 7. Turbina Francis [Quintela, 2009].

As **turbinas Kaplan e Hélice** (ver figura 8) estão associadas a caudais elevados e quedas reduzidas (entre 9 e 70 metros) e apresentam eficiências que podem alcançar os 94%. São constituídas por uma câmara que pode ser aberta ou fechada, por um distribuidor e normalmente por uma roda com 6 pás.

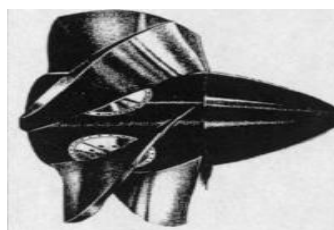


Figura 8. Turbina Francis [Quintela, 2009].

Utilizam-se estas turbinas para pequenas quedas, inferiores a trinta metros. A queda útil pode ter grandes variações (60-140%) e o caudal também pode variar (15-110%) do valor nominal como se pode ver na figura 8.



### 2.3.2.3.A escolha das turbinas

Os fabricantes de turbinas costumam apresentar ábacos ou diagramas em mosaico, onde estão representadas as áreas de aplicação dos diferentes tipos de turbinas que fabricam. Desta forma torna-se mais fácil a selecção de uma turbina para um determinado aproveitamento hidroeléctrico.

O projecto e o fabrico dessas turbinas baseia-se numa experiência acumulada. Actualmente, e no campo dos pequenos aproveitamentos hidroeléctricos, estes fabricantes tendem a fornecer o conjunto turbina – gerador, sob o pretexto que as unidades deverem ser compatíveis.

A escolha da turbina é também crucial para o bom rendimento da central e deve ser feita de acordo com a interacção de 3 parâmetros: a altura útil da queda, o caudal e a potência do aproveitamento.

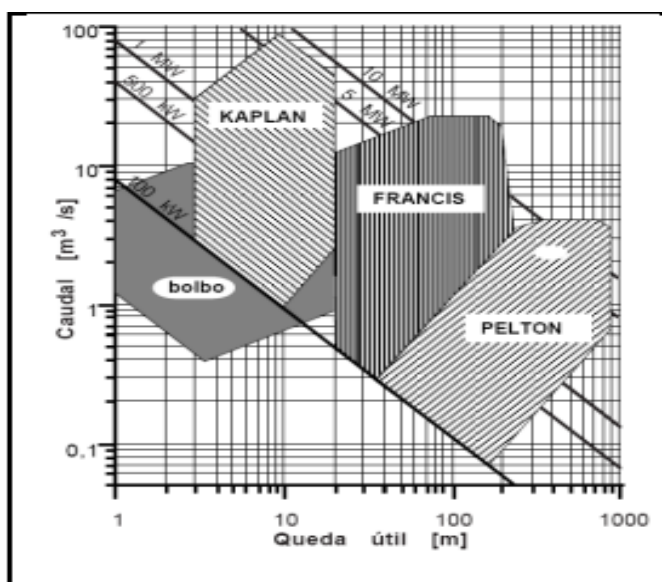


Figura 9. Tipo de turbina a usar de acordo com queda, caudal [Guedes, 1994].

Na escolha de uma determinada turbina, para além dos valores do caudal ( $Q$ ) e da queda útil ( $H_u$ ), podem ser considerados outros parâmetros. Normalmente este tipo de trabalho é executado pelo fabricante de turbinas que, em função dos dados relativos ao aproveitamento e de um conjunto de valores estatísticos relacionados com a sua anterior produção, selecciona o tipo de turbina, as características da máquina e as dimensões dos seus elementos constituintes.

## 2.4. Bombas funcionando como turbina (BFT)

O funcionamento de uma bomba hidráulica não se limita apenas ao propósito usual do seu fabrico, ou seja, a elevação de um determinado caudal a uma determinada altura, consumindo energia eléctrica da rede. Esta pode apresentar diferentes comportamentos quando sujeita a determinadas condições, quer em regime permanente, quer em regime variável.

As **Bombas a funcionar como turbina (BFT)** surgiram da utilização de uma máquina de fluxo cuja finalidade é trabalhar como bomba e que foi adaptada para trabalhar como turbina. Uma bomba hidráulica é uma máquina de fluxo trabalhando na função *operadora*, ou seja, ela fornece energia a um fluido para transportá-lo de um local de baixa pressão para um de alta pressão. Uma *turbina* é uma máquina de fluxo trabalhando na função *motriz*, ou seja, ela transforma a energia disponível na natureza em trabalho mecânico.

Os estudos sobre BFT foram motivados pela necessidade de se obter um equipamento robusto e de fácil manutenção para ser utilizado em pequenos aproveitamentos. Kittredge, em 1961, foi o primeiro a fazer estudos sobre esse assunto. Em seu trabalho, relacionou o desempenho de uma bomba em modo motriz (como turbina) com a sua velocidade específica.

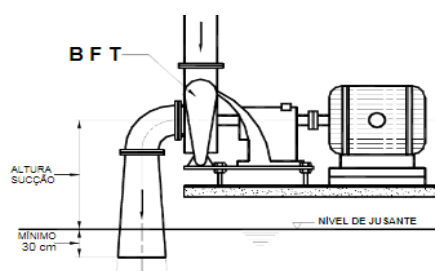


Figura 10. Bomba funcionando como turbina. Fonte [Souza et al,1983]

O termo BFT trata-se, pois de resumir a inversão da finalidade de uma bomba hidráulica, que é o nome dado comercialmente à máquina de fluxo operatriz. Desta forma, a bomba que tradicionalmente seria usada para accionar o fluido (no caso a água) de um local de menor pressão para um de maior pressão, agora será usada para transformar energia potencial em energia mecânica.

Em geral as BFT são mais apropriadas para locais com quedas médias, que normalmente requerem uma turbina Pelton, com multijactos e de baixa velocidade específica, ou então uma pequena cross-flow. Para potências abaixo dos 10 KW, o custo de uma BFT é significativamente mais baixo que uma cross-flow ou Pelton se a queda for inferior a 30 metros (Piqueiro,1991).

Na Figura (11), apresenta-se o funcionamento de uma bomba centrífuga como bomba e como turbina. No caso do funcionamento como bomba, mostrado na Figura (a), o líquido entra na sucção a baixa pressão, transforma energia de velocidade em pressão através do rotor, saindo pela descarga. No funcionamento como turbina, mostrado na Figura (b), o líquido entra com energia de pressão, acciona o rotor em reverso e sai com baixa pressão.

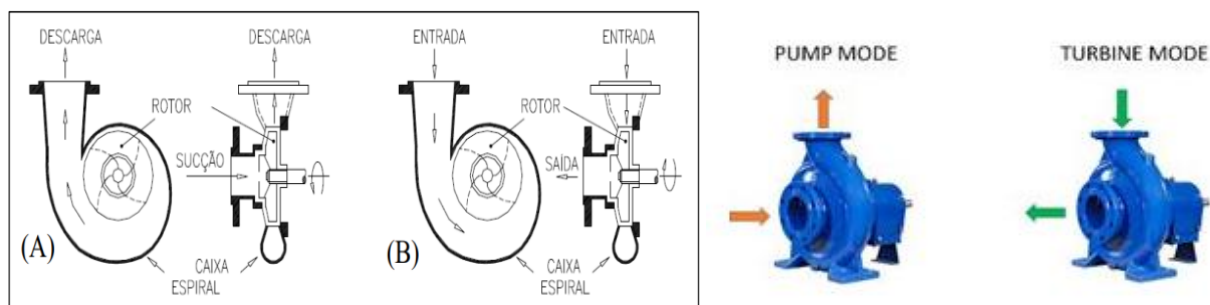


Figura 11. Fluxo de água na bomba quando da operação de bombeamento (A) e da geração de energia mecânica (B) [fonte: Viana,1987].

A tabela abaixo ilustra algumas diferenças do funcionamento das duas máquinas:

Tabela 2. Diferenças do funcionamento BFB e BFT

| Aspectos de funcionamento  | Turbina   | Bomba   |
|----------------------------|---|---|
| Potência de entrada        | Potência hidráulica   | Potência mecânica   |
| Potência de saída          | Potencia mecânica   | Potencia hidráulica   |
| Aspectos de pressão        | A pressão recuperada cresce conforme cresce o caudal                      | A pressão gerada decresce conforme cresce o caudal            |
| Sentido de rotação         | As pás da turbina giram no sentido oposto ao seu funcionamento como bomba |   |
| Direcção das pás           | Mesma direcção em ambos   |   |
| Condições de funcionamento | Ambos podem funcionar em condições de caudais e velocidades variáveis     |   |
| Cavitação                  | Menos sensíveis a cavitação   | Depende dos parâmetros de aspiração, mas sensível a cavitação |

Quando comparadas às unidades hidro geradoras convencionais, as unidades BFTs podem ser referenciadas como um método novo de conversão hidráulico-mecânica, uma vez que esta tecnologia começou a ser investigada a partir da segunda metade do século XX, ao passo que as primeiras turbinas convencionais surgiram na primeira metade do século XIX. A intenção dos estudos deste tipo de unidade hidro geradora é de minimizar os custos de implantação do sistema hidro gerador como um todo e assim permitir que comunidades não assistidas pela energia eléctrica passem a ter acesso a esta.

Este tipo de unidade é ideal para aproveitamentos hidroeléctricos onde os estudos de viabilidade de utilização de unidades convencionais mostram-se inviáveis.

## **2.5. Tipos de geradores**

Os geradores são máquinas que convertem energia mecânica em energia eléctrica, podem estar ligados directa ou indirectamente as turbina ou BFTs. Existem dois tipos de gerador aplicáveis a pequenos aproveitamentos hidroeléctricos, o gerador síncrono, ou alternador, e o gerador assíncrono, ou de indução. A escolha dos geradores depende maioritariamente das características da rede à qual será ligado.

### **Gerador síncrono**

O gerador síncrono, possuindo um sistema de auto excitação, pode funcionar de forma autónoma, para abastecimento por exemplo a comunidades isoladas, ou funcionar ligado a uma rede de energia de grande dimensão à qual estão ligados outros geradores a rodar em sincronismo (Harvey, 1993). No funcionamento de forma isolada, sendo os equipamentos eléctricos desenvolvidos para operar com uma voltagem e frequência específicas, é necessária a adopção de dispositivos reguladores que mantenham estas duas grandezas constantes, independentemente das solicitações da rede interligada (Rocha, 2008), (Ramos & Borga, 1999). No segundo caso, o gerador necessita ser sincronizado com a frequência da rede antes de ser ligado.

### **Gerador assíncrono**

O gerador assíncrono é um motor de indução do tipo “*gaiola de esquilo*”, a operar em sentido inverso, ou seja, recebendo energia mecânica rotacional no seu veio e entregando energia eléctrica nos seus terminais (Terrés et al., 2005). A rotação do gerador está directamente relacionada com a frequência da rede à qual está ligado, não sendo neste caso necessária a

adopção de qualquer dispositivo de controlo (Penche, 2004). O gerador assíncrono necessita de ligação a uma rede eléctrica para ser excitado, contudo, pode fazer-se funcionar um gerador assíncrono de forma autónoma em pequenas redes isoladas, onde a qualidade da electricidade não é uma prioridade, sendo para isso necessária a instalação de equipamento adicional que promova a excitação do mesmo (Harvey, 1993).

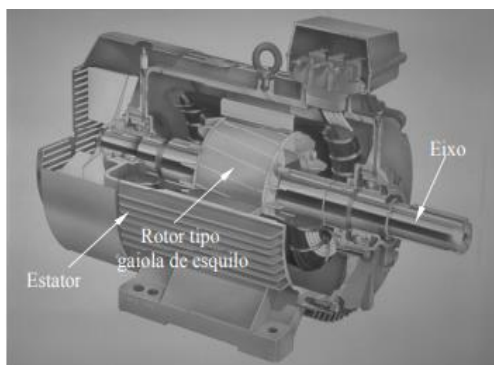


Figura 12. Motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo [www.ieee-kc.org]

O gerador de indução apresenta inúmeras vantagens quando a sua potência gerada é diminuta em relação à potência da rede interligada, podendo no âmbito dos pequenos aproveitamentos hidroeléctricos considerar-se uma opção bastante competitiva em relação ao gerador síncrono (Williams, 1995), (Terrés et al., 2005), (Harvey, 1993), (Penche, 2004):

- Mais baratos, para potências abaixo de 1MW;
- Ampla oferta no mercado, como motores;
- Manutenção simples, pouco especializada e pouco frequente;
- Construção mais simples e robusta;
- Não é danificado, mesmo que haja uma desconexão da rede

Os geradores síncronos utilizam-se normalmente quando as condições de exploração obrigam a uma maior versatilidade e autonomia, como por exemplo no fornecimento de energia a uma rede isolada que apresenta solicitações de fornecimento de energia variáveis (da Rocha, 2008).

## 2.6. Modificações a serem realizadas na BFT

Como o sentido de rotação é invertido e a altura é elevada na BFT, são necessárias algumas verificações para garantir o seu bom funcionamento a fim de evitar que ocorram danos ao equipamento durante o seu funcionamento.

- Pressão que a voluta da bomba vai ser submetida devido ao aumento da altura. Segundo Viana (2002), a máxima pressão da BFT deve obedecer a inequação abaixo:

$$P_{max t} \leq 1,5 \cdot P_{max b} \quad (1)$$

Em que:

$P_{max t}$ : pressão máxima admissível na BFT [m];

$P_{max b}$ : pressão máxima da bomba [m].

- Rotação de disparo da BFT, pois a bomba é projectada para operar em uma determinada rotação, que se for superada, poderá causar danos no equipamento girante. Viana (1987), obteve experimentalmente uma inequação que permite o cálculo da rotação de disparo.

$$ndt \leq 1,53 \cdot nnb \quad (2)$$

Em que:

$ndt$ : rotação de disparo da BFT [rpm];

$nnb$ : rotação nominal da bomba [rpm].

- Tensão aplicada no eixo da bomba, pois sabe-se que, a potência de eixo com a máquina operando como turbina, é superior àquela quando a máquina estiver operando como bomba. A equação abaixo pode ser utilizada para calcular a tensão que o material do eixo vai ser submetido devido ao aumento da potência.

$$\tau t = 0,81 \left( \frac{Pet}{ntd^3} \right) \quad (3)$$

Em que:

$\tau t$ : tensão no eixo da bomba [N/m<sup>2</sup>];

$Pet$ : potência de eixo da BFT [W];  $nt$ : rotação da BFT [rps];

$d$ : diâmetro do eixo [m].

A tensão no eixo deve ser menor do que aquela admissível para o material em questão. A tensão admissível do material pode ser encontrada em tabelas específicas.

## 2.7. Potencial energético em sistemas de abastecimento de água

Alguns sistemas de abastecimento de água devido a topografia do território onde estão localizados apresentam um excesso de energia ou carga hídrica que exigem a utilização de órgãos ou estruturas hidráulicas dissipadores que provoquem o abaixamento da linha piezométrica, garantido assim o controlo da pressão.

A limitação da pressão no interior de condutas ou sistemas hidráulicos prende-se essencialmente com factores de ordem económica e de segurança do respectivo equipamento.

Assim, para a uniformização e controlo da pressão, recorre-se usualmente a:

- Divisão da rede em zonas por patamares de pressão, através de reservatórios,
- Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) ou Válvulas Altimétricas (VA).

Atendendo a que estes sistemas representam basicamente sistemas dissipadores de energia em excesso, tornar-se-á viável a substituição de válvulas redutoras de pressão VRP por bombas a funcionar como turbina BFT, para recuperação do excesso da energia hidráulica?

Para uma melhor compreensão do assunto, far-se-á uma pequena explicação acerca do dimensionamento dum sistema adutor e características de funcionamento (Rocha, 2008).

### 2.7.1. Conceitos gerais de dimensionamento

O dimensionamento hidráulico das condutas adutoras assenta-se na definição do caudal de cálculo e na determinação da secção mais económica. Para este objectivo, torna-se necessário conhecer qual o volume de cálculo a aduzir (geralmente o volume diário médio do mês de maior consumo), de modo a quantificar as perdas de carga e os limites admissíveis da velocidade de escoamento no interior da conduta.

Em relação à velocidade, é usualmente tido em conta um valor máximo de 1,5 m/s, valor que é normalmente considerado aceitável. No que respeita aos valores mínimos, é habitual procurar garantir um valor mínimo de 0,3 m/s, de modo a evitar o depósito de materiais de pequena dimensão arrastados com o escoamento.

O diâmetro é determinado, depois de escolhido o material a utilizar, partindo de um conjunto de diâmetros comerciais que se enquadrem dentro dos limites de velocidade máxima e mínima anteriormente definidos. Isto é, a velocidade máxima obriga a um diâmetro mínimo enquanto o diâmetro máximo é imposto pela velocidade mínima.

A opção por um deles resulta da conjugação do caudal de cálculo com o diâmetro comercial que conduz ao aproveitamento máximo da velocidade e à solução técnica e economicamente mais vantajosa, desde que se verifiquem as condições de pressão adequadas.

A verificação de tais condições de pressão é concretizada à custa da quantificação dos correspondentes valores ao longo do traçado (em perfil) da conduta e, em particular, no seu extremo de jusante, seja este à entrada de um reservatório ou outro qualquer órgão, de modo a que tais valores se enquadrem nos limites de resistência mecânica possível para a conduta em causa. Apresenta-se, em esquema, dois possíveis funcionamentos hidráulicos.

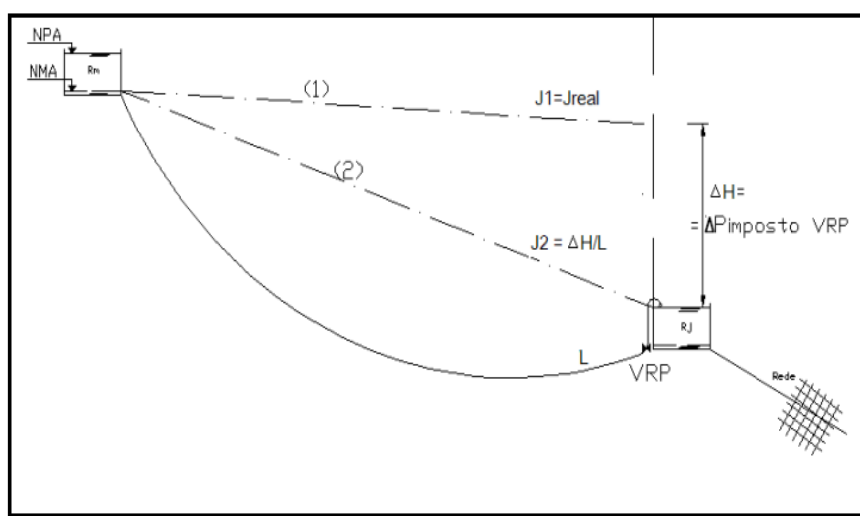


Figura 13. Esquema de um sistema gravítico adutor [Oliveira, 2008].

Antes de mais, importa apresentar a noção de linha piezométrica. Esta linha representa, em cada ponto da conduta, a energia potencial do escoamento e pode ter como referência o nível médio das águas do mar ou outro qualquer nível de referência, como por exemplo, o ponto mais baixo da conduta.

O funcionamento hidráulico representado pela linha piezométrica (2), em que a perda de carga unitária –  $j_2$  tem valor igual à razão da diferença de cotas entre os reservatórios de montante e jusante –  $R_m$  e  $R_j$  respectivamente, e o comprimento da conduta, conduz a um diâmetro teórico mínimo que origina velocidades máximas eventualmente superiores à máxima admissível.

Como tal, terá de ser encontrado outro tipo de funcionamento hidráulico cujas condições de funcionamento estejam dentro dos limites admissíveis.

Surge então a linha piezométrica (1) que, por imposição das condições de pressão à entrada do reservatório de jusante ( $\Delta P$  imposto VRP), possui uma perda de carga unitária –  $j_{real}$  ajustada às



velocidades admissíveis do escoamento no interior da conduta e das suas perdas de carga contínuas.

Daqui importa sublinhar que, num escoamento por gravidade em que se dispõe de um desnível excessivo, quando numa determinada secção da adutora, se pretender reduzir a pressão de forma a não exceder, para jusante, um valor determinado, eventualmente a pressão atmosférica, é necessário recorrer à utilização de válvulas redutoras de pressão VRP.

A utilização de válvulas redutoras de pressão num sistema de distribuição de água tem por objectivo a uniformização e o controlo da pressão através da divisão da rede em zonas definidas por patamares de pressão de acordo com a sua topografia. Em geral, cada zona é abastecida dentro de uma determinada gama de pressões. Estas pressões são garantidas ou pela utilização de reservatórios intermédios (elevados ou apoiados) ou pela instalação de válvulas redutoras de pressão nas entradas activas da zona.

### 2.7.2. Aspectos gerais de funcionamento das válvulas redutoras de pressão

Existem diversos tipos de válvulas redutoras de pressão, sendo as mais comuns - válvulas de mola, de pistão e de diafragma (Figura 2) (Covas e Ramos, 1998)

Genericamente, o princípio de funcionamento de uma VRP consiste em accionar o dispositivo de obturação sempre que a pressão a jusante for demasiado elevada, por forma a aumentar a perda de carga localizada no sistema, reduzindo o valor da pressão a jusante até ao valor pretendido (valor designado por carga de definição da válvula redutora de pressão, HVRP); se pelo contrário, a pressão a jusante descer abaixo de um determinado valor, a válvula abre, diminuindo a perda de carga, aumentando a linha de energia e a pressão a jusante atinge o valor pretendido.

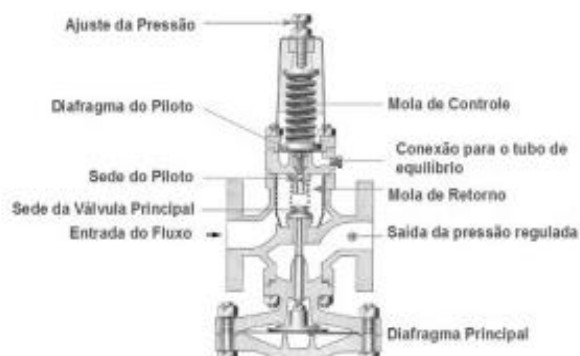


Figura 14. Esquema de válvula redutora de pressão de controlo por mola [Ramos, Covas, 2004].

O funcionamento das VRP pode ser caracterizado por três estados:

- **Estado activo** – a pressão a montante da VRP é maior do que a jusante fruto, da perda de carga imposta pela VRP;
- **Estado passivo** – quando a pressão de montante é inferior à pressão de referência da VRP, o dispositivo que origina a perda de carga abre totalmente, provocando o aumento da pressão a jusante da VRP. Neste caso a VRP não tem qualquer influência nas características do escoamento;
- **Estado passivo (válvula fechada)** – se a pressão de a jusante da VRP for superior que à mesma a montante, a válvula fecha totalmente e passa a funcionar como uma válvula de seccionamento.

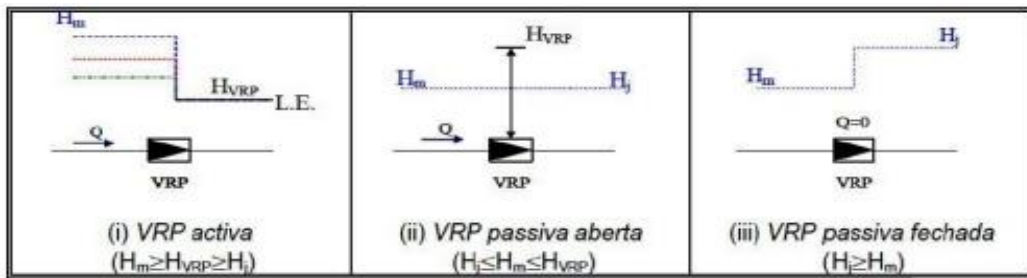


Figura 3. Modo genérico de funcionamento de uma VRP convencional [Ramos, 2004].

## 2.8. Aproveitamento de energia em sistemas de abastecimento de água

Como mencionado anteriormente, os sistemas com excesso de energia disponível, em certas secções do circuito hidráulico, podem apresentar condições especialmente favoráveis à instalação de turbinas ou bombas a funcionarem como turbinas para aproveitamento dessa energia, que de outro modo seria dissipada através de válvulas redutoras de pressão,

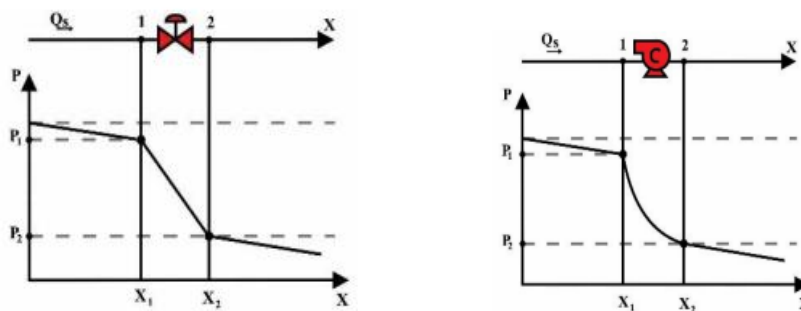


Figura 16. Operação de uma VRP e de BFT

O know-how adquirido através da exploração dos recursos hídricos para geração de energia, a vasta experiência em sistemas de abastecimento de água e o aumento de oferta de pequenas turbinas e BFT levou à percepção da possibilidade de substituição das válvulas reductoras de pressão por estas, aproveitando-se assim a pressão em excesso nas condutas de sistemas de abastecimento (Afshar et al., 1990).

Os primeiros aproveitamentos hidroeléctricos em redes de sistemas de abastecimento de água surgiram em 1982 na cidade de Boulder, no estado do Colorado, sendo hoje um caso exemplar, onde 85% da energia que seria dissipada em sistemas de abastecimento de água é aproveitada para produção de energia, registando-se 42Gw.h de electricidade produzida no ano de 2008 (Warner, 2000).

Na Europa, a localidade austríaca de Nasswald, tem já implementado alguns sistemas de aproveitamento de energia nas suas redes de abastecimento e na Suíça o número atinge já as noventa unidades. A Grécia adoptou esta tecnologia recentemente, contando em 2010 com seis sistemas em operação e quatro em fase de projecto.

A Turquia, um país em desenvolvimento, tem verificado nos últimos anos um rápido aumento dos consumos energéticos. Estas preocupações chamaram a atenção de alguns investigadores, sendo identificados na cidade de Edremit, doze potenciais locais à implantação de pequenos aproveitamentos na rede de abastecimento de água com uma capacidade total de 559kW (Kucukali, 2010).

### **2.8.1. Utilização de bombas como turbina**

A BFT aproveita o potencial renovável de um local e converte a energia potencial da queda de água em energia cinética na rotação da bomba operando como turbina, do mesmo modo no qual ocorre a geração em usinas hidrelétricas. Esse tipo de geração pode ser uma alternativa de geração de energia em SAA's em Moçambique com redução de perdas, baixo custo e sustentabilidade.

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 eléctrica em pequenos aproveitamentos (Viana et al, 2004).

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

Tabela 3. Vantagens e desvantagens da utilização de BFT

| <b>Vantagens</b>  | <b>Desvantagens</b>   |
|---|---|
| Baixo custo quando comparadas com as turbinas.  | Quando a operação ocorre abaixo de seu ponto de funcionamento, há uma rápida queda em seu rendimento.                   |
| Facilidade de instalação, devido à adaptação directa aos tamanhos padrão das condutas.  | Como o fluxo é invertido ocorrem choques nas pás do rotor, que causam maiores perdas, reduzindo a altura disponível.    |
| Produzidas em série, contrariamente às turbinas que são produzidas de forma personalizada, normalmente para pontos de operação específicos. | não possuem nenhum dispositivo para controle da vazão para que a rotação se mantenha praticamente constante.            |
| A bomba e o motor podem ser adquiridos em conjunto, com acoplamento directo.  | As BFT's estão mais sujeitas a sofrerem com a cavitação, e por isso o tubo de sucção deve ser dimensionado com cuidado. |

### 2.8.1.1. Utilização de BFT em sistemas de abastecimento de água (SAAs)

A literatura apresenta trabalhos de pesquisa que envolvem estudos experimentais e computacionais, ou mesmo uma combinação de ambos, para prever o desempenho das BFTs nos SAAs (BINAMA et al., 2017). Além disso, muitos estudos analisaram a viabilidade técnica e financeira da implementação de esquemas de BFTs em SAAs, suas vantagens ambientais, sua estratégia de selecção das máquinas hidráulicas, e sua localização ideal na rede, para alcançar um bom controlo de pressão e quantidades significativas de recuperação de energia. Os estudos com resultados importantes são fornecidos como altamente interessantes na área.

### 2.8.1.2. Estudos experimentais

ROSSI; RIGHETTI; RENZI (2016) seleccionaram uma BFT e realizaram uma análise não-dimensional. Os pesquisadores adoptaram então um estudo de caso para avaliar a viabilidade económica da BFT na SAA. As curvas características da BFT foram obtidas com resultados mostrando que a BFT estudada poderia produzir 338,11 kWh de electricidade para cada dia de operação.

PUGLIESE et al. (2016a) investigaram duas bombas centrífugas. A intenção dos autores era prever as curvas características da BFT a serem usadas nas SAAs para recuperar energia. Os resultados mostraram a validade da equação da curva de potência, com números de vazão abaixo de 0,40. O MPE encontrou menos de 25-30% de diferenças para os dados experimentais.

Usando leis de afinidade, LYDON; COUGHLAN; MCNABOLA (2017) extrapolaram os resultados obtidos no laboratório para avaliar metodologias de selecção de BFTs existentes e compararam-nas com dados experimentais. Os resultados mostraram que as BFTs têm bons resultados no controle da pressão e que até 40% do potencial energético de uma VRP pode ser recuperado.

CARRAVETTA et al. (2017) utilizaram tecnologia para recuperar energia residual e aumentar o nível de pressão da água, com acoplamento directo dos eixos da BFT e da bomba (planta PP). A planta proposta pode fornecer grande quantidade de energia quando a potência hidráulica disponível for alta, dependendo da configuração do SAA e do cenário considerado, ou mesmo quando se utiliza um sistema de bombeamento comum.

Um SAA com BFTs instaladas em paralelo, desenvolvido por MUHAMMETOGLU et al. (2018), na Turquia, trabalhou eficientemente entre 130 e 300 m<sup>3</sup>/h, com um período de retorno de instalação entre 53 dias e 1,8 meses.

MONTEIRO; DELGADO; COVAS (2018) avaliaram o potencial de recuperação de energia em SAA com taxas de fluxo com altas variações sazonais na demanda, calculando as condições de fluxo e pressão, aplicadas durante um ano na entrada de um tanque de armazenamento para um sistema de transmissão de água. A instalação de dois ou três BFTs em paralelo melhorou a recuperação da energia disponível, com um aumento de energia de 33% e 62%, respectivamente, se esta condição fosse satisfeita. A Figura 15 mostra que uma BFT só pode efectivamente recuperar energia durante a metade do ano (verão) e não funciona durante a outra metade.

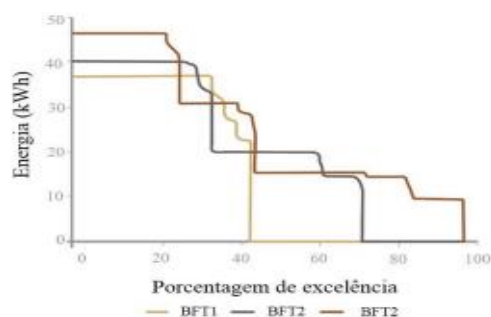


Figura 17. Produção de energia: curva de duração para um, dois e três BFTs em paralelo

[Monteiro, 2018].

TAHANI et al. (2020) utilizaram dados experimentais de uma bomba centrífuga de velocidade variável instalada em uma RDA para investigar os efeitos da variação de velocidade rotacional sobre as principais características da BFT. Os resultados revelaram uma redução na diferença da lei de afinidade com os dados experimentais, a uma média de 79,5%. Os modelos obtiveram um aumento na confiabilidade do desempenho da BFT, incluindo estimativas de eficiência energética.

POSTACCHINI et al. (2020) realizaram testes de laboratório com uma BFT para avaliar o potencial de geração de energia, com variações hidrodinâmicas (pressão e descarga) e mecânicas (velocidade de rotação e torque), mostrando bons resultados para o sistema BFT (eficiências superiores a 50%). Os resultados experimentais foram aplicados em uma rede real sob a hipótese de substituição de uma VRP pela BFT. O projeto de um sistema BFT com um projeto ideal para uma rede real de trabalho permite a produção e comercialização de energia e a redução dos custos de gerenciamento.

### 2.8.2. Seleção da bomba a funcionar como turbina

Quando se pretende instalar uma bomba a funcionar como turbina num determinado local, deve-se em primeiro lugar conhecer-se a curva característica da instalação, e posteriormente definir-se o ponto de operação, atendendo neste caso cumulativamente à curva característica da BFT.

Na aplicação de uma bomba a funcionar em modo normal, conhecendo o caudal que se pretende elevar e a correspondente altura total de elevação, facilmente se consultam diversos catálogos de fabricantes, e se escolhe a bomba que melhor preenche estes requisitos, através da observação

das curvas ( $H \leftrightarrow Q$ ) e ( $\eta \leftrightarrow Q$ ), onde “ $\eta$ ” representa o rendimento. Esta acessibilidade não se verifica para as bombas a trabalhar como turbinas, ou seja, actualmente existem escassos fabricantes a explorar o comportamento das suas bombas a trabalhar em modo inverso. Desta forma, uma das principais limitações na escolha das BFT é o facto de as suas curvas características por vezes não serem disponibilizadas para consulta pública, pelos poucos fabricantes que exploram e conhecem o desempenho das suas bombas a trabalhar em sentido inverso, tornando difícil a escolha para um local específico.

A difícil acessibilidade às curvas características das bombas a funcionar como turbina levou alguns investigadores, a estudarem o comportamento destas e a propor métodos empíricos para o cálculo do ponto de melhor eficiência da BFT, das curvas características das BFT ou de ambos (Simão, 2009).

Sharma (1985) propôs um método simples de conversão, onde através de equações de conversão de vazão e altura, utilizando o rendimento característico da bomba, faz predição da operação como turbina.

Engeda (1987) utiliza a combinação dos parâmetros de eficiência e velocidade específica para estimar o desempenho da BFT. Assumindo máxima eficiência nos modos bomba e turbina.

Chapallaz (1992) sugere um método de selecção de BFT baseado na PME e na velocidade. O autor sugere a utilização de bombas sem fazer alterações construtivas e ressalta que, para uma dada velocidade tanto a altura ( $H$ ) quanto a vazões ( $Q$ ) aumentam quando funcionando como turbina e a eficiência diminui de 3 a 5% com relação à operação como bomba.

Alatorre-Frenk (1994) propõe uma formulação baseada em análises estatísticas dos testes de desempenho da máquina em modo motriz e operatriz. É um modelo mais complicado que o de Sharma (1985) e tem a vantagem de ser mais confiável que este.

Burton (1991) usa as características geométricas da máquina de fluxo para estimar a operação em modo motriz. A análise é feita em função da razão da vazão de saída em modo operatriz pelo recalque e da razão da vazão de entrada na voluta em modo operatriz pela área da sucção da máquina.

Willians (1995) propõe correcções nas equações de Sharma (1985), adicionando factores de correcção de altura e velocidade. O autor também mostra, através de ábacos, a comparação da faixa de utilização da BFT com turbinas Pelton.

No Brasil, Viana (1987) apresenta uma metodologia para a escolha da BFT baseada em coeficientes experimentais de H e Q em função da rotação específica e em conjunto com os resultados de Kittredge e Buse.

Lopes (2003) apresenta uma metodologia para a utilização de BFT juntamente com um gerador assíncrono e demonstrou através de estudos de viabilidade económica que grupos geradores BFT na faixa de potência de 3 a 150 kW são competitivos para um tempo de retorno de 4 anos. O autor também sugere a utilização de uma BFT na vazão sanitária de uma usina, sendo que em operação normal o sistema funcione acoplado à rede eléctrica e, em situação emergencial, que funcione como gerador auxiliar de forma isolada da rede eléctrica.

*Normalmente, a utilização dos métodos referidos segue a seguinte sequência:*

1. Parte-se do caudal e queda nominais que se pretende que definam o ponto de operação da BFT e, através de relações inerentes a cada método, obtêm-se a queda e caudal nominais relativos à bomba;
2. Escolhe-se a bomba com características mais próximas das pretendidas através da consulta de catálogos.

Pelos métodos apresentados para a escolha da BFT, os que apresentaram melhores condições de aplicação foram os métodos de Viana e Chapallaz, pois já consideraram bombas com rotações mais usuais e também factores de correcção para altura, vazão e cavitação. Com esses factores de correcção é possível o melhor dimensionamento do equipamento para a demanda solicitada

## **2.9. Condições de trabalho da BFT**

A substituição de uma VRP é a mais completa em termos de descrição de uma estratégia de projecto de uma BFT. As VRPs podem ser reguladas automaticamente com um valor de contrapressão constante ou dinâmico para obter um valor de contrapressão variável no tempo, quando se pretende reduzir a pressão. Em uma usina hidreléctrica, essa diferença se reflectirá na necessidade de fornecer uma contrapressão constante ou variável no tempo, porém, sem alterar os modos de regulação possíveis (CARRAVETTA, 2018).

Existem três maneiras de regular o comportamento de uma BFT. Em uma usina hidreléctrica, a regulação de uma BFT pode ser obtida hidráulicamente (RH), electricamente (RE) ou combinando ambas (RH+RE). A regulação hidráulica é realizada por meio de um circuito



hidráulico série-paralelo, com dois ramais paralelos com uma BFT e duas válvulas (CARRAVETTA et al., 2012), conforme a Figura 18a. De modo geral, para uma carga líquida superior à queda de carga fornecida pela máquina, a válvula em série dissipa o excesso de pressão, do contrário, a BFT produz uma queda de carga maior que a carga líquida disponível (JAUMOTTE, 2008). Na RH, a velocidade de rotação BFT é considerada constante e o inversor de frequência não está presente.

No modo RE está presente um accionamento de velocidade única sem qualquer derivação ou válvula em série, onde a velocidade angular do rotor pode ser alterada variando a frequência do sinal eléctrico usando um inversor (CARRAVETTA et al., 2013). Uma válvula reguladora paralela a BFT e um inversor para ajuste da velocidade de rotação da máquina estão presentes (Figura 18b); a velocidade de trabalho da BFT varia ao longo de várias curvas de desempenho de velocidades mínimas e máximas (KANDI et al., 2021). Como desvantagens, a RE apresenta maior custo associado à regulação electrónica da velocidade de rotação e o uso de um inversor para variar a frequência do gerador (CARRAVETTA, 2018).

Finalmente, os dois modos de regulação podem ser acoplados no modo de regulação eléctrica e hidráulica (REH). A velocidade de rotação também varia ao longo da operação e são utilizadas válvulas para ajustar a vazão da BFT. Neste caso, uma válvula em série dissipa a pressão até que ela coincida com a curva da BFT, caso o ponto de operação esteja acima da curva de carga da BFT com a velocidade máxima; por outro lado, se o ponto de operação estiver abaixo da curva de velocidade mínima, a válvula paralela permite que uma parte da vazão passe por ele (KANDI et al., 2021). A BFT também pode utilizar os valores existentes de altura manométrica e vazão modificando a velocidade de rotação, nas circunstâncias onde os pontos de operação estejam entre a velocidade mínima e máxima (Figura 18c) (CARRAVETTA et al., 2013).

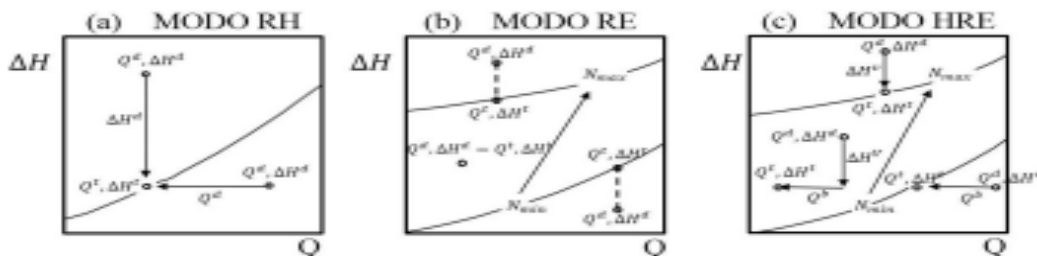


Figura 18. Condições de regulação BFT: (a) RH, (b) RE e (c) RHE.

### Curva característica da BFT

Os fabricantes de bomba normalmente não fornecem as curvas característica de suas bombas funcionando como turbinas. Portanto, estabelecer uma correlação entre os desempenhos dos modos directos (bomba funcionando como bomba) e reverso (bomba funcionando como turbina) é essencial para seleccionar e prever o comportamento da máquina adequada. Derakhshan e Nourbakhsh (2008) em seu estudo experimental notaram que as curvas características das BFT podem ser determinadas a partir do ponto de operação de melhor eficiência ( $Q_{pme}$  e  $H_{pme}$ ) da bomba. Logo, as curvas de perdas de carga podem ser determinadas a partir da Equação (1):

$$H_i = H_{tb} \left( 1.0283 \left( \frac{Q_i}{Q_{tb}} \right)^2 - 0.5468 \left( \frac{Q_i}{Q_{tb}} \right) + 0.5314 \right) \quad (4)$$

Onde  $H_i$  é a perda de carga hidráulica inserida pela BFT no instante  $i$  [m];  $Q_i$  corresponde a vazão no instante  $i$  [ $m^3/s$ ];  $H_{tb}$  é a altura manométrica da BFT no ponto de melhor eficiência [m]; e  $Q_{tb}$  é a vazão da BFT no ponto de melhor eficiência [ $m^3/s$ ]. Os valores de  $H_{tb}$  e  $Q_{tb}$  são calculados a partir do ponto de operação da bomba em seu ponto de melhor rendimento, proposto por William (1995).

### 2.10. Aplicações das BFT 2 no mundo

As aplicações mais comuns de bombas funcionando como turbinas são as seguintes:

- Aldeias,

Principalmente para iluminação doméstica. Aldeias em países em desenvolvimento, onde a principal carga eléctrica é a iluminação nocturna, uma bomba funcionando como turbina seria adequada de ser usada. Durante o dia o gerador pode ser usado para a alimentação de equipamentos que irão beneficiar a economia da aldeia.

- Energia eléctrica para fazendas remotas.

13 BFT's foram implantadas com sucesso em uma fazenda remota no Reino Unido com o objectivo de fornecimento de energia eléctrica. Alguns cuidados devem ser tomados, como a saída do gerador é limitada, o sistema não pode ser sobrecarregado.

- Carregamento de baterias e outras aplicações de cargas intermitentes.

Como por exemplo, no Sri Lanka, muitos agregados familiares dependem de bateria de chumbo-ácido para a sua eletricidade, que geralmente são levadas para cidades próximas para que seja feita a recarga. Um esquema de BFT poderia ser utilizado para fornecer energia para o carregamento da bateria.

Outra aplicação de BFT é a de refrigeradores para a fabricação de gelo ou armazenamento de vacinas, ou até para secadores de colheita aquecidos eletricamente.

➤ Bombeamento de água.

Podem ser usadas para o bombeamento de água doméstico, onde uma fazenda ou vila está situada acima do nível do córrego principal. Neste caso, a BFT é conectada a uma bomba centrífuga de alta capacidade ou de deslocamento positivo, que bombeia pequena quantidade de água. Esquema já utilizado na Tanzânia.

## 2.11. Modelação e Simulação

Modelar e simular um processo produtivo consiste basicamente em uma experimentação computacional, no qual é simulado um sistema real com o objectivo de testar diferentes alternativas para o problema, ou seja, a melhor solução do sistema estudado (Carvalho, 2010),

Dessa forma, a modelagem e simulação computacional são consideradas ferramentas extremamente úteis no processo de tomada de decisão (CASSOLO, 2014).

Segundo Carvalho (2010), essa ferramenta pode ser utilizada em diversas situações, como:

- Identificar gargalos e/ou pontos críticos do processo;
- Conhecer melhor um processo e obter novas ideias;
- Testar novas alternativas antes de sua implementação.

De acordo com Carvalho (2010), a modelagem e simulação se baseiam em três processos: Construção do modelo, modelagem computacional e experimentação. A primeira etapa se baseia em uma representação minuciosa do processo produtivo através de ferramentas computacionais. Após isso faz-se a modelagem computacional, ao qual o processo é transformado de um modelo lógico para um modelo operacional.

Para isso, três acções são necessárias: “Colecta de dados e sua modelagem estatística, programação através de um software, verificação dos resultados e validação”

Para realização de simulações ou modelos do funcionamento de sistemas hidráulicos usa-se geralmente uma ferramenta computacional denominada EPANET.

O EPANET desenvolvido pela EPA (*U.S Environmental Protection Agency*) é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água de sistemas de distribuição em pressão. O programa permite também obter os valores do caudal em cada conduta, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e a concentração de substâncias químicas, ao longo da rede durante um período de simulação (Rossman, 2000).

Esta ferramenta possibilita assim a realização de tarefas como estabelecimento de cenários de projecto como, por exemplo, no dimensionamento ou expansão de redes de forma eficiente a calibração de modelos hidráulicos, a avaliação dos consumos e a modelação do funcionamento de válvulas e bombas. O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, de que se destacam como principais características (Rossman, 2000):

- Permite a análise de redes de dimensão ilimitada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- Modelação de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombeamento e do respetivo custo;
- Modelação dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de caudal;
- Modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em funções da altura de água;

### **Aplicação de modelos matemáticos a sistemas de abastecimento de água**

Embora seja uma área até então pouco explorada, alguns autores deram importantes contribuições no campo da modelação em sistemas de abastecimento de água:

Afshar et al. (1990) criou um modelo de programação dinâmica a utilizar na fase de projecto de um sistema adutor com as seguintes características genéricas:

- Comprimento total – L
- T troços de conduta com comprimento  $l_t$
- Caudal total – Q

- Altura geométrica total – H
- N pontos de entrega de caudal  $q_n$  candidatos à instalação de um aproveitamento hidroeléctrico

A função objectiva consiste na maximização do benefício, associado à venda de electricidade e fornecimento de água, ao qual é subtraído o custo das condutas e dos grupos turbo geradores. Como resultado, é obtida uma combinação formada pelo número óptimo de aproveitamentos a instalar no sistema, diâmetro óptimo das condutas e óptima localização da turbina.

Na investigação realizada por Giugni et al. (2009), foi utilizado o software EPANET para simular o comportamento das válvulas redutoras de pressão no sistema em baixa da zona Este de Nápoles, simulando-se vários cenários, usando tanto VRP's como a sua substituição por bombas a funcionar como turbinas. Concluídas as simulações, observou-se um desempenho favorável no comportamento do sistema, substituindo as VRP por BFT.

## CAPITULO 3- CONTEXTUALIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O primeiro passo para desenvolver o estudo de caso, é estabelecer o local de possível instalação da BFT, levando em consideração o potencial energético disponível para realizar o abastecimento de água, assim como as condições de instalação e funcionamento aos quais a BFT será sujeita quando inserida ao sistema de abastecimento.

Dentre os possíveis locais viáveis para instalação eficiente de uma BFT pode-se citar a região do distrito de Namaacha, devido ao município ser localizado em uma região serrana e possuir desníveis consideráveis em seu relevo além de elevada pressão de água.

### 3.1. Descrição do Local

Distrito de Namaacha, a 76 km da cidade de Maputo, situa-se a sudoeste da Província de Maputo, fazendo fronteira a Oeste com a República da África do Sul e o reino da Swazilândia, a Norte com o Distrito de Moamba, a Este com o Distrito de Boane e a Sul com distrito de Matutuine.

Com uma superfície de 2.196 km<sup>2</sup> e uma população recenseada em 1997 de 31.441 habitantes e estimada à data de 1/1/2005 em cerca de 45.020 habitantes, o distrito da Namaacha tem uma densidade populacional de 21 hab/km<sup>2</sup>. A relação de dependência económica potencial é de aproximadamente 1:1.5, isto é, por cada 10 crianças ou anciões existem 15 pessoas em idade activa. A população é jovem (40%, abaixo dos 15 anos de idade), maioritariamente feminina (taxa de masculinidade de 50%) e de matriz rural (taxa de urbanização de 28%)



Figura 4. Localização do distrito de Namaacha [instituto nacional de estatística]

### **a) Divisão Administrativa**

O distrito está dividido em dois postos administrativos (Changalane e Namaacha), compostos pelas seguintes localidades:

#### **Posto Administrativo de Changalane:**

- Changalane
- Goba (Goba Estação)
- Mahelane
- Michangulene

#### **Posto Administrativo de Namaacha:**

- Vila da Namaacha
- Chimuchuanine
- Impaputo
- Mafuiane
- Matsequenha

### **b) Clima e Hidrografia**

#### **i. Ambiente**

De acordo com a classificação Köppen, o clima de Namaacha é Tropical Húmido (AW), modificado pela altitude. A Norte e Leste, o clima é "Seco de Estepe (BS)". Predominam 2 estações: a quente e de pluviosidade elevada, entre Outubro e Abril; e a fresca e seca, entre Abril a Setembro.

O clima é ameno, com uma temperatura média anual de 21° C e a precipitação média anual é de 751.1 mm (751 mm em Goba, 680 mm em Changalane), ocorrendo cerca de 60% desta precipitação entre Novembro e Março.

O distrito beneficia das águas dos rios Movene, Mabenga, Calichane, Impaputo e Umbelúzi, bem como das reservas da albufeira dos Pequenos Libombos

## **ii. Relevo e Solos**

O distrito pode ser dividido de acordo com as seguintes unidades geomorfológicas:

- Terras altas - o Complexo da Cadeia dos Libombos;
- Planaltos médios - adjacentes ao primeiro;
- Encostas;
- Pequenas planícies de 100-200 m nos vales aluvionares ao longo dos rios.

É marcado pela cordilheira dos Libombos, que se estende no sentido Norte-Sul, tendo o seu ponto mais alto a cerca de 800 m, no monte Mponduine.

A superfície de aplanação desce para Leste, com vários rios a cortar as montanhas no sentido Oeste-Este, nestas superfícies os solos são basálticos avermelhados e pretos com profundidades variáveis.

## **iii. Infra-estruturas e Serviços**

O distrito de Namaacha é atravessado pela EN2, que dá acesso à Swazilândia e permite também a ligação directa com as cidades de Maputo e Matola e a vila de Boane, e mais cerca de 166 Km de vias classificadas como principais, secundárias e terciárias.

O transporte rodoviário de passageiros é assegurado pelos autocarros das Oliveiras e Turismo. A linha férrea que liga Boane a Goba assegura também o transporte de carga e passageiros, com ligação à Swazilândia.

Em termos de telecomunicações, o distrito da Namaacha conta com ligações telefónicas fixa e móvel, telegráficas e via rádio. O acesso à Internet pode ser efectuado nas zonas servidas por rede fixa e móvel de telecomunicações, existindo também uma delegação dos Correios de Moçambique.

A vila de Namaacha e o Posto Administrativo de Changalane têm fornecimento de energia assegurado pela rede da EDM. O distrito possui 43 fontes de abastecimento de água que cobrem 60% da população e 5 sistemas de abastecimento de água (Vila, Mafuiane, Changalane, Goba e Michangalene).



O distrito da Namaacha possui 77 escolas (das quais, 41 do ensino primário), e está servido por 13 unidades sanitárias que possibilitam o acesso da população aos serviços do Sistema Nacional de Saúde.

De notar que, em geral, o estado geral de conservação e manutenção das infra-estruturas não é o desejável, devendo esta área ser priorizada na gestão distrital e na afectação de recursos ao nível provincial.

#### **iv. Economia**

A agricultura é a base da economia distrital, tendo como principais culturas as hortícolas, milho, amendoim, feijões, batata-doce, banana e mandioca. As espécies de gado predominantes são os bovinos, cabritos, ovelhas, galinhas, patos e porcos, destinadas para o consumo familiar e comercialização.

Afectado pela excessiva procura de terrenos provenientes da cidade de Maputo, a Namaacha tem sido palco de vários conflitos ligados à posse da terra.

A recuperar dos efeitos das cheias de 2000, o sector agrícola familiar está em expansão, e as explorações privadas, que ocupam uma parte significativa das terras férteis e absorvem cerca de 30% da mão-de-obra assalariada do distrito.

Com base nos dados do levantamento dos "Médicos sem Fronteiras", pode-se estimar em cerca de 3 meses a média de reservas alimentares familiares de milho e de mandioca. Calcula-se em 5% a população potencialmente vulnerável em termos de segurança alimentar.

Apesar destes factores, a região beneficia de uma boa integração de mercado e de possibilidades de acesso a actividades não agrícolas geradoras de rendimento, nomeadamente as remessas dos emigrantes na África do Sul e na Swazilândia, o comércio informal e de fronteira, o fabrico de sabão e a venda de lenha, carvão, bebidas alcoólicas e produtos de olaria.

O distrito de Namaacha debate-se com problemas de aridez em algumas zonas, devido aos incêndios ateados pelas populações locais.

Além do produto da caça, o peixe, oriundo dos rios, é também um componente importante da dieta alimentar das famílias de Namaacha.

### 3.2. Características do sistema de abastecimento

O sistema fictício que abastece a comunidade é composto por unidades de captação de superficial, estação elevatória de água bruta, estação de tratamento de água (ETA), reservatórios e a rede distribuição. Após a colecta, a água bruta é transportada para a ETA, onde é tratada e depois direccionada para dois reservatórios, localizados na área de maior cota do município, A distribuição é realizada por gravidade, aproveitando a topografia acidentada do local.

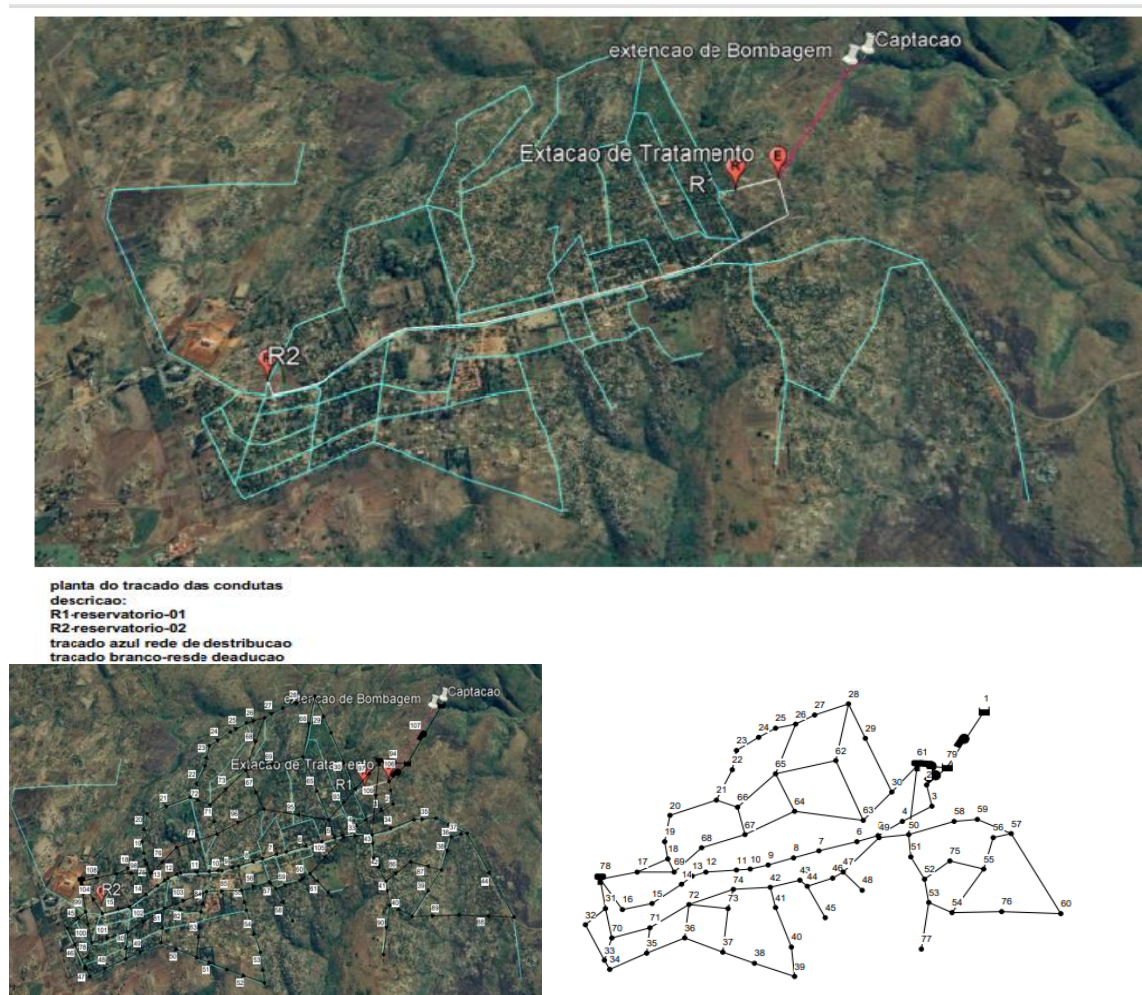


Figura 20. Ilustra a composição do sistema de abastecimento [Google earth].

A produção diária de água é de, aproximadamente, 206.1 m<sup>3</sup>/dia. A distribuição é realizada por gravidade, aproveitando a topografia acidentada do local (50 a 275m). Sua configuração é do tipo malhada, com tubulações de diâmetros que variam de 120 a 400 mm., composta por 109 tubos, 79 Nós e válvulas de gavetas (VG) instaladas em diferentes locais da rede, tem extensão de 7,16 km<sup>2</sup> e atende 1500 residências. Outros dados do sistema estão apresentados nos anexos.

Os reservatórios devem fazer a distribuição de água para 4 áreas distintas, conforme a divisão apresentada figura 18.

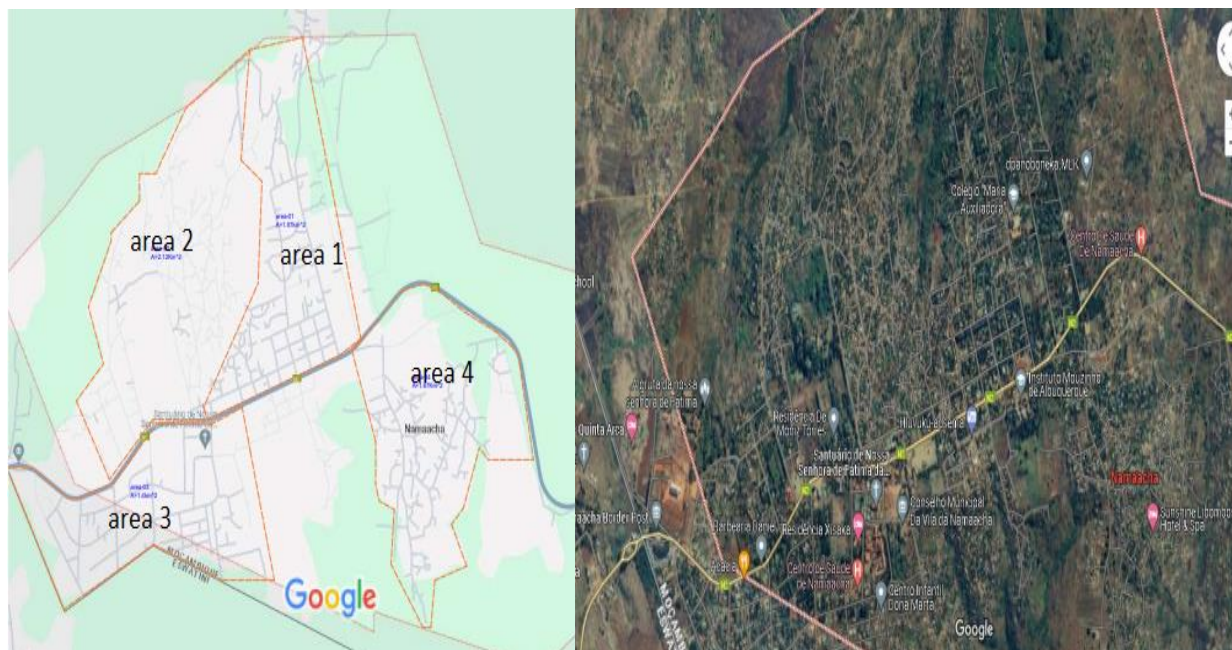


Figura 21. Divisão da região em áreas

A distribuição das percentagens do consumo em função da percentagem das áreas ocupadas está ilustrada na tabela que si segue:

Tabela 3. Demanda por Área [Autor]

| Descrição | Nós | q(l/s)   | Q/ano    | A (Km <sup>2</sup> ) |
|-----------|-----|----------|----------|----------------------|
| A1        | 4   | 56,70628 | 14,17657 | 1.97                 |
| A2        | 4   | 61,02402 | 15,25601 | 2.12                 |
| A3        | 5   | 40,29888 | 8,059777 | 1.4                  |
| A4        | 5   | 48,07081 | 16,0236  | 1.67                 |
| Total     | 16  | 206,1    | 206,1    | 7.152                |

## CAPITULO 4-METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se a metodologia desenvolvida neste trabalho e os passos a serem seguidos para resolução do problema.

Neste trabalho, de forma a aproveitar a energia desperdiçada na redução de pressão e de velocidade no sistema de abastecimento propõem-se a utilização BFT que irá aproveitar a redução de pressão para a geração de energia eléctrica onde as variáveis consideradas são dadas pelo padrão de funcionamento da rede de abastecimento de água.

Com vista à obtenção da solução para o problema proposto, viabilidade do utilização de bomba funcionando no sentido reverso BFT como uma alternativa para geração de energia eléctrica em SSA, a metodologia foi constituída fundamentalmente pelas seguintes etapas:

- (1) Simulação hidráulica por meio do software EPANET 2.00;
- (2) Selecção da bomba pelo método de Chapallaz (1992);
- (3) Avaliação da Energia produzida;
- (4) Análise económica e ambiental do projecto;

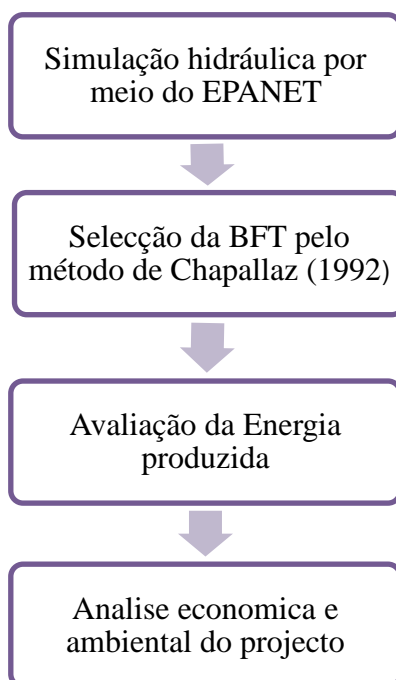


Figura 22. Fluxograma da metodologia desenvolvida e implementada neste trabalho [Autor]

#### 4.1. Simulação hidráulica

Os valores das variáveis hidráulicas foram obtidos por meio do software EPANET 2.00, onde por meio desta efectuou-se uma simulação hidráulica de uma determinada rede de abastecimento de água. Para execução do programa foram inseridos dados de entrada da rede de distribuição tais como, diâmetro, comprimento, rugosidade das tubulações, demanda, cota topográfica dos nós e nível do reservatório.

Após a execução da simulação hidráulica através do EPANET foi possível exportar um ficheiro contendo os valores de pressões e de vazões para cada opção avaliada, que variaram em cada intervalo de tempo.

#### 4.2. Selecção da Bomba pelo Método de Chapallaz

A selecção da BFT foi feita por meio do Método de Chapallaz et.al (1992), que consiste na definição da altura e vazão de bombas comerciais para operar em reverso, através da utilização de coeficientes obtidos experimentalmente pelo autor.

Para a determinação dos coeficiente  $C_q$  e  $C_h$  faz-se primeiro a pré-selecção da bomba com base nos valores de  $Q_t$  que é a vazão disponível no aproveitamento energético e  $H_t$  é a altura manométrica no aproveitamento.

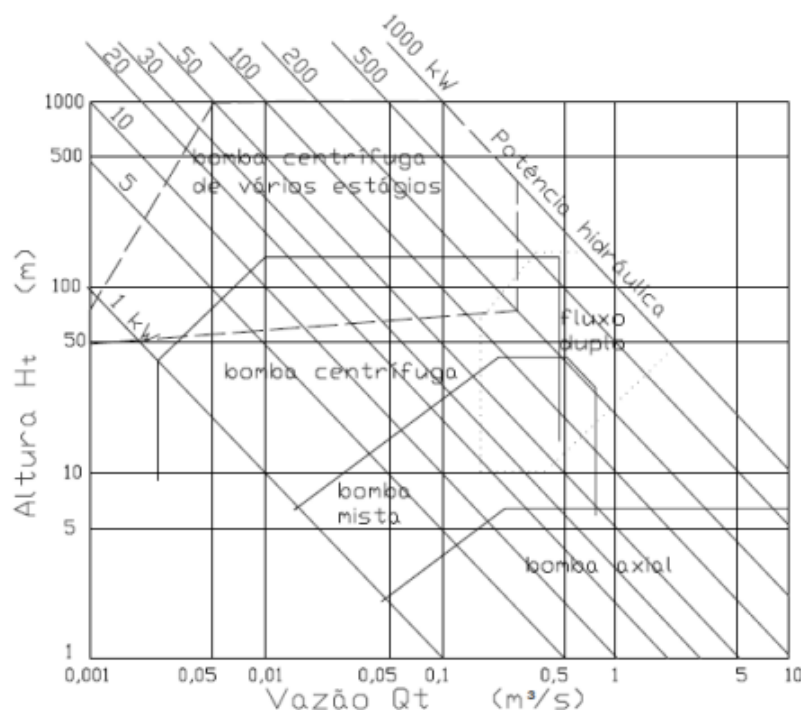


Figura 23. Pré-selecção da BFT [adaptado de Chapallaz, 1992].

Os restantes parâmetros necessários para a selecção da BFT podem ser calculados com base nas fórmulas apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 4. Cálculo para selecção da BFT pelos métodos propostos por Viana e Chapallaz

| Parâmetro                    | Formula   |
|------------------------------|---|
| Altura bomba                 | $Q_b = \frac{Q_t}{c_q} \quad (5)$   |
| Vasão bomba                  | $H_b = \frac{H_t}{c_h} \quad (6)$   |
| Rotação específica da BFT    | $n_{qt} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{3/4}} \quad (7)$   |
| Rotação específica da bomba  | $n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0.89} \quad (8)$  |
| Estimativa de vazão da bomba | $n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0.89} \quad (9)$  |
| Leis de Semelhança           | $Q_b = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b \quad \text{e} \quad H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b}\right)^2 \cdot H_b \quad (10)$ |

Determinados os coeficientes e, conhecendo-se a altura e a vazão do aproveitamento e calcula-se a altura e a vazão da bomba, através das equações (1) e (2). Através das Leis de Semelhança ajusta-se a rotação e selecciona-se a bomba que oferece melhor rendimento possível, nos catálogos dos fabricantes.

### 4.3. Potência disponível

A potência disponível que resulta da transformação da energia potencial de uma massa de água  $m$ , em energia cinética, ao haver um deslocamento  $h$  de uma massa de água de uma cota superior a uma inferior e é dada por:

$$P_{instalada} = \gamma \times Q \times H \quad (11)$$

Onde  $\gamma$  corresponde ao peso específico da água que passa pela central, tendo por valor 9.810 N/m<sup>3</sup>,  $Q$  é o caudal de água em m<sup>3</sup> /s e  $H$  é a altura de queda útil, isto é, pelo grupo a diferença de cotas tendo em conta o atrito nas tubagens condutoras, e expressa-se em metros. Para a conversão em energia eléctrica, a energia cinética da água é transformada em energia cinética de

rotação da BFT, e esta energia mecânica da turbina finalmente em energia eléctrica. A potência aproveitada virá então pela seguinte equação:

$$P_u = \gamma \times Q \times H \times \eta_{bft} \times \eta_{ger} \quad (12)$$

Sendo que  $\eta$  representa o rendimento do grupo BFT/gerador.

A variável que mais influencia a potência a instalar é o caudal, em virtude de ser o que apresenta maior variação. Geralmente nem todo o caudal afluente é aproveitado para obter energia devido a exigências para abastecimento de água e devido também ao caudal ecológico.

#### 4.4. Energia produzível

Revela-se fundamental a avaliação correta do valor da energia produzível, que é função do tempo ao longo do qual se consegue mobilizar uma dada potência e pode ser definida, de uma forma mais simplificada, pela expressão:

$$E = \sum(P_u \times \Delta t) \quad (13)$$

Em que  $\Delta t$  representa o período de tempo ao longo do qual se mobiliza a potência  $P_u$ , ou seja, a potência útil à saída do gerador, uma vez que será esta, na realidade, a que será integrada na rede recetora do sistema electroprodutor.

Considera-se importante ressaltar a diferença existente entre potência e energia. Enquanto a primeira apenas reflecte um valor instantâneo ou pontual, já a segunda resulta da consideração da variável temporal, isto é, o período de tempo em que o caudal turbinado gera energia.

#### 4.5. Análise Económica

A instalação de BFT em SAA baseia-se em uma comparação dos custos e benefícios esperados em relação à vida útil do projecto, na qual são avaliados critérios de análise económica, com base em indicadores ou parâmetros, e uma estimativa dos custos e receitas durante um período de operação esperado. Isto se deve ao facto de não haver garantia de que a instalação de BFT também seja economicamente vantajoso do ponto de vista técnico (Carravetta, 2018). Portanto, a comparação entre diferentes soluções é necessária (Ramos e Borga, 2009). Para esta análise os indicadores a serem usados são: valor actual líquido (VAL) e a taxa interna de retorno (TIR).

### **Valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR)**

O VPL é definido como a soma resultante quando o investimento esperado e os custos operacionais do projecto são deduzidos do valor descontado das receitas esperadas (Balacco et al., 2018). No geral, é a soma acumulada dos benefícios esperados durante os anos de projecto subtraído da soma dos custos durante o mesmo período expressos em termos de valores presentes. Caso seja negativo, não é atraente, pois espera-se que os benefícios sejam suficientes para cobrir os custos do projecto durante sua vida útil. Neste sentido, os melhores investimentos serão aqueles com maior VAL, assumindo que não há restrições à disponibilidade de capital inicial necessária entre projectos ou soluções alternativas de design com VAL positivo (Carravetta, 2018). Por sua vez, a TIR é definida como a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero.

#### **4.6. Impacto ambiental**

Além da viabilidade económica, é importante mencionar o potencial ambiental das instalações de BFTs, que leva em conta que a energia produzida pode compensar a demanda de energia dos SAAs (Stefanizzi et al., 2020). A disponibilidade de água doce determina o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas. Em outras palavras, onde a demanda de água é maior que sua disponibilidade, a água é bombeada por longas distâncias, aumentando o consumo de electricidade e as emissões de gases de efeito estufa (Mcnabola et al., 2014).

De acordo com Shrestha et al. (2012), a actividade ou série de actividades envolvidas no ciclo de vida de um produto ou processo determina a pegada de carbono, medida pela quantidade total de emissões de GEE, expressa em equivalentes de CO<sub>2</sub> e relacionada ao seu potencial de aquecimento global. Com a aplicação da tecnologia BFT, os resultados, mesmo a médio e longo prazo, beneficiariam a população em geral, as empresas de água e o meio ambiente, já que a energia recuperada nos SAAs pode ser vendida ou servir ao próprio sistema, reduzindo assim a tarifa aplicada ao usuário, além de reduzir as emissões de GEE.

Pode-se afirmar que as BFTs operam de forma ambientalmente compensatória, devido às agressões ambientais que ocorreram nestes últimos anos, já que controlam a pressão sobre as SAAs, reduzem o desperdício de recursos hídricos e recuperam a energia renovável em ductos de água, com uma redução na geração de GEE.



## CAPITULO 5-ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Depois da definição das características do sistema realizou-se a primeira simulação, onde foram introduzidos no EPANET os parâmetros mais importantes do sistema tais como consumos-base, cotas, diâmetros, comprimentos, rugosidades e padrões de consumo de cada componente do sistema de abastecimento (reservatório de nível fixo, trechos e nós).

A primeira simulação tem o intuito de estudar os trechos com maiores vazões e os nós com maiores pressões. Após análise determina-se o ponto de instalação da BFT levando em consideração o potencial energético do local de instalação.

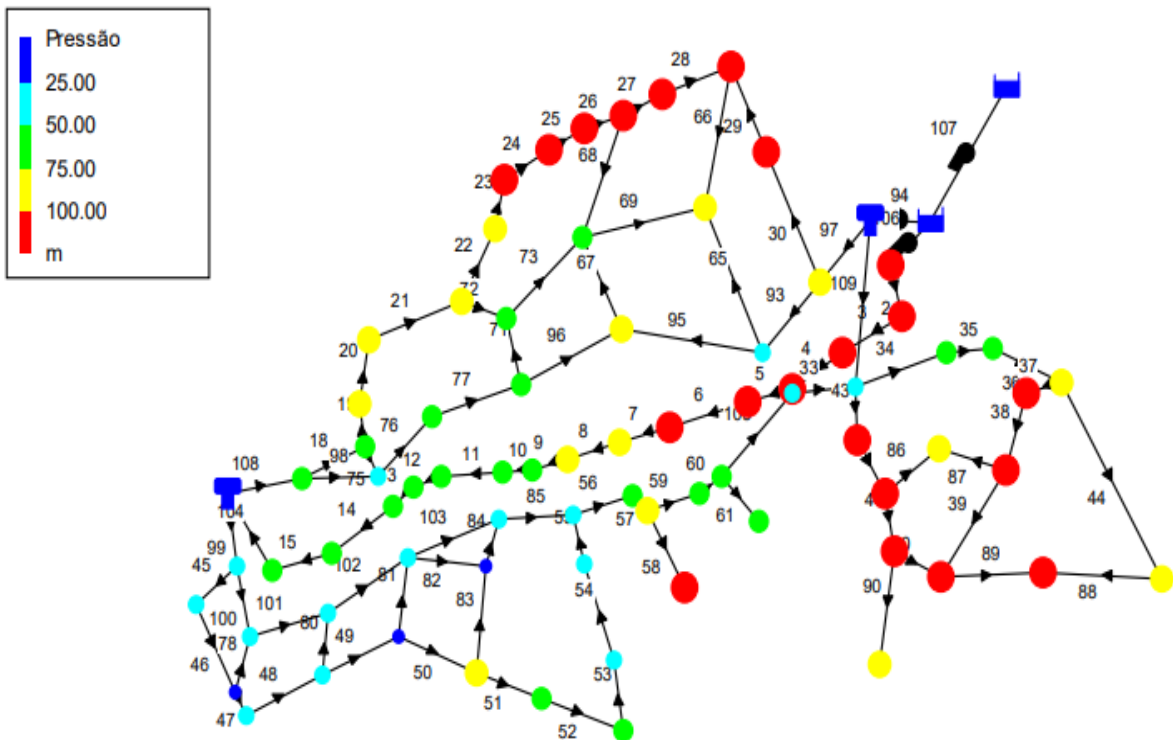


Figura 5.Comportamento das pressões na primeira simulação [Autor]

Feita a primeira execução foi possível observar pressões que variam de 15 a 234 m, segundo a tabela (5). Os pontos a vermelhos são nós com altos valores de pressão, acima do recomendado. Portanto é necessário que se apliquem medidas específicas para a redução da pressão, para que se evite a ocorrência de vazamentos e consequentemente perda de volumes de água. Assim sendo os pontos indicados tornam-se candidatos para a instalação de micro aproveitamentos (BFT) que de forma eficiente irá transformar a energia de pressão da água em energia eléctrica.

Tabela 5. Pressões dos nós da área 4 sem dispositivo de controlo de pressão

| <b>Identificador do Nó</b> | <b>Cota(m)</b> | <b>Carga Hidráulica (m)</b> | <b>Pressão (m)</b> |
|----------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------|
| Nó 50                      | 245            | 286.56                      | 41.56              |
| Nó 51                      | 175            | 285.27                      | 110.27             |
| Nó 52                      | 49             | 283.78                      | 234.78             |
| Nó 53                      | 154            | 283.13                      | 129.13             |
| Nó 54                      | 115            | 282.82                      | 167.82             |
| Nó 55                      | 166            | 282.84                      | 116.84             |
| Nó 56                      | 174            | 283.54                      | 109.54             |
| Nó 57                      | 195            | 283.90                      | 88.90              |
| Nó 58                      | 235            | 285.39                      | 50.39              |
| Nó 59                      | 221            | 284.81                      | 63.81              |
| Nó 60                      | 197            | 282.81                      | 85.81              |
| Nó 74                      | 263            | 288.87                      | 25.87              |
| Nó 75                      | 192            | 282.45                      | 90.45              |
| Nó 76                      | 114            | 282.35                      | 168.35             |

#### **a) Rede com Válvula redutora de pressão VRP**

Para facilitar o processo de análise e processamento dos dados escolheu-se dois pontos da rede localizados na área 4, mais concretamente os trechos 34 e 43. A escolha deveu-se a localização estratégica dos mesmos. Pois a instalação de VRP ou BFT nesses locais irá garantir a redução parcial da pressão em praticamente toda a área 4.

A seguir na figura (26) temos o mapa resultante da segunda simulação que ilustra o comportamento do sistema com a introdução de válvulas redutoras de pressão VRP nos pontos acima indicados. O dispositivo foi ajustado de modo que a pressão do nó crítico da rede (nó 74) correspondesse à pressão mínima igual a 20 m.

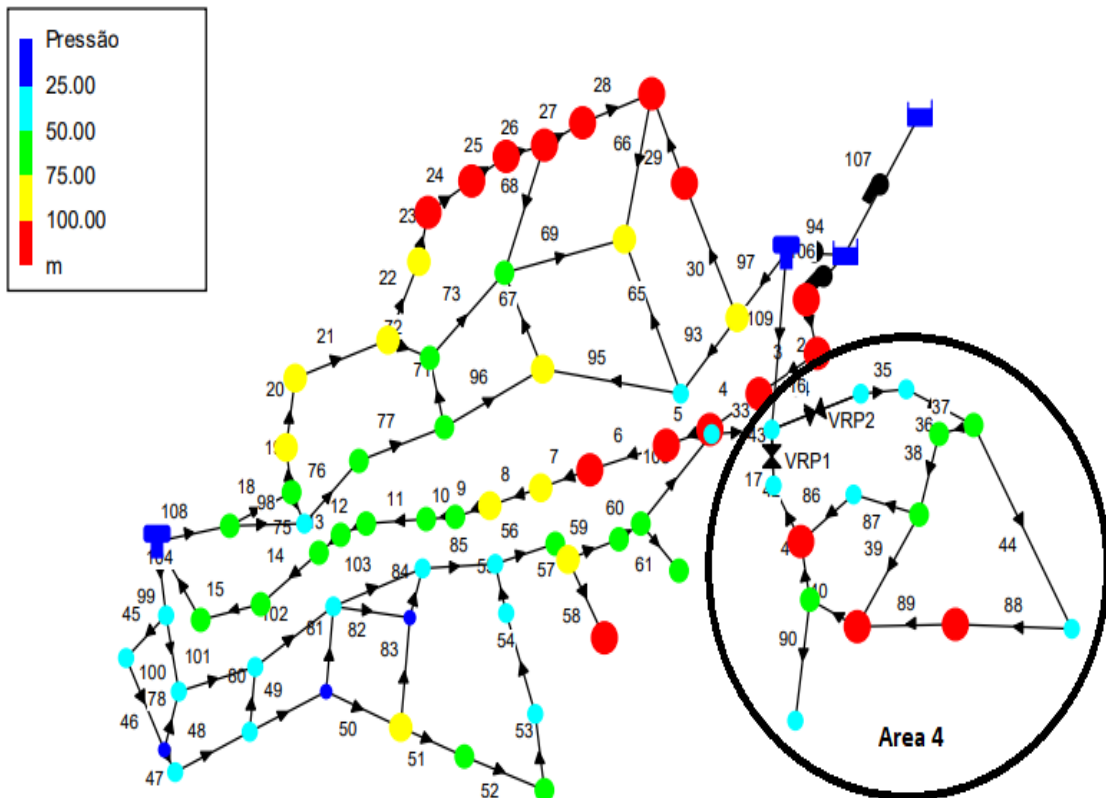


Figura 25. Comportamento das pressões com actuação da VRP [Autor]

Como resultado da utilização da válvula redutora de pressão VRP registou-se uma redução significativa das pressões em quase todos os nós da Área 4 e um aumento significativo dos valores de vazões nos trechos 34 e 43. Registou-se igualmente valores de pressões elevadas nos nós 52,54 e 76, o que sugere o uso de mais VRP na rede. Embora tenha-se verificado um comportamento consideravelmente bom sobponto de vista de controlo de pressão com a introdução de VRP na rede, o seu uso reflecte-se em perda de energia como foi referenciado anteriormente, a tabela (6) ilustra os valores das pressões nessa região.

Tabela 6. Pressões dos nós da área 4 após a introdução da VRP

| Identificador do Nó | Cota(m) | Carga Hidráulica(m) | Pressão(m) |
|---------------------|---------|---------------------|------------|
| Nó 50               | 245     | 286.71              | 41.71      |
| Nó 51               | 175     | 206.71              | 31.71      |
| Nó 52               | 49      | 209.42              | 160.42     |
| Nó 53               | 154     | 210.31              | 56.31      |
| Nó 54               | 115     | 223.58              | 108.58     |
| Nó 55               | 166     | 225.85              | 59.85      |
| Nó 56               | 174     | 247.67              | 73.67      |
| Nó 57               | 195     | 258.97              | 63.97      |
| Nó 58               | 235     | 285.00              | 50.00      |
| Nó 59               | 221     | 274.98              | 53.98      |
| Nó 60               | 197     | 246.43              | 49.43      |
| Nó 74               | 263     | 288.98              | 25.98      |
| Nó 75               | 192     | 213.22              | 21.22      |
| Nó 76               | 114     | 239.51              | 125.51     |

**b) Rede com BFT seleccionada com o método de Chapallaz.**

Para fazer-se a simulação após a instalação da BFT é necessário determinar-se o valor de perda de carga na bomba a funcionar como turbina, para tal escolhe-se em primeiro a BFT com base nos parâmetros dos trechos escolhidos para a sua instalação.

De seguida foram calculados os parâmetros necessários para a selecção das BFT por meio das equações apresentadas no Capítulo 4 deste projecto. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela (7).

Tabela 7. Parâmetro para selecção da BFT

| Parâmetro  | Símbolo  | BFT 1 | BFT 2 |
|--|----------|-------|-------|
| Vazão de Projecto ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) | $Q_t$    | 0.032 | 0.021 |
| Queda Líquida (m)                                | $H_t$    | 103   | 43    |
| Rotação da BFT (rpm)                             | $n$      | 3500  | 1750  |
| rotação específica da BFT                        | $n_{qt}$ | 19.36 | 30.20 |
| Rotação específica da bomba                      | $n_{qb}$ | 21.75 | 33.71 |
| Vazão media da bomba                             | $Q_b$    | 0.024 | 0.016 |
| Rendimento Estimado da BFT (%)                   | $\eta_b$ | 75    | 70    |
| Coeficiente de Vazão                             | $cq$     | 1.52  | 1.46  |
| Coeficiente de Altura                            | $ch$     | 1.54  | 1.48  |
| Altura da bomba (m)                              | $H_b$    | 67.76 | 29.45 |
| Vazão de bomba ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )    | $Q_b$    | 0.021 | 0.014 |

Feito o cálculo dos parâmetros faz-se então a selecção das BFTs, isto é a bomba que apresente menor relação custo-benefício, ou seja, aquela que tenha o menor custo com maior rendimento entre possíveis marcas e modelos comercializados. Foram analisadas diferentes marcas e modelos para selecção das bombas que mais se aproximavam das características desse trabalho. Analisou-se os catálogos de bomba das marcas KSB, Schneider moto bombas, entre outras, e o modelo seleccionado é uma bomba da marca KSB- MEGANORM 50-200 com rotor de 195 mm e possui um rendimento de 70% para a primeiro caso, e KSB- MEGANORM 50-250 com rotor de 130 mm e possui um rendimento de 74% para o segundo caso, para as condições de operação, cujo catálogo encontra-se no Anexo A

Depois da escolha da Bomba funcionando como turbina utilizou-se a Equação (1) para determinar a perda de carga media em função da vazão turbinada, através do ponto de operação de melhor eficiência, Anexo 3. Em seguida foi feita a terceira simulação, com os resultados apresentados na figura 27.

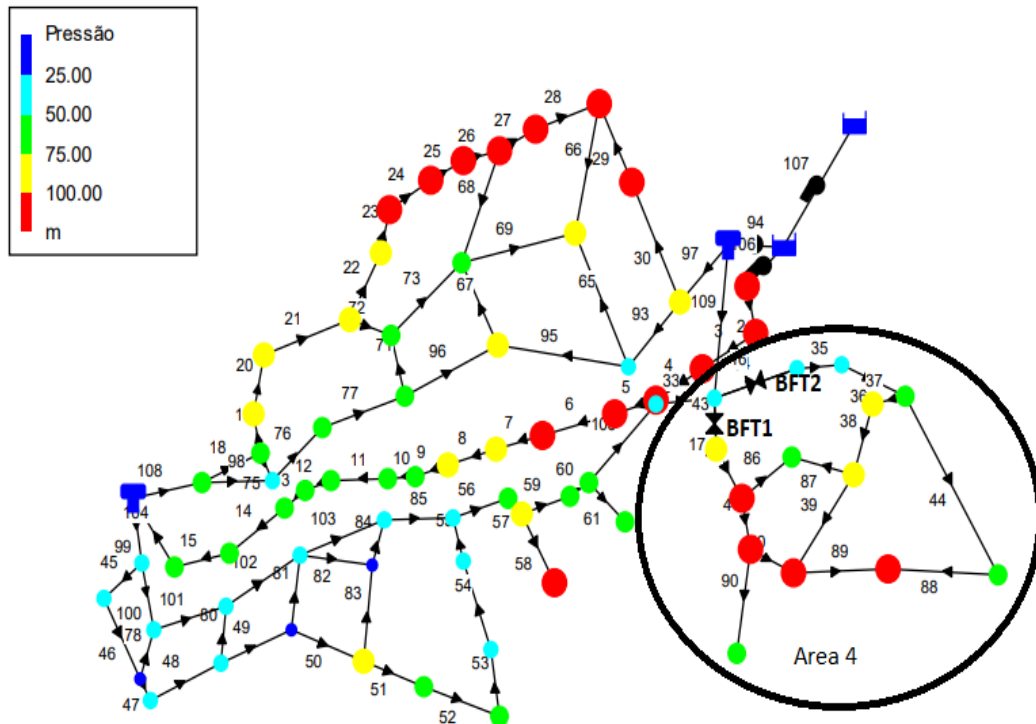


Figura 26. Comportamento das pressões com actuação da BFT [Autor]

Com a instalação da BFT no sistema verificou-se um comportamento razoável sob o ponto de vista de controlo de pressão, isso deve-se ao facto das BFT trabalharem em um ponto fixo de eficiência máxima, contudo a instalação desses dispositivos recuperam a energia que outrora seria dissipada pelas VRP, a tabela (9) ilustra os valores de pressão obtidos na simulação.

Tabela 8. Pressões dos nós da área 4 após a introdução das BFT's

| <b>Identificador do Nó</b> | <b>Cota(m)</b> | <b>Carga Hidráulica(m)</b> | <b>Pressão(m)</b> |
|----------------------------|----------------|----------------------------|-------------------|
| Nó 50                      | 245            | 286.56                     | 41.56             |
| Nó 51                      | 175            | 262.56                     | 87.56             |
| Nó 52                      | 49             | 262.59                     | 213.59            |
| Nó 53                      | 154            | 262.60                     | 108.60            |
| Nó 54                      | 115            | 265.51                     | 150.51            |
| Nó 55                      | 166            | 266.32                     | 100.32            |
| Nó 56                      | 174            | 273.26                     | 99.26             |
| Nó 57                      | 195            | 276.86                     | 81.86             |
| Nó 58                      | 235            | 286.56                     | 51.56             |
| Nó 59                      | 221            | 282.82                     | 61.82             |
| Nó 60                      | 197            | 271.52                     | 74.52             |
| Nó 74                      | 263            | 288.87                     | 25.87             |
| Nó 75                      | 192            | 262.64                     | 70.64             |
| Nó 76                      | 114            | 268.72                     | 154.72            |

### c) Comparação entre VRP e BFT

Como foi possível observar a partir dos mapas apresentados anteriormente dando conta do bom funcionamento da válvulas redutoras de pressão em relação as bombas funcionando como turbina, no controle de pressão, o gráfico abaixo ilustra de forma mais clara os valores das pressões sem o uso de dispositivo de controlo (verde), com o uso de bomba funcionando como turbina (azul), e válvula redutora de pressão (vermelho), Nota-se que com o uso de BFT os valores de pressão nos nós 52,54 e 76 ainda permanecem altos, isto exigiria o uso de um meio para redução de pressão que poderia ser feito por meio da ligação em paralelo BFT e VRP.

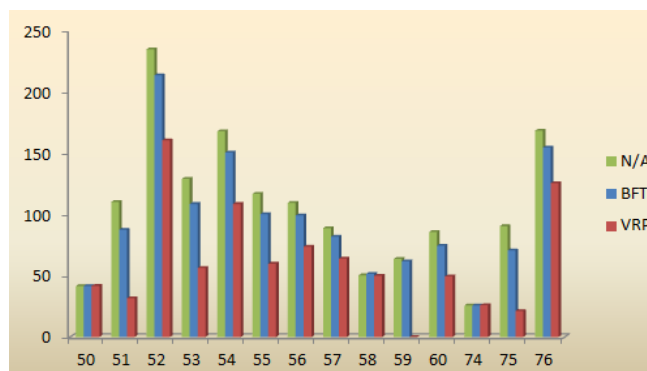


Figura 27. Pressão com e sem o uso de dispositivo de controlo [Autor]

#### d) Energia produzida pelas BFTs

As potência de saída e eficiência alcançadas pelas BFT's considerando-se 12h de funcionamento são calculados pelas equações (12) e (13). Os valores dos ganhos energéticos estão apresentados na figura 28.

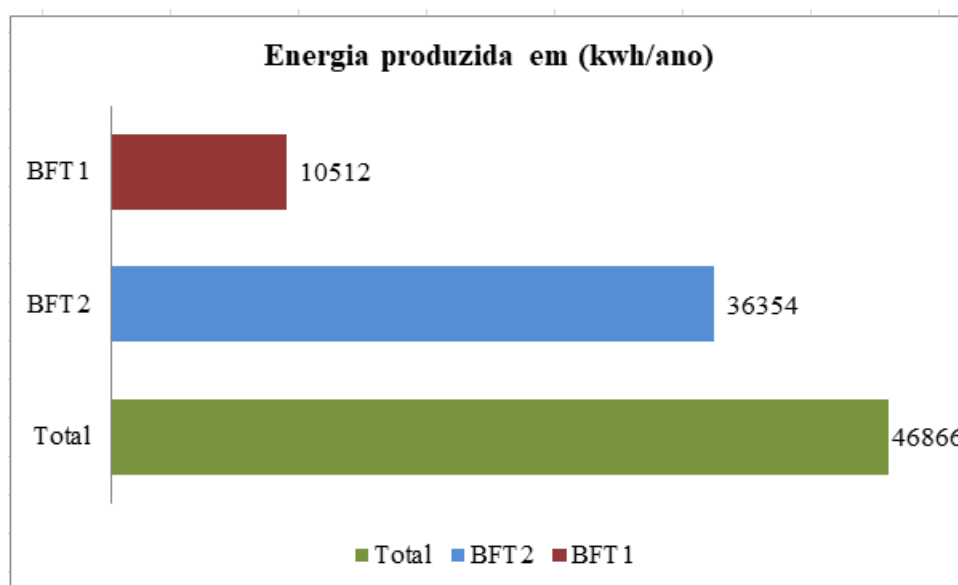


Figura 28. Energia produzida anualmente [Autor]

A receita arrecadada com a instalação das BFT's no sistema de abastecimento é calculando considerando a tarifa praticado pela concessionária de energia local. A tabela a seguir apresenta os ganhos monetários aferidos.



Tabela 9. Recuperação de energia no SSA ao ano nas 12h de operação BFT

| <b>trecho</b> | <b>BFT</b> | <b>Potência (kW)</b> | <b>Recuperação de energia (kWh/ano)</b> | <b>Receita (Mz/ano)</b> |
|---------------|------------|----------------------|---|-------------------------|
| <b>43</b>     | 1          | 8.3                  | 36,354                                  | 294,903.64              |
| <b>34</b>     | 2          | 2.4                  | 10,512                                  | 85273.34                |
| <b>Total</b>  |            | 10.7                 | 46,866                                  | 380,176.98              |

#### e) Análise de viabilidade económica BFTs

Visando demonstrar a potencialidade do ganho auferido pela implantação das unidades BFT actuando como um sistema recuperador de energia, desenvolveu-se o estudo de viabilidade do investimento, os custos relacionados com projecto estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11. Custos do projecto

| <b>Equipamentos</b>  | <b>Custo (Mz)</b> |
|--|-------------------|
| <b>Conjunto BFT</b>  | 239199.55         |
| <b>Medidor de pressão</b>  | 7596,00           |
| <b>Inversor de Frequência</b><br>Frequência WEG<br>CFW-08 7A Trifásico 220V –<br>2,00 CV | 57000,00          |
| <b>Custo de operação e manutenção</b>  | 11956,00          |
| <b>Custo de obras Civas</b>  | 53366.4           |
| <b>Total</b>   | 369117,95         |

Para a análise de viabilidade económica foram considerados três parâmetros principais, o valor actual liquido (VAL), a taxa interna de retorno (TIR) e, o payback que corresponde ao tempo

necessária para o projecto gerar retorno. Os valores dos parâmetros de viabilidade considerando o tempo de vida do projecto de 10 anos estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12. Parâmetros de viabilidade económica

| Parâmetros                    | Valor      | Unidade |
|-------------------------------|------------|---------|
| Valor actual liquido (VAL)    | 644 017,15 | Mzn     |
| Taxa interna de retorno (TIR) | 32,34      | %       |
| Tempo de retorno              | 3,11       | Anos    |

Os resultados obtidos sugerem que o projecto de instalação de bomba funcionando como turbina em sistemas de abastecimento onde a distribuição de água é viável, uma vez que valor actual líquido (VAL) é positivo e a taxa de interna de retorno é maior que a taxa de desconto. O investimento total do projecto é recuperado após 3 anos de operação. A figura (24) ilustra o fluxo de caixa do projecto ao longo dos 10 anos de operação

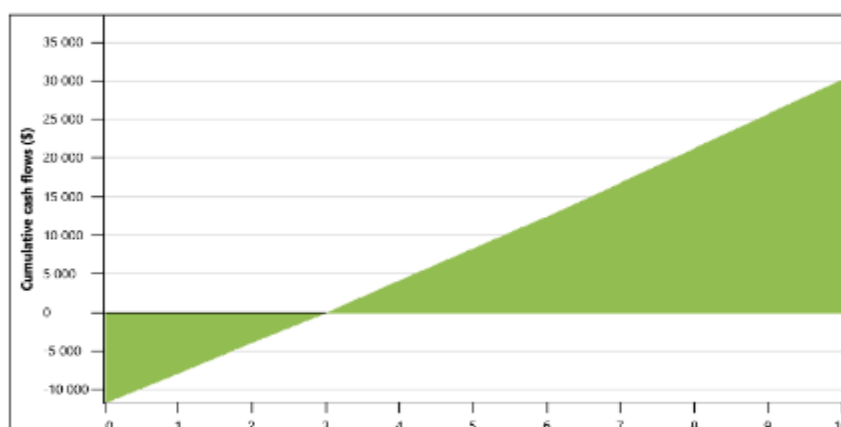


Figura 28. Gráfico de Cash flow [Autor]

#### f) Análise de viabilidade ambiental

Na figura (25) é apresentada os resultantes das emissões resultantes do projecto de instalação de BFT.

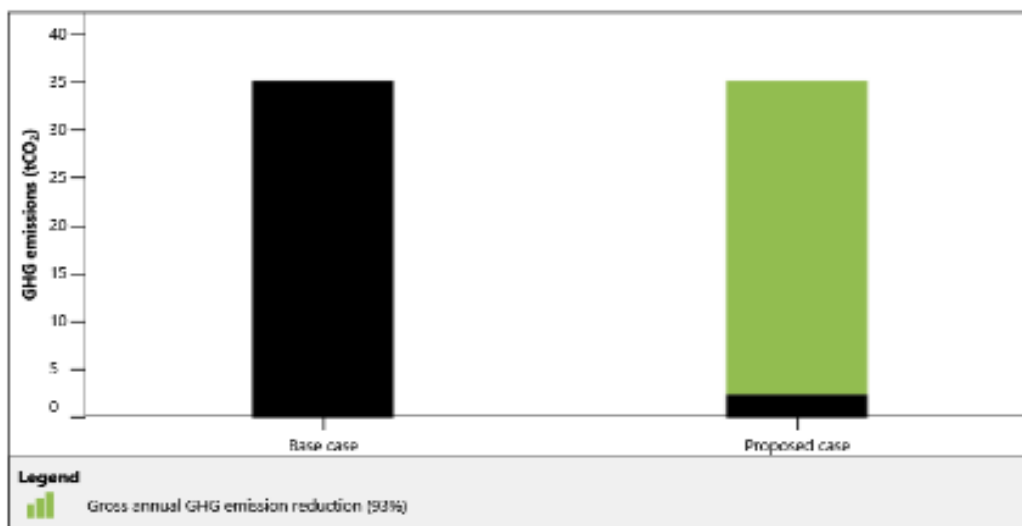


Figura 29. Gráfico de emissões de CO<sub>2</sub> [Autor]

Com a instalação das BFT's registou-se um resultado aceitável sob ponto de vista de controlo de emissão de gases de efeito estufa (GEE). Para efeitos de comparação foi usada a emissão gerada pelos carros de motor de combustão interna, com isso a instalação evitaria 32.8tCO<sub>2</sub> o correspondente a 6 carros.

## CAPITULO 6-CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1. Conclusão

A gestão de pressão é sem dúvida uma das medidas mais eficazes para reduzir os vazamentos e consequentes perdas de água em SAA. A presente pesquisa demonstrou que o excesso de pressão pode ser usada para a geração de energia eléctrica não convencional através de bombas funcionando como turbina, que para além de fazer o aproveitamento energético, reduzem as perdas em SAA.

Em termos de controlo de pressão foi observado após diversas simulações do sistema por meio do EPANET 2.0 que a utilização da BFT não é tão eficaz quando comparado com as válvulas redutoras de pressão, isto porque com a sua utilização prevalecem pressões acima da recomendada em alguns pontos do sistema.

A energia gerada anualmente com a instalação das BFT's é de 46,866 kwh/ano, podendo-se concluir de forma incontestável que as BFT's constituem uma boa alternativa para a geração de energia eléctrica, que pode ser usada tanto para a retro alimentação dos SAA's, ou pode ser canalizada a rede eléctrica local. Contudo os níveis de produção não são tão altos quando comparado com sistema de geração convencional.

O valor arrecadado caso a energia gerada fosse vendida a rede eléctrica local é de 380,176.98 Mt, e os custos totais da instalação é 369,117,95 Mt, quanto a viabilidade económica o projecto apresenta valor actual líquido (VAL) positivo de 644 017,15 e a taxa de interna de retorno 32,34%, tonando-se assim economicamente viável. O tempo estimado para o retorno do investimento é de 3 anos.

Registou-se igualmente um resultado aceitável sob ponto de vista de controlo de emissão de gases de efeito estufa (GEE) evitando-se 32.8tCO<sub>2</sub> o correspondente a 6 carros.

De certeza que o grande desafio do presente século é a busca por sustentabilidade, no entanto a possibilidade de se poder conciliar o controle de pressão com a produção de energia eléctrica poderia ser visto como uma grande oportunidade para a promoção destes grande objectivo.

## 6.2. Recomendações

Por forma a garantir um funcionamento adequado do sistema, sob o ponto de vista de controlo de pressão, recomenda-se:

- Ligação da BFT com outros dispositivos, nomeadamente, a válvula redutora de pressão e uma válvula by pass, para melhorar o controlo do fluxo.
- Aprimoramento dos métodos de simulação e escolha do local ideal para a instalação da BFT.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, L.S.; RAMOS, H.; COELHO, S.T., 2006. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management*, v. 20, p. 133-149, 2006
- BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A.; GOMES, H. P.; SALVINO, M. M. Energy Savings in Pumping Systems: Application of a Fuzzy System. *Ciência & Engenharia*, v. 24, p. 71-78, 2015.
- BEZERRA, S. T. M. Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia. 164 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009. Cap. 3. 2009.
- CARRAVETTA, A.; DEL G. G.; FECAROTTA, O.; RAMOS, H. Pat design strategy for energy recovery in water distribution networks by electrical regulation. *Energies*, v. 6, n. 1, p. 411-424, 2013. \_\_\_\_\_. Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy. *Water Res. Manag.*, n. 26, p. 3947-3959, 2012.
- CARRAVETTA, A.; FECAROTTA, O.; RAMOS, H. Numerical simulation on pump as turbine: Mesh reliability and performance concerns. *Research Gate*, jun. 2011.
- CARRAVETTA, A.; FECAROTTA, O.; SINAGARA, M.; TUCCIARELLI, T. Cost-benefit analysis for hydropower production in water distribution networks by a pump as turbine. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, n. 6, p. 1-8, 2014. CARTER,
- FECAROTTA, O.; CARRAVETTA, A.; RAMOS, H. M. CFD and Comparisons for a Pump As Turbine: Mesh Reliability And Performance Concerns. *International Journal of Energy and Environment*, v. 2, n. 1, p.39-48, 2011
- GOMES, Heber Pimentel. *Eficiência Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos*. 2ª Ed. UFPB, 2009.
- GOMES, R. J.; MARQUES, A. S.; SOUSA, J. Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water J.* v. 8, n. 2, p. 65-77, 2011.
- LIMA, G. M. *Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá. 2013.

LIMA, G. M. Geração de Energia e Controle de Pressão em Redes de Abastecimento de Água Utilizando Bombas Funcionando como Turbina. 138 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Energéticos e Ambientais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

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

NICOLE. Energy's water demand: trends, vulnerabilities, and management. Congressional Research Service, Washington, D.C., USA, 2010. CHADWICK, A; MORFETT, J. Hidráulica em Engenharia Civil e Ambiental. Lisboa: Instituto Piaget, 1998. CORCORAN, L.;

MCNABOLA, A.; COUGHLAN, P. Optimization of water distribution networks for combined hydropower energy recovery and leakage reduction. *J Water Resour Plan Manag*, v. 42, n. 2, 2015. CORRÊA, S. S.; SILVA, L. C.; BEZERRA, S. T. M.; ALVES, I. M.; MATSINHE, Nelson; RIETVELD, Luuk (1992) Abastecimento de água. Maputo. Relatório da WaterAid, Salomon Lda.

DUARTE, A. D.; COELHO, I. C. L. Análise dos impactos ambientais proporcionados pelas perdas de água em sistemas de distribuição de água. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017

TSUTIYA, M: T. *Sistema de abastecimento de água: tópicos especiais. Apostila*. SABESP. Directoria Técnica e Meio Ambiente Superintendencia de pesquisa e desenvolvimento Tecnológico. 132p,São Paulo,1997.

TSUTIYA, M. T. *Redução do custo de energia eléctrica em sistema de abastecimento de água*. ABES. São Paulo, 2001.

Conselho Municipal de Maputo, Perfil Estatístico Do Município de Maputo, 2004-2007, 2010, 2011.

SIMBE, Domingos Francisco Manuel, Análise da Expressão Espacial dos Sistemas de Abastecimento de Água no Bairro 25 de Junho "A", Maputo, 2006.

Barreto., "Seminário Apren - Aposta nas energias renováveis ." 2007.

Camus, Cristina and Eusébio, Eduardo., "Energia Mini-Hídrica." Lisboa : s.n., 2006. Gestão de Energia.

Castro, Rui M.G., "Condições Técnicas da Ligação da Produção Descentralizada Renovável." 4 Fevereiro 2004. Energias Renováveis e Produção Descentralizada.

Lins, Christine and Laguna, Maria., "Development of Small Hydro Power." *Examining the potential of small hydropower plants*. s.l. : European Small Hydropower Association.

ESHA- European Small Hydropower Association., "Thematic Network on Small Hydropower (TNSHP)- Project." *Environmental Integration of Small Hydropower Plants*.

NREL, National Renewable Energy Laboratory., *Small Hydropower Systems*. USA : s.n., 2001.

Association, The British Hydropower., *A GUIDE TO UK MINI-HYDRO*. s.l. : BHA, 2001.

Castro, Rui M.G., "Energias Renováveis e Produção Descentralizada." *INTRODUÇÃO À ENERGIA MINI-HÍDRICA*. Lisboa : IST, Fevereiro 2007.

aiva, José Pedro Sucena., *Redes de energia eléctrica uma análise sistémica*.

PIQUEIRO, Francisco., *Efeito da regulação, e da forma e dimensões da câmara de carga na produtividade energética de um pequeno aproveitamento hidroeléctrico*. Porto : Feup, 1991.

OLIVEIRA, Adriano., "Recuperação de Energia Hidráulica em sistemas de distribuição de água." Porto : FEUP, 2008.

Guedes, Manuel Vaz., *O Alternador Síncrono Trifásico nos Pequenos Aproveitamentos Hidroeléctricos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto : s.n., 1994.

hydropower, Thematic Network on Small., *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. s.l. : ESHA, 2004. 129

Harvey, Adam, Hettiarachi, Piyantha and Inversin, Allen., "Micro-hydro design manual." *A guide to small-scale water power schemes*. s.l. : IT Publications, 1993.

Moisés, Paulo., *As Máquinas Primárias*. Viseu : Escola Superior de Tecnologia, 1999.

PHOMMACHANH, Dousith, et al., "Development of a Positive Displacement MicroHydro Turbine." *JSME International Journal*. serie b n.º 2, 2006, Vol. 49.

"[http://www.wkv-ag.com/englisch/tech/tk\\_2\\_2.html](http://www.wkv-ag.com/englisch/tech/tk_2_2.html)." wkv-ag. [Online] [Cited: 05 17, 2008.]

BALARIM, Carlos, et al., "Custo de bombas centrifugas funcionando como turbinas em microcentrais hidrelétricas." 2004.

RAMOS, Helena, et al., "Available energy assessment in water supply systems." Available energy assessment in water supply systems. Lisboa : IST.



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

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

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

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

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

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

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

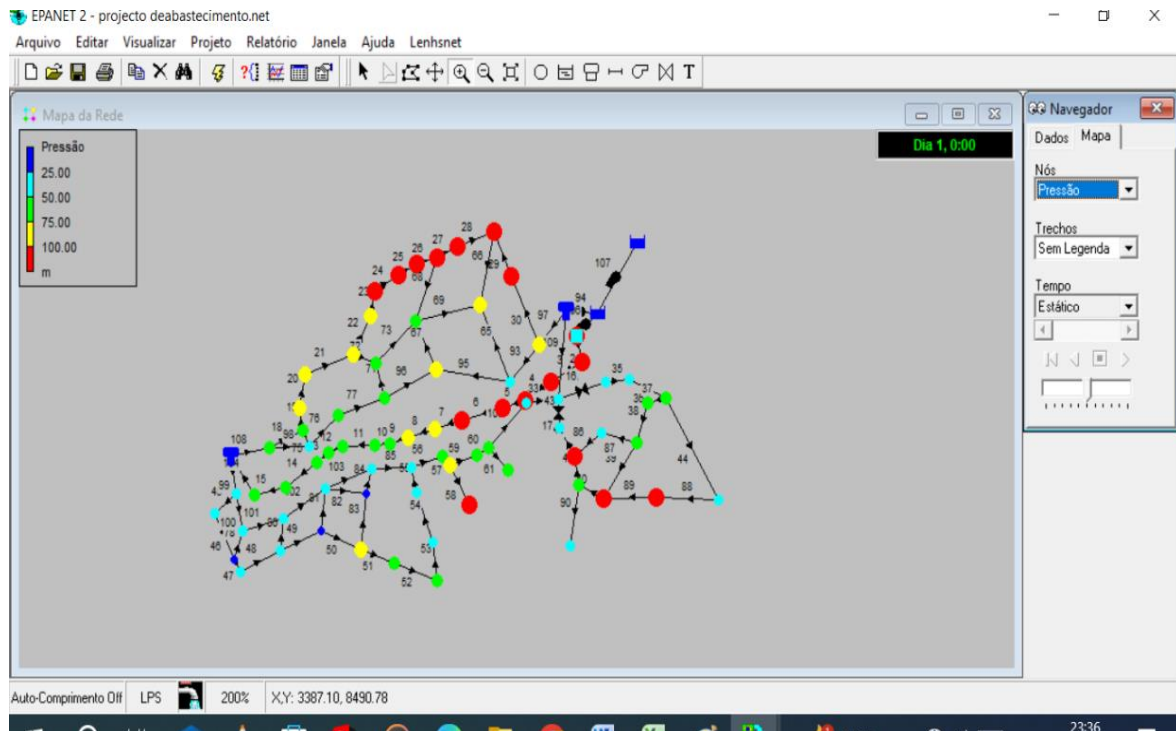
TSUTIYA, M. T. Redução do custo de energia eléctrica em sistemas de abastecimento de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2006.

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

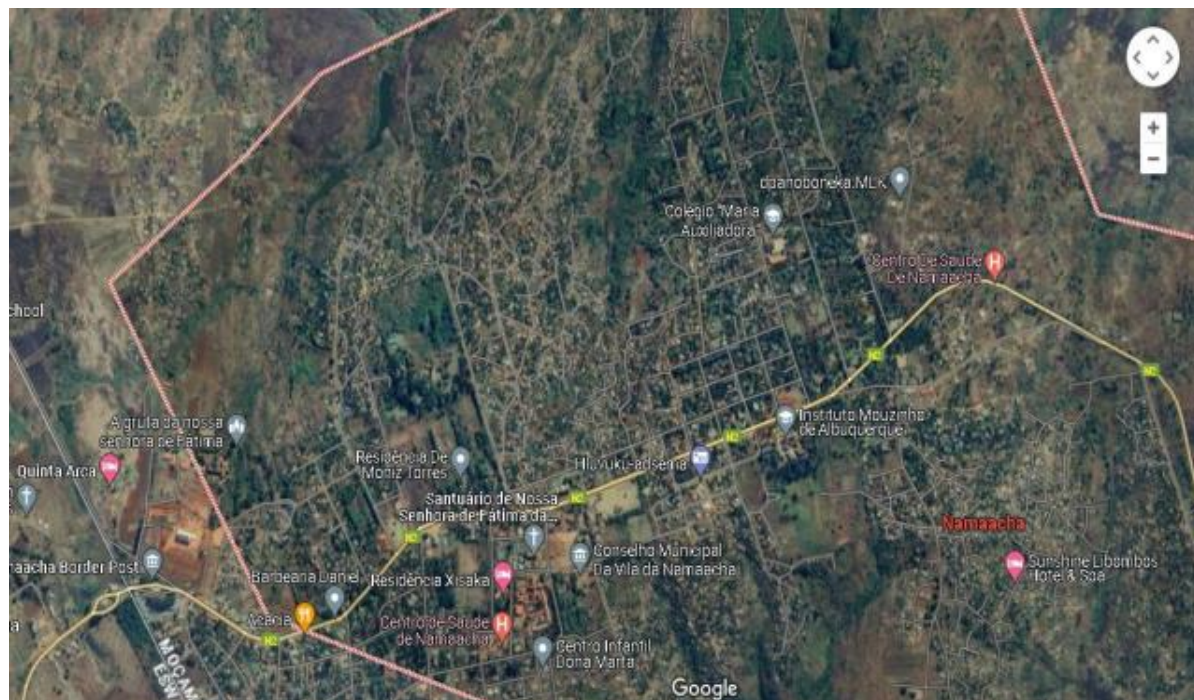
VIANA, A. N. C.; REZEK, A. J. J.; MEDEIROS, D. M. A Utilização de Geradores de Indução Acionados por BFTs na Geração de Energia Elétrica. 10p. AGRENER GD, 2004.

# ANEXOS

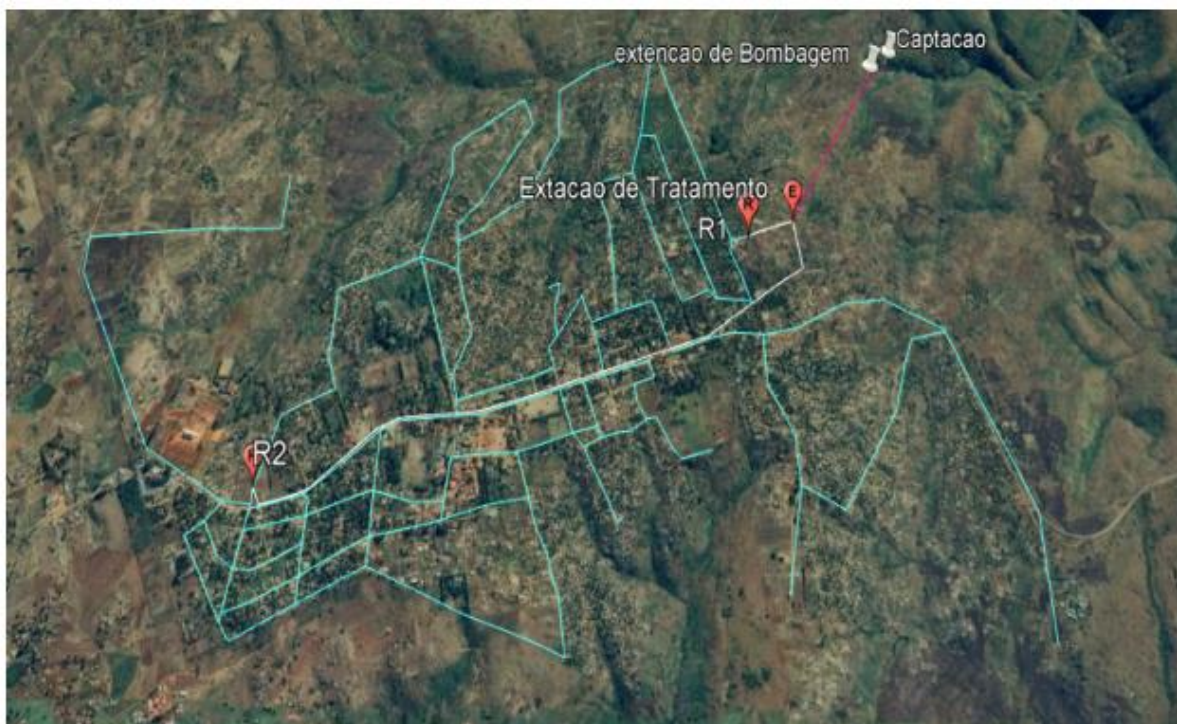
Anexo1. Interface do EPANET 2.00 [EPANET]



Anexo-2 Localização de Namaacha



Anexo3 – Composição do sistema de abastecimento



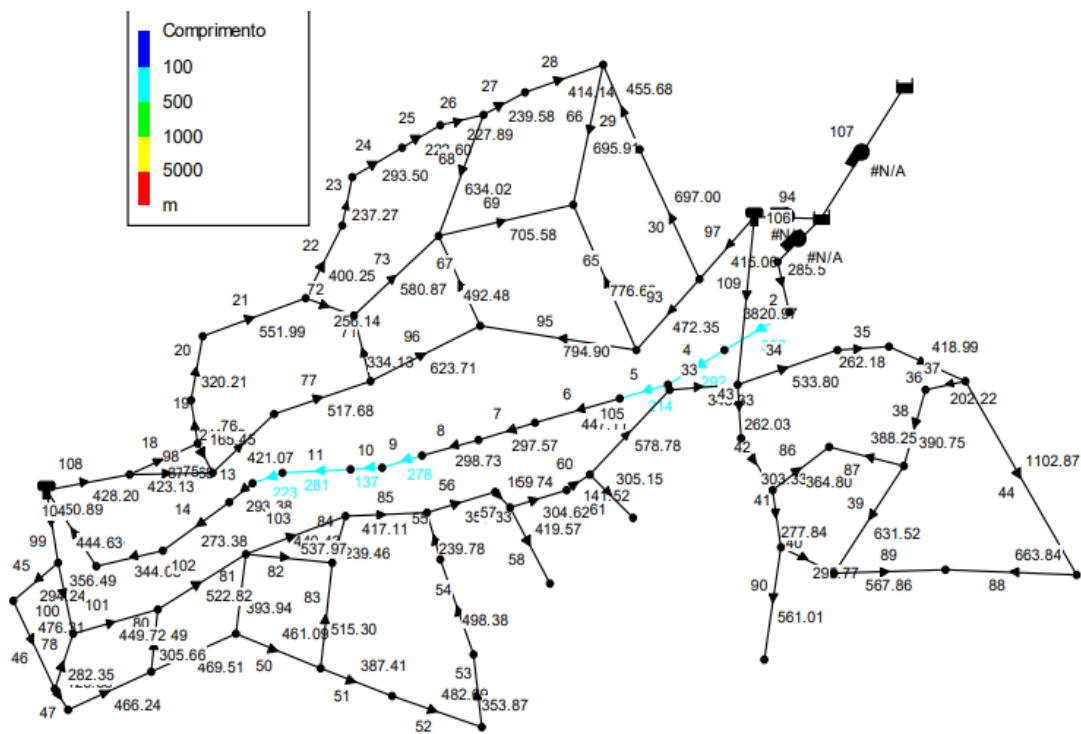
planta do tracado das condutas  
descricao:  
R1-reservatorio-01  
R2-reservatorio-02  
tracado azul rede de distribucao  
tracado branco-resde deaduc.ao

Anexo 4. Divisão da região em áreas

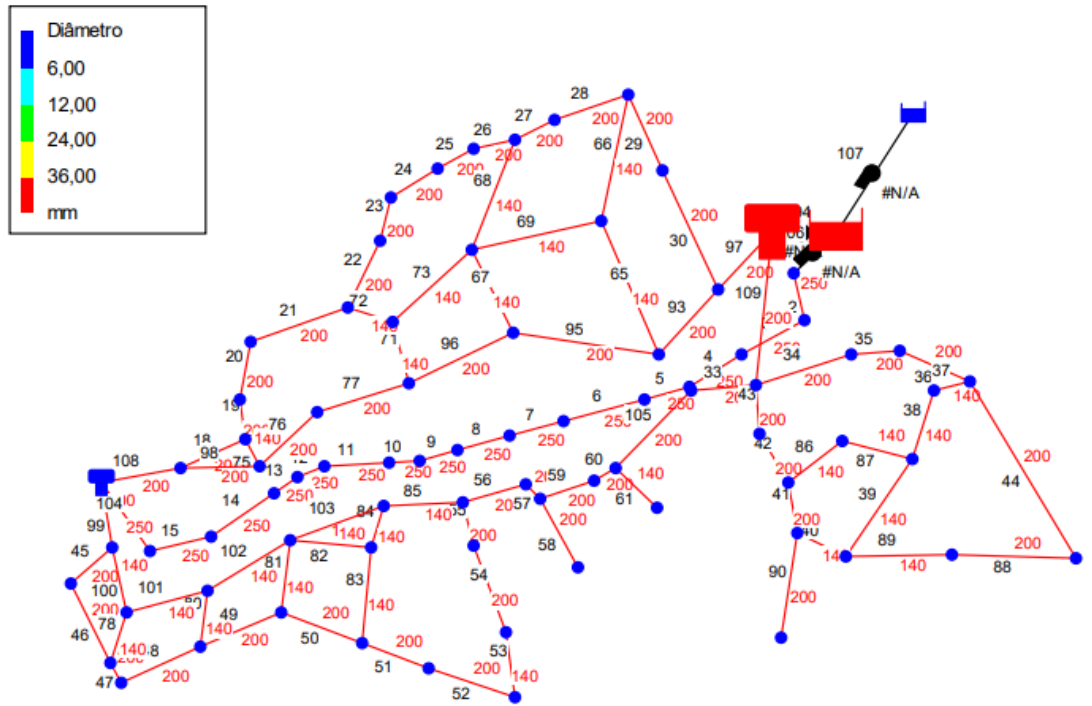


ANEJO-02: DIVISAO DAS AREAS E DISTRIBUICAO DOS CAUDAIS EM % : FONTE GOOGLE EARTH

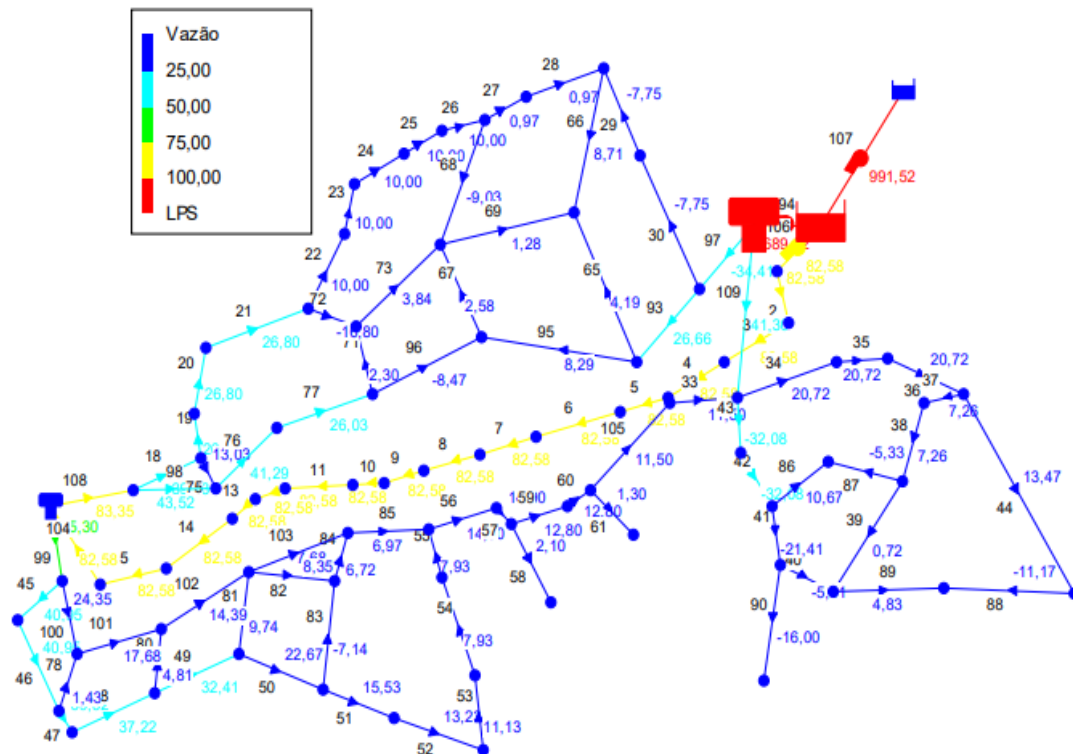
Anexo 5. Comprimentos das condutas



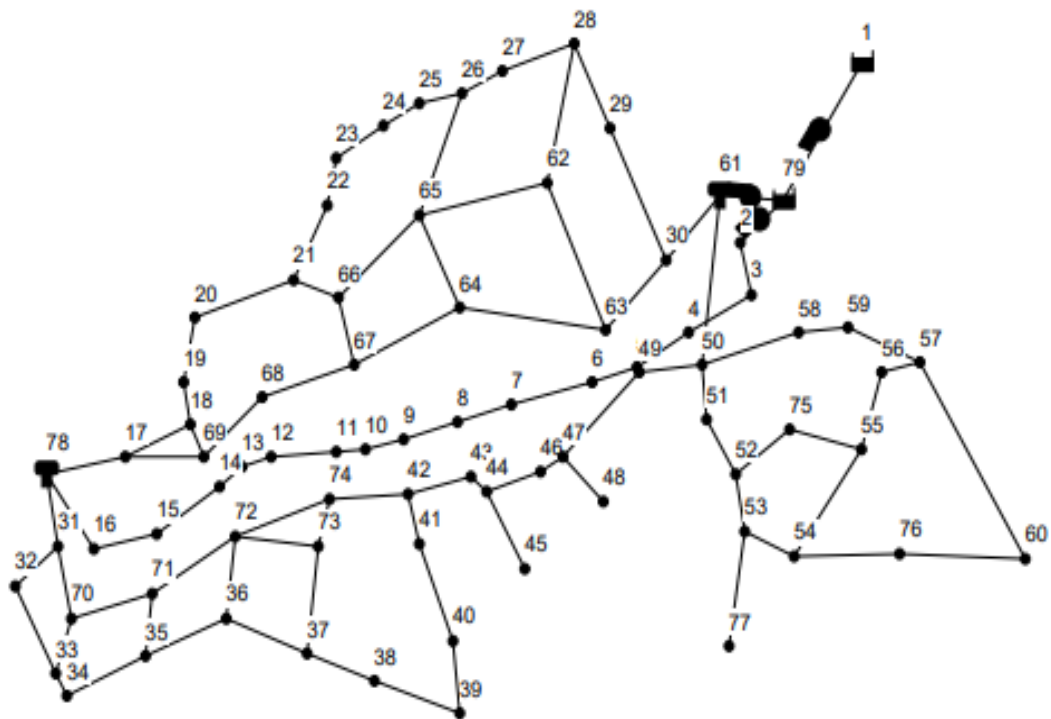
Anexo 6. Diâmetros das condutas




Anexo 7. Vazões nas condutas



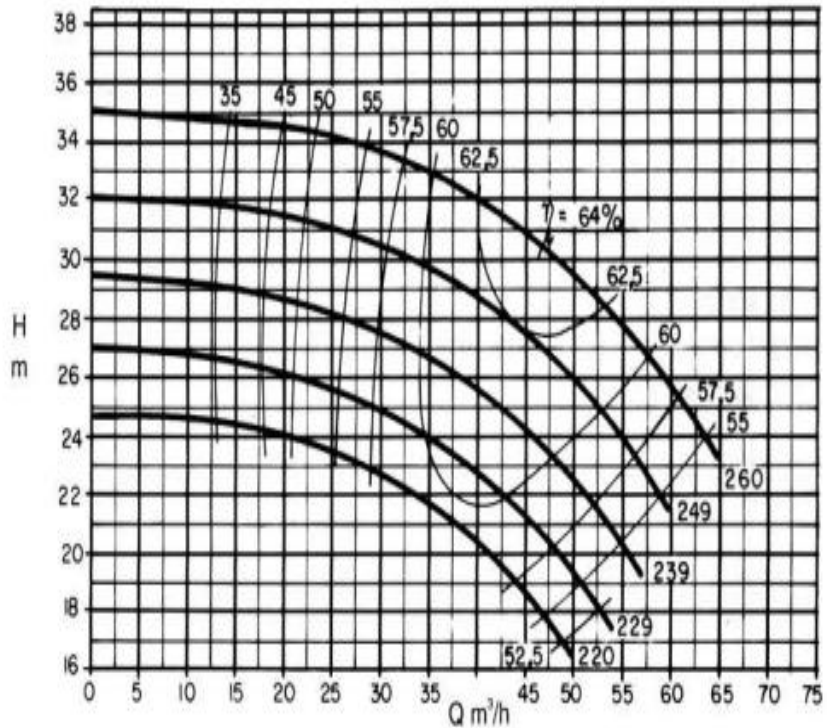
Anexo 8. Nós nas condutas



Anexo 9. Catálogos dos fabricantes


|  |   |  |                 |   |
|--|---|--|-----------------|---|
| Bomba Tipo<br>Pump Type<br>Tipo de Bomba | <b>KSB MEGANORM<br/>KSB MEGABLOC<br/>KSB MEGACHEM</b> | Tamanho<br>Size<br>Tamaño                                      | <b>50-250</b>   |  |
| Oferta nº                                | Item nº   | Velocidade Nominal<br>Nom. Rotative Speed<br>Velocidad Nominal | <b>1750 rpm</b> |   |
| Project - No.                            | Item - No.  |  |                 |   |
| Oferta - nº                              | Pos. - nº   |  |                 |   |

Altura Manométrica  
Head  
Altura Manométrica

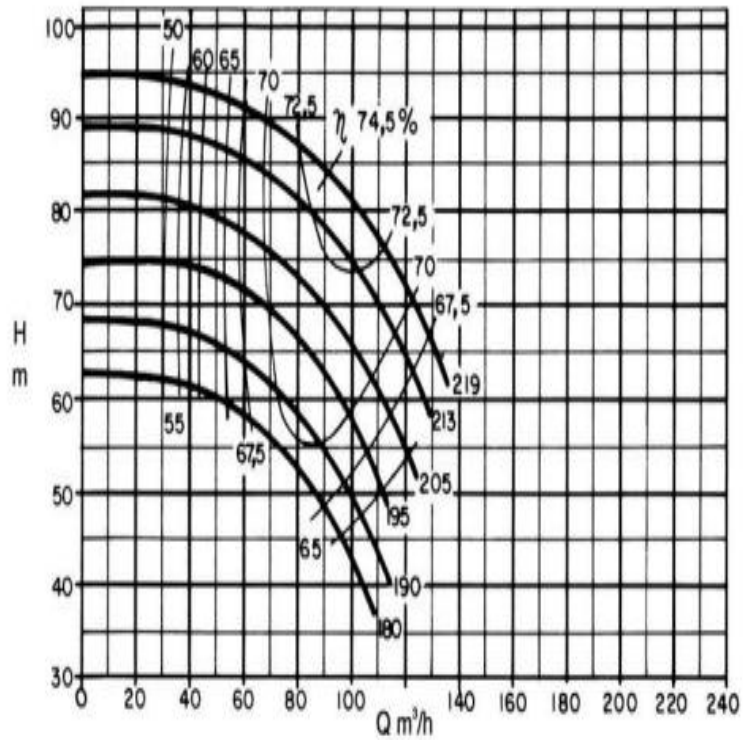




Anexo 11. Catálogos dos fabricantes

|   |   |  |                 |   |
|---|---|--|-----------------|---|
| Bomba Tipo<br>Pump Type<br>Tipo de Bomba  | <b>KSB MEGANORM<br/>KSB MEGABLOC<br/>KSB MEGACHEM</b> | Tamanho<br>Size<br>Tamaño                                      | <b>50-200</b>   |  |
| Oferta nº<br>Project - No.<br>Oferta - nº | Item nº<br>Item - No.<br>Pos. - nº                    | Velocidade Nominal<br>Nom. Rotative Speed<br>Velocidad Nominal | <b>3500 rpm</b> |   |

Altura Manométrica  
Head  
Altura Manométrica



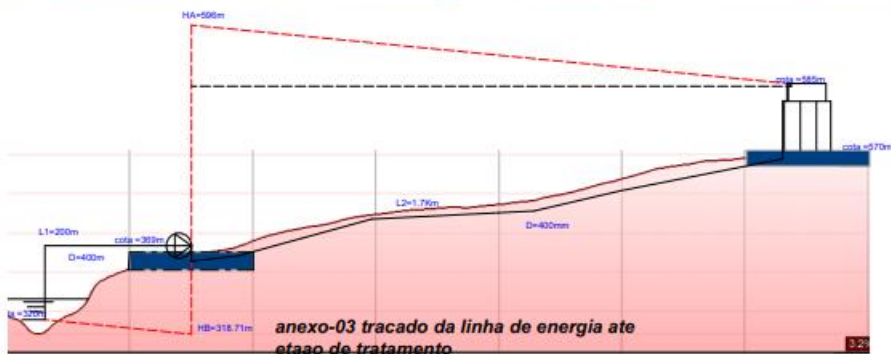
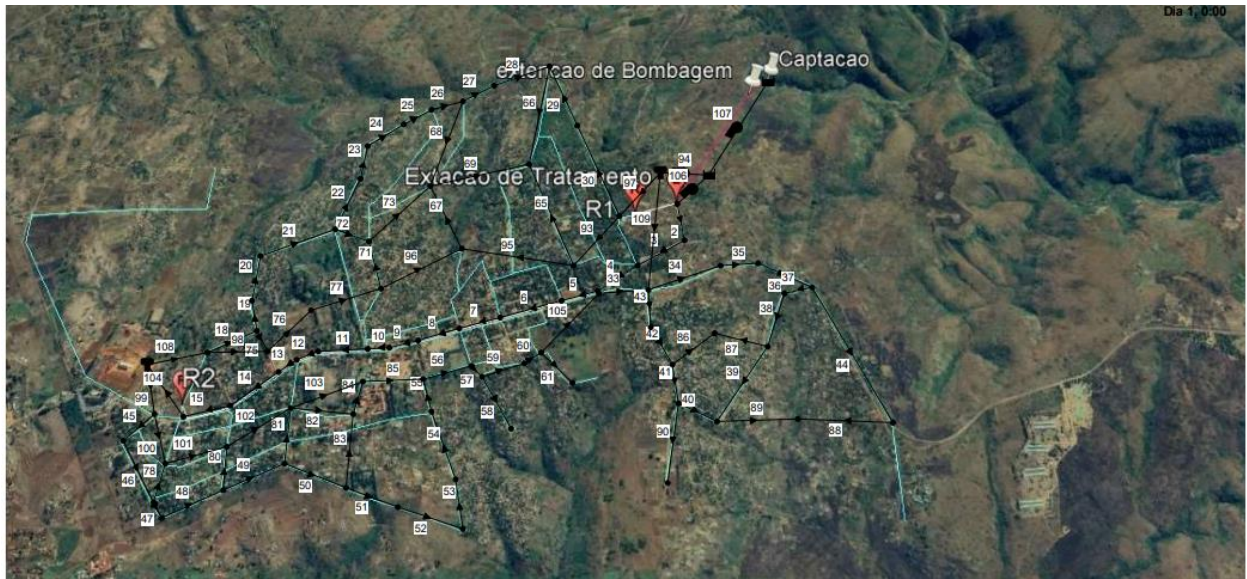
Anexo 12. Pontos de operação de melhor eficiência da bomba KSB – Rot. 1750 rpm.

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

Anexo 13. Pontos de operação de melhor eficiência da bomba KSB – Rotação. 1750 rpm.

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

Anexo 14-Planta baixa do sistema de abastecimento



Anexo-16 vazões e velocidades sem dispositivo de controle

| Identificador do Trecho | Diâmetro mm | Vazão LPS | Velocidade m/s | Taxa de Reação mg/L/d | Qualidade | Estado |
|-------------------------|-------------|-----------|----------------|-----------------------|-----------|--------|
| Tubulação 53            | 140         | 11.06     | 0.72           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 54            | 200         | 7.86      | 0.25           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 55            | 200         | 7.86      | 0.25           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 56            | 200         | 14.75     | 0.47           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 57            | 200         | 14.75     | 0.47           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 58            | 200         | 2.10      | 0.07           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 59            | 200         | 12.65     | 0.40           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 60            | 200         | 12.65     | 0.40           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 61            | 140         | 1.30      | 0.08           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 65            | 140         | 4.19      | 0.27           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 66            | 140         | 8.71      | 0.57           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 67            | 140         | 2.58      | 0.17           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 68            | 140         | -9.03     | 0.59           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 69            | 140         | 1.28      | 0.08           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 71            | 140         | 2.30      | 0.15           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 72            | 140         | -16.80    | 1.09           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 73            | 140         | 3.84      | 0.25           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 75            | 140         | 13.03     | 0.85           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 76            | 200         | 41.29     | 1.31           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 77            | 200         | 26.03     | 0.83           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 78            | 140         | 1.43      | 0.09           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 80            | 140         | 4.81      | 0.31           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 81            | 140         | 9.72      | 0.63           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 82            | 140         | 7.65      | 0.50           | 0.00                  | 0.00      | Open   |

Anexo-15 vazões e velocidades com BFT

| Identificador do Trecho | Vazão LPS | Velocidade m/s | Perda de Carga m/km | Fator de Atrito | Taxa de Reação mg/L/d | Qualidade | Estado |
|-------------------------|-----------|----------------|---------------------|-----------------|-----------------------|-----------|--------|
| Tubulação 53            | 11.13     | 0.72           | 2.03                | 0.011           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 54            | 7.93      | 0.25           | 0.37                | 0.023           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 55            | 7.93      | 0.25           | 0.37                | 0.023           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 56            | 14.90     | 0.47           | 1.19                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 57            | 14.90     | 0.47           | 1.19                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 58            | 2.10      | 0.07           | 0.03                | 0.028           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 59            | 12.80     | 0.41           | 0.90                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 60            | 12.80     | 0.41           | 0.90                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 61            | 1.30      | 0.08           | 0.07                | 0.028           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 65            | 4.19      | 0.27           | 0.64                | 0.024           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 66            | 8.71      | 0.57           | 2.50                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 67            | 2.58      | 0.17           | 0.26                | 0.026           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 68            | -9.03     | 0.59           | 2.67                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 69            | 1.28      | 0.08           | 0.07                | 0.028           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 71            | 2.30      | 0.15           | 0.21                | 0.026           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 72            | -16.80    | 1.09           | 8.43                | 0.019           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 73            | 3.84      | 0.25           | 0.55                | 0.024           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 75            | 13.03     | 0.85           | 5.27                | 0.020           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 76            | 41.29     | 1.31           | 7.85                | 0.018           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 77            | 26.03     | 0.83           | 3.34                | 0.019           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 78            | 1.43      | 0.09           | 0.09                | 0.028           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 80            | 4.81      | 0.31           | 0.83                | 0.023           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 81            | 9.74      | 0.63           | 3.07                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 82            | 7.68      | 0.50           | 1.98                | 0.022           | 0.00                  | 0.00      | Open   |

| Identificador do Trecho | Vazão LPS | Velocidade m/s | Perda de Carga m/km | Fator de Atrito | Taxa de Reação mg/L/d | Qualidade | Estado |
|-------------------------|-----------|----------------|---------------------|-----------------|-----------------------|-----------|--------|
| Tubulação 53            | 11.13     | 0.72           | 2.03                | 0.011           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 54            | 7.93      | 0.25           | 0.37                | 0.023           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 55            | 7.93      | 0.25           | 0.37                | 0.023           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 56            | 14.90     | 0.47           | 1.19                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 57            | 14.90     | 0.47           | 1.19                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 58            | 2.10      | 0.07           | 0.03                | 0.028           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 59            | 12.80     | 0.41           | 0.90                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 60            | 12.80     | 0.41           | 0.90                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 61            | 1.30      | 0.08           | 0.07                | 0.028           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 65            | 4.19      | 0.27           | 0.64                | 0.024           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 66            | 8.71      | 0.57           | 2.50                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 67            | 2.58      | 0.17           | 0.26                | 0.026           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 68            | -9.03     | 0.59           | 2.67                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 69            | 1.28      | 0.08           | 0.07                | 0.028           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 71            | 2.30      | 0.15           | 0.21                | 0.026           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 72            | -16.80    | 1.09           | 8.43                | 0.019           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 73            | 3.84      | 0.25           | 0.55                | 0.024           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 75            | 13.03     | 0.85           | 5.27                | 0.020           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 76            | 41.29     | 1.31           | 7.85                | 0.018           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 77            | 26.03     | 0.83           | 3.34                | 0.019           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 78            | 1.43      | 0.09           | 0.09                | 0.028           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 80            | 4.81      | 0.31           | 0.83                | 0.023           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 81            | 9.74      | 0.63           | 3.07                | 0.021           | 0.00                  | 0.00      | Open   |
| Tubulação 82            | 7.68      | 0.50           | 1.98                | 0.022           | 0.00                  | 0.00      | Open   |