

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Recuperação de Energia Hidráulica: uso de bombas
que operem como turbinas**

Letícia Vianna Gattulli

Lívio Ciscotto Brandão

Samila Silva Conde Edo

Prof. Orientador: Alexandre Silva de Lima

Prof. Coorientador: Julio Cesar O. Antunes

Rio de Janeiro

Novembro de 2018

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA

CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ

**Recuperação de Energia Hidráulica: uso de bombas
que operem como turbinas**

Letícia Vianna Gattulli

Lívio Ciscotto Brandão

Samila Silva Conde Edo

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Prof. Orientador: Alexandre Silva de Lima

Prof. Coorientador: Julio Cesar O. Antunes

Rio de Janeiro

Novembro de 2018

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

G263 Gattulli, Leticia Vianna

Recuperação de energia hidráulica : uso de bombas que operem como turbinas / Leticia Vianna Gattulli, Lívio Ciscotto Brandão [e] Samila Silva Conde Edo.—2018. xiv, 83f. + anexos : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 80-83

Orientador : Alexandre Silva de Lima

Coorientador : Julio Cesar O. Antunes

1. Engenharia mecânica. 2. Turbinas hidráulicas. 3. Bombas. 4. Geração distribuída de energia elétrica. I. Brandão, Lívio Ciscotto. II. Edo, Samila Silva Conde. III. Lima, Alexandre Silva de (Orient.). IV. Antunes, Julio Cesar O. (Coorient.). V. Título.

CDD 620.1

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador Alexandre Silva de Lima e ao coorientador Julio Cesar Antunes por todo o suporte que nos foi dado durante essa etapa.

Aos nossos colegas de trabalho e estágio que de alguma forma nos ajudaram a solucionar questões ligadas ao nosso projeto final, particularmente ao Kelison Pinheiro Magalhães que nos auxiliou na realização do projeto.

Aos nossos familiares por todo o apoio, amor, e paciência conosco durante esta caminhada, vocês são o nosso maior incentivo para a conclusão deste trabalho.

Aos nossos amigos que tornaram esse processo mais leve, em especial ao nosso amigo Samuel Junio dos Santos que nos ajudou na formatação e aos amigos que estão conosco desde o início da graduação e que hoje são como família 12GMEC.

Por fim, ao CEFET-RJ e a todos os docentes que durante a graduação nos possibilitaram ter bagagem para desenvolver e finalizar este projeto.

RESUMO

Em regiões de abastecimento de água pública, é comum a ocorrência de desníveis de altura, que dependendo do ponto do sistema de abastecimento, pode gerar um excesso de pressão na rede. Diante disto, o projeto se propõe a estabelecer uma solução alternativa para este quadro através do estudo da implantação de uma bomba que atue como turbina em pontos da rede de distribuição com excesso de carga, reduzindo as pressões, evitando desperdício de água pelos vazamentos e aproveitando parte da energia hidráulica para a geração de energia elétrica. Otimizando, em termos energéticos, um sistema de distribuição de água baseando-se no conceito de sustentabilidade ambiental, atentando também para os custos de implantação do projeto. O estudo será realizado através de métodos de seleção de uma BFT desenvolvidos pelos autores Viana (1987) e Chapallaz (1992), juntamente com uma simulação do sistema de abastecimento de água através do Software EPANET 2.0, que proverá os dados de entrada necessários para realizar os cálculos dos métodos. Tal simulação indicará através dos dados de vazão, pressão e perda de carga do projeto, os pontos ideais para a instalação da BFT. Em sua análise final o estudo não mostrou um resultado satisfatório em relação a redução de pressão, uma vez que, a maior parte das pressões praticadas continuou acima do limite da norma 12218/94 mesmo com a instalação da BFT. Porém, o projeto se mostrou viável devido ao seu baixo custo de implantação e a sua energia produzida, o que gera um curto período de retorno financeiro.

Palavras chaves: BFT, BFB, geração distribuída de energia, desníveis hídricos.

ABSTRACT

In water supply regions, it is common for height differences, which depend on the supply system, to generate an excess pressure in the network. Therefore, the project is proposed as an alternative to this data set through the implementation of a pump that serves as the starting point of the distribution network with excess of load, after the disclosure, avoiding the expense of water by the leaks and taking advantage of part of hydropower for a generation of electric energy. Optimization, in energy terms, of an environmental water distribution system, in the environmental sustainability environment, also for project implementation costs. The study will be carried out using BFT selection methods by authors Viana (1987) and Chapallaz (1992), along with the data filling system through EPANET 2.0 software, which will provide the input data required to perform the calculations of the methods. Such an indication indicates through the flow, pressure and pressure loss data of the project the ideal points for the installation of the BFT. In its final analysis, the method was not improved in relation to the pressure reduction, since most of the pressures have already been performed on the limit of standard 12218/94 even with a BFT installation. However, the project must be viable due to its low cost of implementation and the generation of energy, which generates a period of financial return.

Key words: PAT, PAP, distributed generation of energy, water gaps.

LISTA DE SIGLAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica.

BFB: Bomba funcionando como bomba- Elevatória.

BFT: Bomba funcionando como turbina- Gerador de energia.

CEDAE: Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro.

EPANET: Programa de computador licenciado como domínio público para simulação de sistemas de distribuição de água.

EPIA: European Photovoltaic Industry Association.

ETA: Estação de tratamento de água.

kW: Unidade de potência.

L/S: Litro por segundo.

m.c.a: Metro de coluna de água.

PAP: Pump as pump.

PAT: Pump as turbine.

RAwin: Software para abastecimento hídrico.

VRP: Válvula redutora de pressão.

WaterCAD: Software comercial de análise, modelação e gestão de rede.

W: unidade de potência no SI.

μ f: unidade de capacitância (ou capacidade elétrica) de um capacitor.

LISTA DE SÍMBOLOS

σ : coeficiente de Thoma [adimensional]

ρ : massa específica da água [kg/m³]

$p_1/\rho \cdot g$: pressão na entrada da turbina [m.c.a]

$p_2/\rho \cdot g$: pressão na saída da turbina [m.c.a]

τ : tensão no eixo da bomba [N/m²]

A: altitude local (nível de jusante) [m]

C: coeficiente de Hazen Willians [adimensional]

c_H : coeficiente de altura [adimensional]

c_Q : coeficiente de vazão [adimensional]

d: diâmetro do eixo [m]

D: diâmetro da seção considerada (entrada ou saída) [m]

g: aceleração da gravidade [m/s²]

f_{cH} : fator de correção de altura [adimensional]

f_{cQ} : fator de correção de vazão [adimensional]

H_s : altura geométrica de sucção [m]

H_b : altura referente à pressão barométrica ou atmosférica no nível de jusante [m]

H_{ob} : altura referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m]

H_p : altura da bomba que será utilizada como turbina [m]

H_f : perda de carga contínua [m.c.a]

- H (f-1): perda de carga contínua do trecho anterior [m.c.a]
- H_t: altura disponível no aproveitamento (da BFT) [m]
- J: Perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/km]
- η_G : rendimento do gerador síncrono [%]
- n_{qt} : rotação específica da BFT no Sistema Internacional [rpm]
- n_{qb} : rotação específica da bomba [rpm]
- n_{qt} : rotação específica da BFT [rpm]
- n_{ob} : velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [rpm]
- n_b : velocidade da bomba [rpm]
- n_t : rotação da BFT [rpm]
- n_{qA} : rotação específica da bomba ou da BFT no Sistema Internacional [rpm]
- n_{dt} : rotação de disparo da BFT [rpm]
- n_{nb} : rotação nominal da bomba [rpm]
- Ph : potência hidráulica [kW]
- P_{et}: potência de eixo da BFT [W]
- P_{max t}: pressão máxima admissível na BFT [m]
- P_{max b}: pressão máxima da bomba [m]
- P_n: Pressão no nó [m.c.a]
- P (n-1): Pressão no nó anterior [m.c.a]
- P_{G_saida}: potência de saída do gerador [W]
- P_{G_perdas}: perdas totais do gerador [W]
- p_M: perdas mecânicas do gerador [W]

p_F : perdas magnéticas do gerador [W]

p_C : perdas no cobre do gerador [W]

p_S : perdas suplementares do gerador [W]

Q : vazão turbinada [m^3/s]

Q_t : vazão disponível no aproveitamento (BFT) [m^3/s]

Q_b : vazão da bomba que será utilizada como turbina [m^3/s]

Q_{ob} : vazão referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m^3/s]

Q_n : vazão nominal da bomba [m^3/s]

Q_{bt} : vazão da BFT [m^3/s]

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

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

z_1 : cota de posição na entrada da BFT [m]

z_2 : cota de posição na saída da BFT [m]

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: TURBINA RADIAL.....	6
FIGURA 2: TURBINA AXIAL.....	6
FIGURA 3: TURBINA MISTA.....	6
FIGURA 4: BOMBA CENTRÍFUGA FUNCIONANDO COMO BOMBA.....	7
FIGURA 5: BOMBA CENTRÍFUGA FUNCIONANDO COMO TURBINA.....	7
FIGURA 6: CURVAS DE RECEPÇÃO DA BFB E DA BFT. (VIANA, 2002).....	8
FIGURA 7: SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA. FONTE: TSUTIYA (2006).....	17
FIGURA 8: PRESSÕES AO LONGO DE 24 HORAS. (FONTE: SOSNOSKI 2015).....	29
FIGURA 9: VAZÕES AO LONGO DE 24 HORAS. (FONTE: SOSNOSKI 2015).....	30
FIGURA 10: SIMULAÇÃO DE PRESSÕES PELO EPANET EM UM PERÍODO DE 24 HORAS. RETIRADO DE SOSNOSKI 2015.....	32
FIGURA 11: MAPA DE PRESSÕES E VAZÕES SIMULADO PELO EPANET. RETIRADO DE SOSNOSKI 2015.....	33
FIGURA 12: SISTEMA DE ABASTECIMENTO SIMULADO NO EPANET.....	36
FIGURA 13: LOCALIZAÇÃO DE NOVA FRIBURGO NO MAPA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. (FONTE: IBGE).....	41
FIGURA 14: RELEVO DO MUNICÍPIO DE NOVA FRIBURGO (FONTE: A VOZ DA SERRA).....	42
FIGURA 15: LOCALIZAÇÃO DE PIQUETE NO MAPA DE SÃO PAULO. (FONTE: IBGE).....	43
FIGURA 16: SISTEMA DE ABASTECIMENTO FICTÍCIO.....	44
FIGURA 17: PADRÃO DE CONSUMO 2.....	46
FIGURA 18: SIMULAÇÃO INICIAL DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO.....	47
FIGURA 19: CURVA DE PERDA DE CARGA DA BFT.....	50
FIGURA 20: PRESSÕES PRATICADAS NO NÓ 11 APÓS A INSTALAÇÃO DA BFT.....	51
FIGURA 21: SISTEMA DE ABASTECIMENTO APÓS A INSTALAÇÃO DA BFT.....	52
FIGURA 22: GRÁFICO DE PRESSÕES DO NÓ 8.....	53
FIGURA 23: GRÁFICO DE HT.....	54
FIGURA 24: VAZÕES PRATICADAS NO TRECHO 31.....	54
FIGURA 25: FAIXAS DE ROTAÇÃO ESPECÍFICAS DAS BOMBAS – VIANA (1987).....	56
FIGURA 26: COEFICIENTES DE VAZÃO E ALTURA – VIANA (1987).....	59
FIGURA 27: GRÁFICO DE PRÉ-SELEÇÃO DA BFT, ADAPTADO DE CHAPALLAZ (1992).....	62
FIGURA 28: ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DA BFT, ADAPTADO DE CHAPALLAZ (1992).....	65
FIGURA 29: COEFICIENTES DE ALTURA DE CHAPALLAZ (FONTE: AUTORES).....	66
FIGURA 30: COEFICIENTE DE VAZÃO DE CHAPALLAZ. (FONTE: AUTORES).....	67
FIGURA 31: CATÁLOGO COM A BOMBA SELECIONADA (FONTE: SCHNEIDER MOTOBOMBAS).....	69
FIGURA 32: BOMBA SELECIONADA (FONTE: SCHNEIDER MOTOBOMBAS).....	70
FIGURA 33: CURVA DE RENDIMENTO DA BOMBA KSB.....	70
FIGURA 34: CURVA DE RENDIMENTO DA BFT.....	71

FIGURA 35: GRÁFICO DA PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DA VAZÃO	72
FIGURA 36: ALTURA GEOMÉTRICA DE SUCCÃO POSITIVA. (FONTE: LIVRO VIANA)	73
FIGURA 37: ALTURA GEOMÉTRICA DE SUCCÃO NEGATIVA. (FONTE: LIVRO VIANA)	74
FIGURA 38: COEFICIENTE DE CAVITAÇÃO DAS TURBINAS, BOMBAS E BFT'S. – ADAPTADO DE CHAPALLAZ,1992.	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE BFTs	22
TABELA 2: CÁLCULOS PARA SELEÇÃO DA BFT PELOS MÉTODOS PROPOSTOS POR VIANA E CHAPALLAZ	25
TABELA 3: COEFICIENTE DE HAZEN WILLIAMS POR MATERIAL	35
TABELA 4: CÁLCULO DE PERDA DE CARGA ATRAVÉS DAS EQUAÇÕES DE HAZEN WILLIAMS.....	37
TABELA 5: VALORES PARA PERDA DE CARGA RETIRADOS DO EPANET.	37
TABELA 6: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE PERDA DE CARGA POR HAZEN WILLIAMS E EPANET.	37
TABELA 7: PRESSÃO CALCULADA ATRAVÉS DO MÉTODO DE HAZEN WILLIAMS.....	38
TABELA 8: PRESSÃO CALCULADA PELO EPANET	38
TABELA 9: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE PRESSÃO POR HAZEN WILLIAMS E EPANET.....	38
TABELA 10: DADOS OBTIDOS NO ENSAIO REALIZADO NA BFT COM CONTROLE DE VAZÃO A JUSANTE. (FONTE: [3] GUSTAVO MEIRELLES LIMA).....	50
TABELA 11: TABELA COM OS VALORES OBTIDOS	72
TABELA 12: INFORMAÇÕES DA BFT SELECIONADA.....	77

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	XIV
1) CAPÍTULO 1.....	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 OBJETIVO.....	2
1.4 JUSTIFICATIVA	3
1.5 METODOLOGIA E TRABALHO REALIZADO	3
1.6 ORGANIZAÇÃO.....	3
1.7 CONCEITOS	4
1.8 TURBOMÁQUINAS	4
1.9 TIPOS DE BOMBAS	4
1.10 TIPOS DE TURBINAS	5
1.11 BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA (BFT) E BOMBA FUNCIONANDO COMO BOMBA (BFB)...	7
1.12 MOTORES SINCRONOS E ASSINCRONOS	9
1.13 MODIFICAÇÕES A SEREM REALIZADAS NA BFT	11
1.14 BFTs IMPLANTADAS PELO MUNDO	12
1.14.1 LOCAIS COM BFT'S INSTALADAS.....	13
1.14.1.1 COMUNIDADE DE MAE WEI, TAILANDIA, 2008	13
1.14.1.2 COMUNIDADE DE HUAI KRA THING, TAILANDIA, 2006.....	14
1.14.1.3 COMUNIDADE DE KRE-KI, TAILANDIA, 2009.....	14
1.14.1.4 MICRO CENTRAL HIDRELETRICA DE AMBOOTIA, INDIA, 2004.....	15
1.14.1.5 SERRA DA MANTIQUEIRA, BRASIL, 2005.....	15
2) CAPÍTULO 2.....	16
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.2 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	16
2.2.1 MANANCIAL.....	17
2.2.2 CAPTAÇÃO	17
2.2.3 ESTAÇÃO ELEVATÓRIA	17
2.2.4 ADUTORAS	17
2.2.5 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA).....	18
2.2.6 RESERVATÓRIO	18
2.2.7 REDE DE DISTRIBUIÇÃO	18
2.2.8 VÁLVULA REDUTORAS DE PRESSÃO (VRP)	19

2.3	GERAÇÃO DE ENERGIA DISTRIBUÍDA E UTILIZAÇÃO DE BOMBAS COMO TURBINAS.....	19
2.3.1	UTILIZAÇÃO DE BOMBAS COMO TURBINAS	20
2.4	METODOLOGIAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE BFTs.....	22
3)	CAPÍTULO.....	26
3.1	PARÂMETROS.....	26
3.1.1	PRESSÃO.....	27
3.1.2	CONTROLE DE PRESSÃO.....	27
3.1.3	VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO.....	28
3.1.4	VAZÃO	28
3.1.5	RELAÇÃO PRESSÃO X VAZÃO E TEMPO DE OPERAÇÃO DA BFT	29
3.2	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	30
3.2.1	ESCOLHA DO SOFTWARE	30
3.2.2	SOFTWARES USADOS PARA MODELAGEM DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO	30
3.2.2.1	EPANET	32
3.2.2.2	VALIDAÇÃO EPANET	34
3.3	ESTUDO DE CASO.....	38
3.3.1	SUGESTÃO DE ÁREA PARA O ESTUDO.....	40
3.3.1.1	NOVA FRIBURGO	40
3.3.1.2	PIQUETE.....	42
3.3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
3.3.3	MODELAGEM DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO	44
3.3.4	SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO EPANET	45
3.3.4.1	SIMULAÇÃO INICIAL	46
3.3.4.2	SIMULAÇÃO – PÓS INSTALAÇÃO DA BFT	48
3.3.5	CÁLCULOS PRÉ DIMENSIONAMENTO DA BFT.....	52
3.3.5.1	ALTURA DISPONÍVEL NO APROVEITAMENTO (HT).....	53
3.3.5.2	VAZÃO DISPONÍVEL NO APROVEITAMENTO (QT).....	54
3.4	MÉTODOS DE SELEÇÃO DA BFT	55
3.4.1	MÉTODO VIANA	55
3.4.1.1	CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DO PROJETO: MÉTODO VIANA	57
3.4.2	MÉTODO CHAPALLAZ	61
3.4.2.1	CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DO PROJETO: MÉTODO CHAPALLAZ.....	62
3.4.3	CAVITAÇÃO.....	73
3.4.4	CUSTOS DA BFT.....	76
4)	CONCLUSÃO	78
4.1	TRABALHOS FUTUROS	78

5) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXO	84
A.1- CÁLCULOS MÉTODO VIANA	84
A.2 – CÁLCULOS MÉTODO CHAPALLAZ	85
A.3 – NÓ 8.....	91
A.4 – TRECHO 31.....	93
A.5 – DADOS DE VAZÃO	94
A.6 – PRESSÃO NA REDE X ALTURA DE QUEDA X VAZÃO	95

1) CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais abundante na Terra, com um volume estimado de 1,36 bilhão de quilômetros cúbicos, recobre 2/3 da superfície do planeta sob a forma de oceanos, calotas polares, rios e lagos. Além disso, pode ser encontrada em aquíferos subterrâneos, como o Guarani, no Sudeste brasileiro. A água também é uma das poucas fontes para produção de energia que não contribui para o aquecimento global (principal problema ambiental da atualidade) e é um recurso renovável. (ANEEL)

Apesar da água ser um recurso vital para a humanidade, sua distribuição não é uniforme em todos os pontos a nível nacional e mundial. No Brasil, existem regiões que não possuem um sistema de distribuição de água eficiente, com pressões em determinadas áreas acima do limite estabelecido pela NBR 12218 de 50 m.c.a. Com a finalidade de solucionar esse desnível energético, o trabalho se propõe a descrever, através de embasamento teórico e simulação em software uma solução alternativa para tal quadro.

A utilização de bombas que também operem como turbinas (BFT's) é a solução sugerida, que será abordada, para recuperar desníveis energéticos através da geração de energia distribuída. O uso de BFT's no Brasil está em fase de pesquisa, embora em outros países como EUA, Alemanha e França as BFT's já sejam instaladas substituindo as turbinas Pelton, Hélice e Francis, para gerar energia em micro estações de geração.

A implantação de bombas funcionando como turbinas é viável em pontos do sistema em que há excesso de energia e elevadas pressões. A BFT torna-se uma solução importante pois a mesma irá aproveitar a energia local, pois em caso de utilização de uma válvula redutora de pressão, que tem como finalidade uniformizar e controlar a pressão da rede de distribuição, a energia seria dissipada sem qualquer aproveitamento.

As unidades de bomba padrão de pequena e média potência, quando em sentido inverso, apresentam vantagens econômicas em relação às turbinas convencionais quanto aos gastos para

que ocorra a geração de energia. Bombas são produzidas em série e possuem grande disponibilidade e variedade de bombas no mercado à preços mais acessíveis se comparados aos de uma turbinas convencional que muitas vezes é fabricada sob medida o que encarece o seu preço como produto final.

1.2 MOTIVAÇÃO

O tema do projeto é proveniente do estágio de um dos integrantes do grupo do projeto final, na empresa de distribuição de Águas de Niterói, onde o mesmo vivenciou ao longo do seu tempo de trabalho a discrepância de abastecimento de água em determinados pontos de sistemas dutoviários. A partir disso, deu-se início ao projeto final com ênfase em gerar uma solução alternativa para melhorar o aproveitamento energético de uma área de estudo determinando os melhores pontos de instalação de uma BFT. Através do estudo teórico e da simulação em software para determinar o melhor tipo de bomba para atuar em reverso com a finalidade de tornar o sistema de distribuição de abastecimento de água potável mais sustentável possível.

1.3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo, realizar um estudo para definir o melhor tipo de bomba de fluido, para atuar como turbina, entre as existentes, sendo elas: Bombas Intermitentes (bombas de deslocamento positivo) e bombas contínuas (bombas roto-dinâmicas ou turbo), que terá a melhor relação de potência, rendimento e eficiência quando utilizadas em seu sentido inverso operando como uma turbina para geração de energia hidrelétrica, ou seja, determinar o tipo de bomba que funcione melhor em reverso. Além de realizar uma simulação no software EPANET 2.0, do sistema de geração nos melhores pontos de pressão e vazão da BFT a ser instalada. Definindo assim, através dos dados de aproveitamento do local de instalação, a melhor família e modelo de bomba a serem utilizados visando obter ganho energético. Por fim, será realizado um estudo de viabilidade do projeto de implementação de uma BFT.

1.4 JUSTIFICATIVA

O tema foi escolhido com a finalidade de otimizar, em termo energético, um sistema de abastecimento de água potável. Com a finalidade de desenvolver um estudo de caso sobre como melhorar o aproveitamento de água nos pontos selecionados do local de estudo. Determinar, através de embasamento teórico e cálculos matemáticos, qual o melhor tipo de bomba e suas especificações necessárias para que atuem em sentido inverso como turbinas de modo satisfatório visando recuperar desníveis energéticos através da geração de energia com a utilização de BFT. Tornando o sistema de distribuição de água mais homogêneo.

1.5 METODOLOGIA E TRABALHO REALIZADO

A metodologia usada nesse trabalho segue basicamente cinco etapas: estudo de trabalhos e artigos na área do tema, que contempla o embasamento teórico necessário para a elaboração do projeto, definição do modelo de bomba a ser usada em sentido inverso, levantamento de dados e determinação das especificações da bomba, desenvolvimento de cálculos e simulações, através de software, que comprovem o bom funcionamento da bomba em relação ao seu rendimento, potência, eficiência, posteriormente estudo de viabilidade do projeto e por fim as conclusões obtidas.

1.6 ORGANIZAÇÃO

O capítulo 1 – “Introdução” – Aborda as considerações iniciais deste trabalho, além das razões pelas quais o presente tema foi selecionado e a metodologia de trabalho utilizada a fim de concluí-lo.

O capítulo 2 – “Revisão Bibliográfica” – Contempla o embasamento teórico para o desenvolvimento do trabalho, a base de pesquisa para o projeto de uma BFT, que revela as contribuições científicas de autores sobre o tema.

O capítulo 3 – “Estudo de caso, Simulação no Software e Análise de Viabilidade” - Detalha o caso a ser estudado no projeto e a análise para seleção do modelo de bomba ideal com o melhor rendimento possível. Além de apresentar o software selecionado para realizar a

simulação e os resultados encontrados para o tipo de bomba selecionada. Por fim, é realizada uma análise de viabilidade econômica de implementação do sistema de geração de energia utilizando uma BFT.

O capítulo 4 –“Conclusão e Trabalhos futuros” - Expõe as considerações finais do projeto e sugestão para trabalhos futuros acerca do tema.

1.7 CONCEITOS

1.8 TURBOMÁQUINAS

As turbomáquinas hidráulicas são máquinas comumente utilizadas para o transporte de fluidos em dutos. 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 atuar como Bomba ou Turbina.

1.9 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 controle. O fluido não se encontra confinado na bomba em momento algum. Tem funcionamento baseado em

uma criação de zona de baixa pressão e uma outra de alta pressão. Utilizada para o transporte de fluidos.

- 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 direção que seu deslocamento. O líquido preenche o espaço predefinido no interior da bomba e é excluído com a ação do mecanismo.

Para esse escopo de projeto o principal tipo de bombas a se estudar serão as turbobombas ou bombas centrífugas. Como descrito anteriormente, o projeto se baseia em BFTs e as bombas volumétricas não podem ser aproveitadas como turbinas.

1.10 TIPOS DE TURBINAS

É comum classificar as turbinas em três tipos distintos conforme a direção de escoamento do fluido em relação ao propulsor.

- Turbinas Radiais - A movimentação do fluido ocorre do centro para a periferia do rotor, com sentido perpendicular (normal) ao eixo de rotação. Como apresentado na figura 1.
- Turbinas Axiais - O movimento do fluido ocorre paralelo ao eixo de rotação. Como apresentado na figura 2.
- Turbinas Mistas - O movimento do fluido ocorre na direção inclinada (diagonal) ao eixo de rotação. Como apresentado na figura 3.

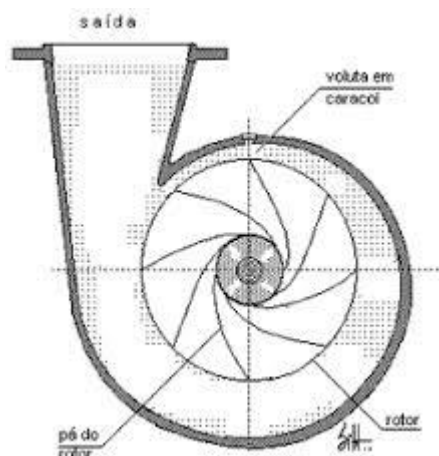


Figura 1: Turbina Radial

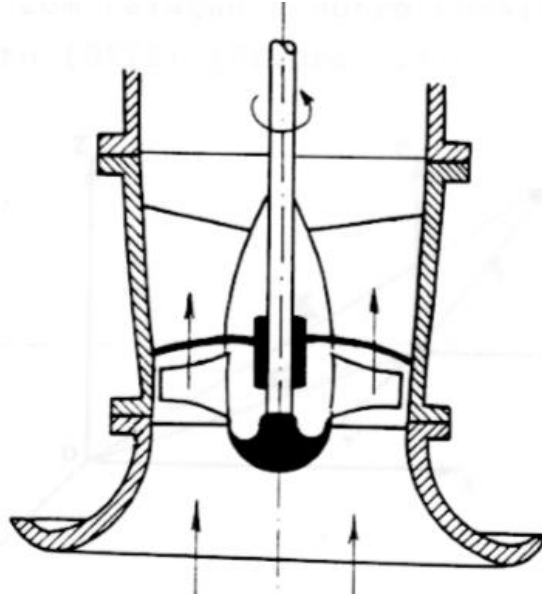


Figura 2: Turbina Axial

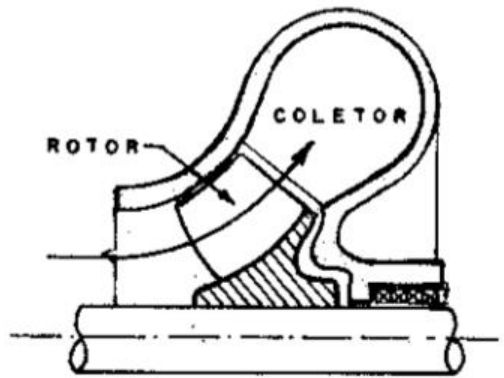


Figura 3: Turbina Mista

1.11 BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA (BFT) E BOMBA FUNCIONANDO COMO BOMBA (BFB)

O sentido do fluxo de escoamento da água é invertido para que uma bomba centrífuga opere como turbina. Sendo assim, o sentido de rotação é invertido. As figuras 4 e 5 exemplificam a bomba centrífuga funcionando como bomba e como turbina respectivamente.

Na figura 4, operando como bomba, o líquido entra em sucção à baixa pressão, transforma a energia de velocidade em pressão pelo rotor e sai pela descarga. Na figura 5, operando como turbina, o líquido entra com energia de pressão, aciona o rotor em reverso e sai com baixa pressão.

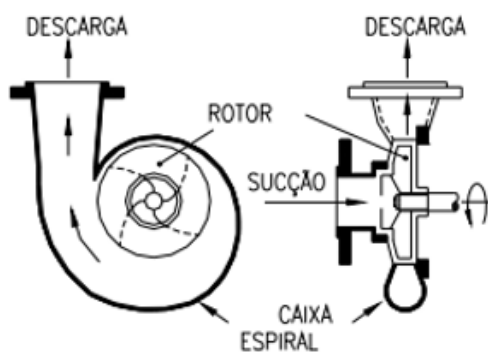


Figura 4: Bomba Centrífuga funcionando como bomba.

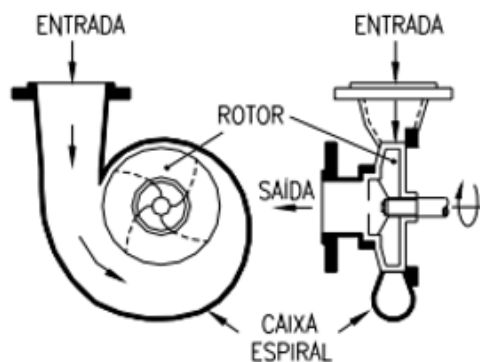


Figura 5: Bomba centrífuga funcionando como turbina

Para que o rendimento da bomba operando como turbina seja equivalente ao da bomba operando como bomba, é preciso que a altura e a vazão da BFT sejam maiores que os valores de altura e vazão da BFB, para uma mesma rotação. Tais aumentos são fundamentais para a compensação das perdas internas da máquina, pela inversão do fluxo. O que resulta em um aumento da potência do eixo quando a bomba estiver operando como turbina. Na figura 6 temos as curvas de recepção da BFB e da BFT, ambas operando com rotação constante.

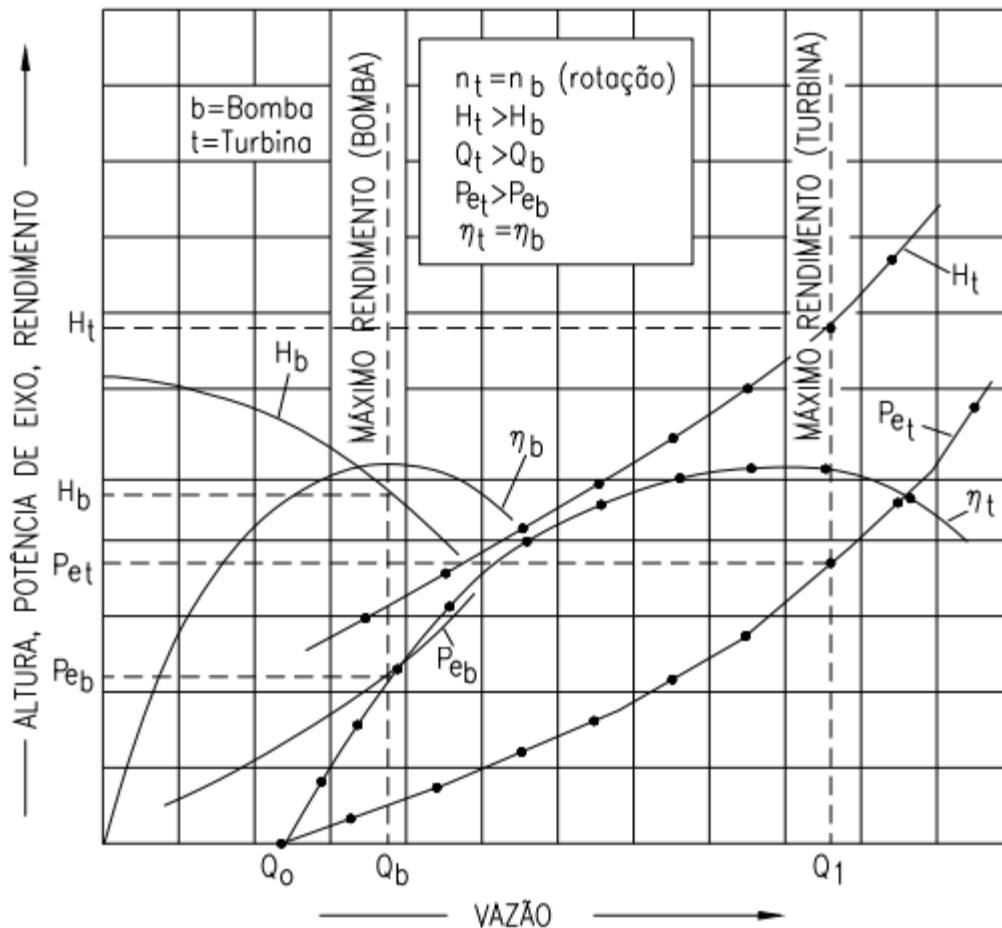


Figura 6: Curvas de recepção da BFB e da BFT. (VIANA, 2002)

As curvas estão normalizadas pelos valores de rendimento, vazão, altura (ou queda) e potência no ponto de melhor rendimento. Observa-se que o melhor ponto do rendimento da BFT se situa onde a altura é H_t e a vazão é Q_t e são maiores que os correspondentes para a bomba. O rendimento máximo é o mesmo para a BFT e para a BFB. A diferença é que a BFT apresenta diferenças pequenas para um faixa maior de valores de vazão, a curva característica de rendimento está mais suave.

As BFT's apresentam vantagens e desvantagens em relação às turbinas. Como pontos positivos podemos citar o aproveitamento do potencial hídrico local, baixos custos de fabricação e de mão de obra uma vez que as bombas são fabricadas e utilizadas em larga escala. Em caso de manutenção não é necessária mão de obra especializada, as peças que compõem as bombas são encontradas com facilidade no mercado e por fim para a geração de pequenas demandas a instalação de uma BFT pode ser considerada simples em relação à de uma turbina convencional. Como desvantagens as BFT's apresentam um rendimento menor do que o das turbinas, além de não admitirem variações de carga como as turbinas. AS BFT's possuem restrições em seu funcionamento à frequência constante. Como não possuem um regulador de velocidade, as mesmas não conseguem manter a frequência sozinhas.

1.12 MOTORES SINCRONOS E ASSINCRONOS

Para a geração final de energia a BFT deve trabalhar em conjunto com algum tipo de gerador, podendo ser do tipo síncrono ou assíncrono. Ambos os tipos são máquinas rotativas capazes de transformar energia mecânica em energia elétrica.

Em especial podemos escolher o gerador síncrono para essa operação. Quando comparados com os geradores assíncronos possuem custo mais elevado, porém o seu melhor rendimento justifica a escolha do equipamento. Estima-se que um motor assíncrono necessita de cerca de 10% de velocidade a mais para gerar a mesma tensão de um motor síncrono devido ao escorregamento de suas partes móveis.

Segundo Danilo (2010) a eficiência dos geradores pode ser medida através da segregação de suas perdas. As perdas podem ser divididas em dois grupos, perdas a vazio e perdas em curto-circuito.

As perdas a vazio são compostas por perdas mecânicas provenientes do atrito das partes móveis e perdas magnéticas. As perdas magnéticas são compostas por perdas por histerese e por correntes parasitas.

As perdas em curto circuito são compostas pelas perdas no cobre e perdas suplementares. As perdas no cobre, conhecidas como perdas Joule, são oriundas da passagem de corrente pelos condutores da máquina. Já as perdas suplementares, são consideradas as perdas que de fato reduzem o rendimento do conjunto porém não são identificadas como os três tipos de perdas anteriores.

Dessa maneira, o rendimento do gerador síncrono pode obtido através da equação 1.1 e as perdas totais do gerador podem ser determinadas através da equação 1.2.

$$\eta_G = \frac{P_{G_saida}}{P_{G_saida} - P_{G_perdas}} \quad (1.1)$$

$$P_{G_perdas} = p_M + p_F + p_C + p_S \quad (1.2)$$

Em que:

η_G : rendimento do gerador;

P_{G_saida} : potencia de saída do gerador;

P_{G_perdas} : perdas totais do gerador;

p_M : perdas mecânicas;

p_F : perdas magnéticas;

p_C : perdas no cobre;

p_S : perdas suplementares.

É muito importante que o rendimento do gerador síncrono seja medido, porém como não foi possível coletar dados suficientes para o seu cálculo, não foi considerado para o projeto.

1.13 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:

$$P_{maxt} \leq 1,5 \cdot P_{maxb}$$

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 projetada para operar em uma determinada rotação, que se for superada, poderá causar danos no equipamento girante. Viana (1987), obteve experimentalmente uma equação que permite o cálculo da rotação de disparo.

$$ndt \leq 1,53 \cdot nnb$$

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.

$$\tau_t = 0,81 \cdot \left(\frac{P_{et}}{n_t \cdot d^3} \right)$$

Em que:

τ_t : tensão no eixo da bomba [N/m²];

P_{et} : potência de eixo da BFT [W];

n_t : 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.

1.14 BFTS IMPLANTADAS PELO 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 elétrica é a iluminação noturna, 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. Nesse esquema, a BFT seria projetada para rodar usando o fluxo disponível na época mais seca do ano. Em lugares onde só a iluminação é necessária, durante o dia, a água utilizada no abastecimento do sistema micro elétrico, pode ser utilizada para a irrigação ou operação de moinho de água para a moagem do milho.

- Energia elétrica para fazendas remotas.

BFT's foram implantadas com sucesso em uma fazenda remota no Reino Unido com o objetivo de fornecimento de energia elétrica. 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 esse já utilizado na Tanzânia.

1.14.1 LOCAIS COM BFT'S INSTALADAS

1.14.1.1 COMUNIDADE DE MAE WEI, TAILANDIA, 2008

Localizada no distrito de Tha Song Yang, província de Tak, no norte da Tailândia, com população em torno de 300 habitantes. O projeto foi implantado em fevereiro de 2008, com o objetivo de abastecer uma escola primária da comunidade, composta por: iluminação, um microcomputador e um DVD player.

O sistema é composto por: um motor de indução trifásico de 4 kW funcionando como gerador e uma BFT. A máquina elétrica é magnetizada por três capacitores de 70 μ F. A demanda do sistema gira em torno de 600 W e a sua potência máxima é 3,1 kW, sendo um sistema de velocidade constante. O excesso de energia é dissipado em uma carga resistiva, acionada por um controlador.

Projeto executado pelo grupo *Border Green Energy Team* que possibilitou a oferta de energia elétrica para a escola. Sendo assim, os estudantes passaram a ter melhor qualidade de estudo com a iluminação do local e acesso a vídeos educativos. Os dados administrativos da escola passaram a ser armazenados em um microcomputador, melhorando assim a gestão da escola como um todo.

1.14.1.2 COMUNIDADE DE HUAI KRA THING, TAILANDIA, 2006

Comunidade localizada no distrito de Mae Ramat, província de Tak. Região em que não existe a possibilidade de receber extensão elétrica convencional por ser um local pertencente ao parque nacional, a sua população é constituída por refugiados da Birmânia. São aproximadamente 200 pessoas, que habitam 46 casas, além de uma escola de pequeno porte com dois professores, duas igrejas, uma clínica médica e um centro comunitário.

O projeto também foi executado pelo grupo *Border Green Energy Team* e abastece, através de um sistema de distribuição monofásico, a uma escola, o centro comunitário, duas igrejas e a casa do líder da comunidade.

1.14.1.3 COMUNIDADE DE KRE-KI, TAILANDIA, 2009

Comunidade localizada no distrito de Tha Song Yan, província de Tak. A região é localizada próxima ao Parque Nacional Moei Mae e possui população constituída predominantemente de budistas Karen, que ocupam aproximadamente 49 casas. A maioria dos moradores são agricultores de subsistência.

A comunidade dispõe um templo budista, uma escola e uma clínica. Grande parte das casas e instalações são alimentadas por pequenos sistemas de energia solar fotovoltaica, instaladas pelo próprio governo tailandês. Muitos estão funcionando bem, porem alguns estão com problemas devido à falta de manutenção e orientação.

O sistema é composto por: um motor de indução trifásico e uma BFT. A magnetização do gerador é fornecida por capacitores de 40 μ f. O conjunto motobomba funcionando como grupo gerador disponibiliza uma potência elétrica de aproximadamente 1 -A.

A clínica, o templo, tomadas de força da escola e pontos de iluminação são alimentados por um sistema de distribuição monofásico. O excesso de energia é consumido em uma carga resistiva. Outro projeto executado pelo grupo *Border Green Energy Team*.

1.14.1.4 MICRO CENTRAL HIDRELETRICA DE AMBOOTIA, INDIA, 2004

Projeto assumido inicialmente pela Sahyadri Energy Systems Pvt. Ltd, que é uma empresa de energia renovável da Índia. O cofundador da empresa é o autor do projeto, que foi realizado em parte em seu doutorado Singh (2005). Futuramente, o Instituto de Gestão de Recursos Hídricos e Engenharia Rural, da Universidade de Karlsruhe, da Alemanha, entrou no projeto.

Localizado em um jardim de chás nas colinas de Darjeeling. O local possui uma micro central hidrelétrica construída em 1900, com uma turbina Pelton, que não estava mais em operação há muitos anos.

A necessidade de carga da fábrica de chá é estipulada da seguinte forma: potência elétrica de pico de 100 kW (com duas horas de duração), carga intermediária de 70 a 75 kW, carga base de 50 kW continuamente e uma garantia de 20 kW durante os períodos de vazão mínima.

Para que essa necessidade seja atendida, foi projetado um sistema de múltiplas BFT's. Nesse sistema, três BFT's foram conectadas por correias a um único gerador de eixo prolongado. Duas fornecem 50 kW e uma fornece 20 kW. Podendo-se combinar 2 BFT's de 50 kW produzindo 100 kW ou 1 BFT de 50 kW com 1 BFT de 20 kW produzindo de 70 a 75 kW.

1.14.1.5 SERRA DA MANTIQUEIRA, BRASIL, 2005

Projeto realizado por um Convênio de cooperação técnica-financeira, entre o Ministérios das Minas e Energia e a Universidade Federal de Itajubá. O projeto se baseia na reforma da micro central em Delfim Moreira-MG, na Serra da Mantiqueira. O grupo gerador de energia elétrica é um conjunto de motobomba.

Pela simulação da condição mais crítica e pelo levantamento dos equipamentos existentes, o sistema tem demanda máxima de 38 kW. O sistema possui capacidade nominal de

43 kW. A micro central é composta por: um motor de indução trifásico de 45 kW funcionando como gerador e uma bomba funcionando como turbina.

2) CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados uma série de conceitos e metodologias fundamentais para a realização e entendimento deste trabalho. Além de informações e dados obtidos em artigos, dissertações e livros que serviram como embasamento teórico e auxiliaram na determinação dos parâmetros necessários para desenvolver o projeto.

2.2 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Segundo Gomes (2009), um sistema de abastecimento de água é composto por equipamentos, obras e serviços capazes de atender com qualidade e quantidade as necessidades domésticas industriais e públicas de consumo da população.

De acordo com Tsutiya (2006) os sistemas de abastecimento são compostos por Manancial, Captação, Estação Elevatória, Adutora, Estação de Tratamento de Água (ETA), Reservatório e Rede de Distribuição. A Figura 7 ilustra um sistema de abastecimento de água.

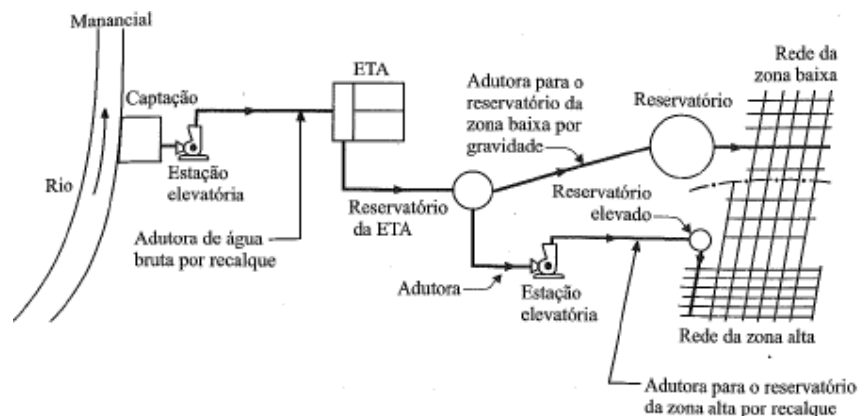


Figura 7: Sistema de Abastecimento de Água. Fonte: Tsutiya (2006)

2.2.1 MANANCIAL

Tsutiya (2006) descreve os mananciais como o corpo de água superficial ou subterrâneo, do qual é retirada a água para o abastecimento. Os mananciais podem ser de superfícies como rios, córregos, lagos e outros, como também podem ser de subsolo.

2.2.2 CAPTAÇÃO

De acordo com Tsutiya (2006) a captação se resume ao conjunto de estruturas e dispositivos construídos ou montados junto ao manancial, para a retirada de água destinada ao sistema de abastecimento.

2.2.3 ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

As estações elevatórias são constituídas por conjuntos de motobomba com a função de recalcar a água bruta ou tratada para a próxima unidade do sistema de abastecimento. A maior parte do consumo de energia dos sistemas de abastecimento é proveniente das elevatórias. Segundo Lima (2013) em alguns casos, devido a distância ou a topografia, é necessária uma estação elevatória intermediária, conhecida como *booster*, onde a bomba normalmente é instalada em linha na rede de distribuição, aproveitando assim a pressão da própria rede.

2.2.4 ADUTORAS

Sarzedas (2009) define que a função da adutora é transportar uma grande quantidade de água ao longo de grandes distâncias, em geral, entre as principais instalações do sistema de abastecimento. Sendo elas:

- Captação e ETA,
- ETA e reservatórios
- Reservatórios e rede de distribuição entre outras combinações.

A adutora não é responsável pela distribuição de água até o consumidor final.

2.2.5 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)

A estação de tratamento de água é a unidade responsável pelo tratamento da água bruta coletada pela captação até as condições ideais para o consumo definidas pelo Ministério da Saúde através da Portaria n° 518 (2004).

2.2.6 RESERVATÓRIO

Segundo Tsutiya (2006), reservatório é o elemento do sistema de distribuição de água destinado a regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição. De acordo com Lima (2013) os reservatórios também têm a função de atender as variações de consumo horário, a fim de garantir que não ocorra falta de água.

2.2.7 REDE DE DISTRIBUIÇÃO

De acordo com Tsutiya (2006), a rede de distribuição é a parte do sistema de abastecimento de água formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas. De acordo com a NBR 12218 que trata de projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público, a pressão máxima na rede não pode ultrapassar 500 kPa (cerca de 50 m.c.a) e a pressão mínima deve ser de 10 m.c.a.

A rede de distribuição é o componente do sistema de abastecimento que mais sofre com os problemas de pressão. A pressão elevada acarreta no rompimento de tubulações e em perdas físicas de água, gerando prejuízo para a concessionária. Para o controle das altas pressões na rede é comum o uso de válvulas redutoras de pressão (VRP).

2.2.8 VÁLVULA REDUTORAS DE PRESSÃO (VRP)

Segundo Lima (2013), as válvulas redutoras de pressão são utilizadas para reduzir a pressão à jusante independente da pressão a montante. O seu funcionamento consiste no fechamento de uma válvula através do acionamento de um dispositivo de controle quando a pressão a jusante for elevada, aumentando assim a perda de carga localizada no sistema e reduzindo a pressão ao valor determinado.

A utilização das válvulas redutoras de pressão se mostra eficiente em relação a diminuição da pressão a montante. Uma alternativa com o intuito de reduzir a pressão e gerar energia no processo é a utilização de bombas funcionando como turbinas (BFT).

2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA DISTRIBUÍDA E UTILIZAÇÃO DE BOMBAS COMO TURBINAS

Devido às questões econômicas e ambientais o setor energético passou a procurar novas formas de produção de energia. Uma das alternativas encontradas foi realizar a produção em pequena escala, próxima ao local de consumo. Este tipo de produção é conhecido por micro geração ou geração distribuída.

No Brasil, o desenvolvimento do setor elétrico se baseia na centralização da produção de energia em grandes usinas. O crescimento da população exige uma demanda cada vez maior de produção de energia elétrica. Em sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, os gastos com transmissão e perdas de energia envolvidos no processo são relevantes. Com a finalidade de reduzir impactos ambientais e custos provenientes da construção de novas usinas hidrelétricas, a implantação de micro centrais de geração de energia distribuída desponta como uma alternativa de produção energética, com menos perdas de forma sustentável.

A geração de energia distribuída aproveita o potencial hídrico local, ocorre próxima a carga e o excedente da produção pode ser devolvido a rede de produção, reduzindo assim, perdas energéticas e custos de transmissão de energia elétrica. Além de entregar ao consumidor energia elétrica de qualidade aliando economia financeira e consciência ambiental. Por se tratar de um

microsistema de geração, a produção de energia passaria a ser feita por operadores independentes e consumidores finais, podendo ou não ser ligada diretamente à rede.

No mundo, a maior parte da aplicação de geração de energia distribuída está ligada a energia solar com a utilização de painéis fotovoltaicos. Em diversos países do mundo os consumidores recebem incentivos para instalar painéis em suas casas para converter energia solar em elétrica de forma sustentável. China, Europa e América estão no topo da lista da evolução de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, EPIA (2012). Em Portugal, também é incentivada a geração distribuída eólica, convertendo a força dos ventos em energia elétrica (Nascimento, 2008).

Os principais benefícios da geração distribuída, segundo Rodríguez (2002) e Moreira (2010) são listados abaixo:

- O consumidor poderá reduzir seus gastos mensais, caso a eletricidade gerada tenha um custo menor do que o de suprimento convencional de energia elétrica;
- Ideal para locais com baixa densidade populacional ou de difícil acesso da rede elétrica;
- Redução das perdas nas linhas de transmissão e distribuição;
- Melhor planejamento de expansão da oferta de energia;
- Aumento da confiabilidade no suprimento de energia elétrica;
- Redução dos impactos ambientais;
- Aumento da autonomia e do poder de decisão dos consumidores individuais e das comunidades locais.

2.3.1 UTILIZAÇÃO DE BOMBAS COMO TURBINAS

A BFT aproveita o potencial renovável de um local e converte a energia potencial da queda d'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 é uma alternativa de geração de energia distribuída no Brasil com redução de perdas, baixo custo e sustentabilidade. ANEEL (2012).

De acordo com Ricardo (2007) a grande vantagem da utilização de bombas funcionando como turbina é seu custo reduzido, que é de 2 a 3 vezes inferior aos custos de uma turbina convencional, já que são produzidas em série devido à sua ampla utilização em diversos setores, como saneamento e irrigação. Por esta razão, países como EUA, Alemanha e França vêm utilizando bombas e motores para gerar energia elétrica em pequenos aproveitamentos (Viana et al, 2004).

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

- Maior disponibilidade de peças de reposição;
- São simples e robustas;
- Possuem uma ampla faixa de operação, podendo ser aplicadas a diferentes tipos de aproveitamentos;
- Rapidez no fornecimento do equipamento;
- Instalação mais simples;
- A bomba e o motor podem ser adquiridos em conjunto, com acoplamento direto, reduzindo as perdas na transmissão de potência através de correias, por exemplo.

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

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

Para que o rendimento na operação como turbina seja o mesmo rendimento da operação como bomba, é necessária a correta seleção do equipamento. Tal seleção é realizada com base nos dados de vazão e altura de queda do aproveitamento. Além de realizar modificações na BFT com a finalidade de evitar danos ao equipamento durante o seu funcionamento devido as restrições citadas acima.

2.4 METODOLOGIAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE BFTS

Segundo Danilo (2010), os métodos de seleção de BFT's ainda possuem certo grau de imprecisão, prejudicando de certa forma a adesão a essa tecnologia. As pesquisas em andamento sobre o tema estão majoritariamente voltadas para o desenvolvimento e aprimoramento das metodologias de seleção.

Algumas das metodologias desenvolvidas podem ser citadas de acordo com a Tabela 1 que mostra a razão entre a vazão do aproveitamento (Q_t) e vazão da BFT (Q_b) assim como a razão entre a altura de queda do aproveitamento (H_t) e altura da BFT (H_b).

Tabela 1: Métodos para caracterização de BFTs

Método	Q_t/Q_b	H_t/H_b
Sharma (1985)	$\frac{1}{nb^{0.8}}$	$\frac{1}{nb^{1.2}}$
Willians (1982)*	$fcQ = \frac{wt}{wb}$	$fcH = \left(\frac{wt}{wb}\right)^2$
Viana (1987)	$\frac{1}{cQ}$	$\frac{1}{cH}$
Chapallaz (1992)	cQ	cH
Stepanoff (1957)	$\frac{1}{nb}$	$\frac{1}{nt \times nb}$
Childs (1963)	$\frac{1}{nb^2}$	$\frac{1}{nb^2}$

Alatorre-Frenk (1994)	$\frac{0,85 \times nb^5 + 0,385}{2 \times nb^{9,5} + 0,205}$	$\frac{1}{0,85 \times nb^5 + 0,385}$
Schmiedl (1988)	$1,4 - \frac{2,5}{(nb^{0,5} \times nt^{0,5})^{0,5}}$	$1,5 - \frac{2,4}{(nb^{0,5} \times nt^{0,5})}$
Grover (1984)	$2,379 - 0,0264 \times Nqt$	$2,693 - 0,0229 \times Nqt$
Hergt (1984)	$1,3 - \frac{1,6}{Nqt - 5}$	$1,3 - \frac{6}{Nqt - 3}$
Gopalakrishnan (1986)	$\frac{1}{nb}$	$\frac{1}{nb^2}$
Cohrs (1997)	$1 + \frac{1}{\left(\frac{nb \times u^{12}}{Hb \times p \times g}\right) - 1}$	$1 + \frac{1}{\frac{\left(\frac{nb \times u^{12}}{Hb \times p \times g}\right) - 1}{nt \times nb}}$

*O modelo de Williams é semelhante ao modelo de Sharma, porém, para diferentes velocidades operacionais aplicam-se os fatores de correção fcQ e FcH para a vazão e altura, respectivamente.

A primeira e menos precisa metodologia de caracterização de uma BFT foi desenvolvida em 1961 por Kittredge. O estudo se baseava na premissa de que duas bombas de mesmas características adimensionais teriam comportamento similares como turbina. Para isso foram avaliadas 4 bombas em modo turbina e modo bomba.

Posteriormente em 1980 foi desenvolvido pela Acre American Inc. um programa que comparava as características conhecidas e previamente inseridas no mesmo de uma bomba operando como bomba e de uma bomba operando como turbina com as características da bomba em análise estimando assim o seu comportamento como turbina. Este método é baseado no método de Kittredge, porém a diferença está na quantidade de bombas utilizadas como base.

Em 1992, Williams analisou os trabalhos de Kittredge e da Acre American Inc. e concluiu que o trabalho de Kittredge necessitava de correções. Após as devidas correções sugeridas o trabalho de Kittredge alcançava uma maior confiabilidade.

Baseado em relações geométricas da máquina e em características de escoamento e relacionando o desempenho em modo bomba e modo turbina, Williams desenvolveu o método “Area Ratio”. Esse método ainda é um ponto de controvérsia entre os pesquisadores, mesmo após a demonstração de sua eficiência.

O trabalho Chors tomou como partida equações desenvolvidas para pressão, potência e eficiência. Seu método alcançou uma boa proximidade entre os valores medidos e calculados. Posteriormente, foi realizado um trabalho em parceria com a University of Hamburg-Harburg e Tyssen no qual foi desenvolvido um programa computacional para certos tipos de bomba.

Baseados em Sharma e Williams, Lopes e Holdes no início dos anos 2000 elaboraram uma metodologia para seleção de BFT. Esse trabalho leva em consideração como variáveis o tipo de sistema e o escoamento do gerador assíncrono.

Após comparar estudos laboratoriais com diversos modelos de caracterização de BFTs, Singh, em 2005 concluiu que a velocidade específica da bomba era fundamental para o desempenho de cada metodologia.

Entre as metodologias de seleção de BFT mais utilizados em pesquisas e para fins acadêmicos estão os métodos desenvolvidos no Brasil por Nogueira (1990), Viana (1987) e desenvolvidos na Europa por Chapallaz (1992).

Os resultados destes trabalhos são os coeficientes de altura e vazão obtidos experimentalmente que relacionam a altura e a vazão da BFT e da BFB em função da rotação específica da bomba.

Conhecidos os dados de aproveitamento disponíveis, ou seja, vazão e altura de queda do local de instalação e a rotação da bomba, encontra-se a rotação específica da BFT, com a rotação específica, encontram-se os coeficientes de altura e vazão da BFT graficamente (análise da curva), com os valores encontrados para os coeficientes, calculam-se a altura e vazão da BFT e por fim são realizados ajustes na altura e vazão da bomba a fim de considerar as rotações encontradas nos catálogos.

Os dois métodos são semelhantes, exceto pelo fato de que Chapallaz (1992) leva em consideração o rendimento da bomba nas curvas utilizadas na determinação dos coeficientes, e Viana (1987) utiliza o rendimento da bomba retirado do catálogo do fabricante.

Outras diferenças entre os autores devem ser levadas em consideração no momento de escolha da metodologia a ser adotada para a seleção da BFT. No método desenvolvido por Viana (1987) os coeficientes de vazão e altura da bomba são determinados graficamente, pela análise das curvas, que são compostas por bombas com limitações de rotação específica até 200 rpm, ou seja, rotores radiais ou centrífugos. Diferente do método proposto por Chapallaz (1992), que apresenta resultados desde as bombas radiais ou centrífugas, mistas e axiais abrangendo toda a faixa de rotação específica e trabalha com a potência hidráulica desde 1kW até 1000kW, diferentemente de Viana (1987) que limita a potência em 50kW, que corresponde à potência de uma micro central hidroelétrica.

Tabela 2: Cálculos para seleção da BFT pelos métodos propostos por Viana e Chapallaz

	Viana	Chapallaz
Altura e vazão da bomba	$H_b = c_H \cdot H_t$ $Q_b = c_Q \cdot Q_t$	$H_b = \frac{H_t}{c_H}$ $Q_b = \frac{Q_t}{c_Q}$
Rotação específica da BFT	$n_{qA} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{3/4}} \cdot 10^3$	$n_{qt} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{3/4}}$
Rotação específica da bomba	$n_{qA} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{3/4}} \cdot 10^3$	$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89}$
Estimativa de vazão da bomba	-	$Q_{nb} = \frac{Q_t}{1,3}$
Leis de Semelhança	$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b}\right)^2 \cdot H_b$	$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b}\right)^2 \cdot H_b$

	$Q_{ob} = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b$	$Q_{ob} = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b$
--	---	---

Quanto à rotação específica da bomba, os métodos propostos diferem quanto aos parâmetros utilizados nos cálculos da mesma. Pelo método proposto por Chapallaz (1992), os cálculos para a rotação específica da bomba baseiam-se na rotação específica da BFT. Todavia, no método proposto por Viana (1987), a equação para o cálculo da rotação específica da BFT é a mesma utilizada para o cálculo da rotação específica da bomba.

3) CAPÍTULO

Neste capítulo, serão abordados os parâmetros que garantem o bom funcionamento de uma BFT em um sistema de abastecimento de água público. Além da seleção do software para realizar a simulação do sistema de abastecimento do projeto, que determinará os dados de entrada necessários para efetuar os cálculos para os métodos de seleção de BFT propostos. O caso a ser estudado e a caracterização do local escolhido para o estudo também serão expostos. Por fim, a bomba será selecionada e os custos de projeto serão determinados.

3.1 PARÂMETROS

Entre os parâmetros que determinam o bom funcionamento da BFT, os dados de pressão e vazão disponíveis na rede de distribuição despontam como os que requerem maior atenção e análise. Caso a pressão e vazão apresentem valores insatisfatórios, o sistema de distribuição sofreria danos durante o processo de abastecimento e transmissão do serviço ao consumidor. Outro fator crucial para garantir um bom rendimento relacionado à geração de energia elétrica é o tempo em que a BFT estará em operação.

3.1.1 PRESSÃO

A pressão é um dos fatores mais importantes na determinação de rendimento de uma BFT, está também, diretamente relacionada ao potencial de geração de uma BFT. Sua variação é fruto de diversos fatores em um sistema de abastecimento. A ocorrência de pressões fora dos padrões regidos pela N BR 12218 (1994) pode ser derivada de uma má utilização e calibração de *boosters*, estações elevatórias, VRP's, reservatórios e principalmente decorrente do relevo da região. Locais com maior índice de desníveis de altura, como regiões serranas e montanhosas, tendem a ter grandes gradientes de pressão ao longo da rede de distribuição devido a sua própria natureza topográfica. Em locais onde não há ocorrência de desníveis de altura, como em regiões de planície, os gradientes de pressão se dão devido a operação dos equipamentos que compõe o sistema de abastecimento como citado anteriormente.

3.1.2 CONTROLE DE PRESSÃO

A análise e controle de pressões procura reduzir as pressões do sistema e a faixa de duração das pressões máximas, além de garantir os padrões de serviço satisfatórios para os consumidores.

Estes valores ideais de pressões são atingidos de acordo com o projeto em questão e setorização dos sistemas de distribuição, pelo controle de bombeamento direto na rede (*boosters*) ou pela implementação de válvulas redutoras de pressão (VRP's) ao sistema.

Segundo Menezes (2006), o controle de pressão na rede está atrelado aos seguintes benefícios para o sistema de distribuição:

- Redução do volume perdido em vazamentos, economizando recursos de água e custos associados;
- Redução da frequência de rompimento de tubulações e consequentes danos que têm reparos caros, minimizando também as interrupções de fornecimento e os perigos causados ao público usuário de ruas e estradas;

- Serviço com pressões mais estabilizadas ao consumidor, diminuindo a ocorrência de danos às instalações internas dos usuários até a caixa d'água (tubulações, registros e boias).

3.1.3 VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO

As VRP's desempenham papel de uniformização e controle de pressões em pontos da rede de distribuição que possuam excesso de energia disponível, tal controle previne também a ocorrência de perdas de recurso hídrico que estão diretamente relacionadas com as pressões no sistema de distribuição. A principal função das VRP's é limitar a pressão em sua saída, independentemente da pressão de montante.

O funcionamento da VRP pode ocorrer de maneiras distintas, sendo elas: operando de forma ativa: ocorre quando a VRP provoca uma perda de carga a fim de limitar a pressão de jusante; de forma passiva: ocorre quando a pressão de montante é menor ou igual à pressão mínima de trabalho estabelecida. Neste caso a VRP opera totalmente aberta, minimizando a perda de carga localizada. E por fim, VRP atuando como válvula de retenção: ocorre quando a pressão de jusante é maior que a de montante. Neste caso a VRP fecha totalmente, evitando o refluxo.

O controle das VRP's pode ser feito de forma mecânica ou eletrônica, permitindo determinar o controle para um único valor de pressão ou para diferentes demandas de consumo, o que permite um controle mais eficaz da pressão de serviço e melhor desempenho hidráulico do sistema.

É fundamental verificar o risco de cavitação da válvula, deve-se prever instalação em série de válvulas de mesmo diâmetro, reduzindo a queda de pressão em cada uma delas, diminuindo assim o risco de cavitação. É preciso ainda analisar, se a válvula selecionada não produzirá uma perda de carga superior à desejada (pressão de entrada mínima menos a pressão de saída). Garantindo assim, o funcionamento satisfatório da VRP acoplada ao sistema de geração.

3.1.4 VAZÃO

A vazão é determinante para o funcionamento e para a curva de rendimento de uma BFT, ela que relacionará o volume de água que passará pela turbina gerando energia. Conforme

foi abordado, a vazão também é um dos principais fatores que determinam o rendimento de uma bomba e paralelamente das BFT's.

3.1.5 RELAÇÃO PRESSÃO X VAZÃO E TEMPO DE OPERAÇÃO DA BFT

Tanto a pressão quanto a vazão não são constantes durante as 24 horas de abastecimento dos clientes. Esse fenômeno se dá pela variação de demanda de abastecimento. Essa variação de demanda está relacionada a sazonalidade e ao período do dia. Nos períodos mais quentes do ano naturalmente a demanda de abastecimento das comunidades é maior. Em algumas cidades turísticas fica evidente a alteração de demanda derivada dos feriados e eventos festivos. A alteração de demanda diária está relacionada principalmente com as atividades cotidianas dos cidadãos voltadas para a higiene e alimentação. Os picos de consumo estão concentrados na parte da manhã, ao meio do dia e no início da noite de acordo com a Figura 8 e a Figura 9.



Figura 8: Pressões ao longo de 24 horas. (Fonte: Sosnoski 2015)

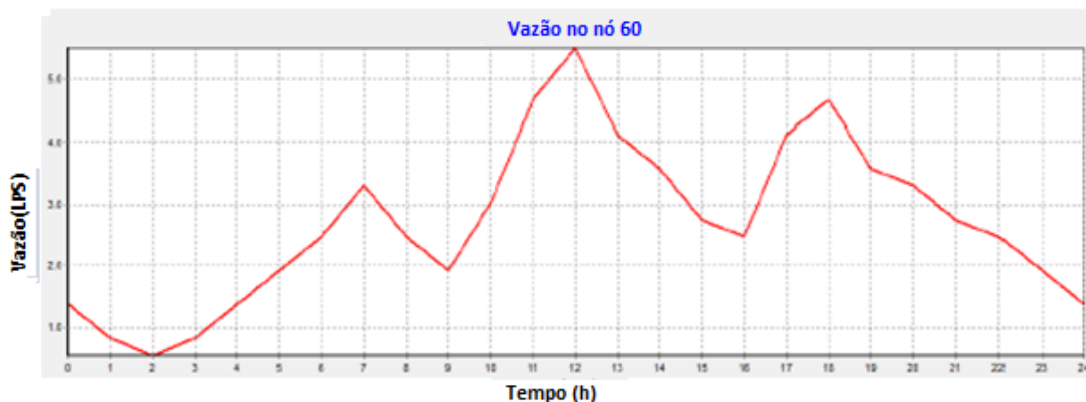


Figura 9: Vazões ao longo de 24 horas. (Fonte: Sosnoski 2015)

Observa-se nas figuras anteriores a relação inversa entre a vazão e a pressão de um sistema de abastecimento de água. A medida que a solicitação de demanda de abastecimento aumenta as pressões caem.

Dessa maneira, é importante observar quais são os momentos em que a demanda de abastecimento propicia para a BFT a melhor condição de utilização gerando a maior quantidade de energia possível sem comprometer o abastecimento da região. Caso a BFT esteja ligada diretamente com a distribuição de energia local, ou seja, se a energia gerada pela BFT for cedida para a rede de distribuição de energia da região, os horários com tarifas especiais de consumo também devem ser levados em consideração para melhorar o valor da energia cedida à rede, visto que o valor do kW muda de acordo com os horários de pico de consumo.

3.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

3.2.1 ESCOLHA DO SOFTWARE

Nesta sessão, serão abordadas as necessidades do projeto em relação a modelagem de um sistema de abastecimento por um sistema computadorizado além da modelagem de desempenho da BFT em relação aos parâmetros iniciais.

3.2.2 SOFTWARES USADOS PARA MODELAGEM DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO

Existem no mercado diversos softwares capazes de modelar sistemas de distribuição de água. Entre eles, podemos destacar, os softwares EPANET 2.0, *RAwin* e *WaterCAD*.

O software EPANET 2.0 é amplamente utilizado por empresas de abastecimento de recursos hídricos como o Grupo Águas do Brasil e a CEDAE. O software é capaz de determinar o sentido do fluxo, vazão em cada trecho do sistema, a pressão em cada nó, o nível de cada reservatório, a taxa de consumo de energia ao longo do dia, assim como os horários de pico. Possui mapas de rede, mesas de dados, gráficos de séries de tempo, e enredos de contorno.

Também é possível realizar uma simulação de idade da água e de sua origem, entre outras funções que o software é capaz de desempenhar. Sua aquisição é gratuita através de download e o seu manual de utilização assim como tutorias e arquivos-exemplo também são encontrados facilmente para download.

O software *RAwin* trata-se de um programa muito utilizado para desenho, dimensionamento e verificação de redes de abastecimento de água. Permite calcular redes ramificadas e malhadas. Possui uma base de dados aberta, para edição e criação de novos modelos de tubulações, válvulas e símbolos. Importação e exportação de arquivo dwg ou dxf. Possibilitando reconhecimento dos pontos através de um projeto topográfico com curvas de nível, criação de perfis longitudinais e transversais. A geração de memória de cálculo é realizada segundo a NBR vigente. Os consumos podem ser introduzidos diretamente ou estimados em função da população e uso, pelo método de consumos pontuais nos nós, lotes ou uniformemente distribuído. Entretanto, é necessária a solicitação de um orçamento para sua aquisição, a versão gratuita não está disponível.

O software *WaterCAD* trata-se de um programa de modelagem e análise operacional de redes de distribuição de água. O programa planeja novas redes de distribuição de água além de gerenciar as existentes com eficiência para reduzir os custos de energia, bem como os riscos de interrupção do fornecimento. O software permite a construção de modelos dinâmicos, através da importação de dados externos para dar início ao modelo, alocando demandas de água sem dificuldade e automatizando a extração do terreno e a alocação de nós. Além de permitir a avaliação e comparação de um número ilimitado de cenários físicos, de projeto, demanda de água, topologia de rede e operacional. É possível também, modelar em uma plataforma conhecida, utilizando ferramentas e atalhos do AutoCAD. A versão gratuita do software é de difícil acesso e a mesma possui limitação de funções se comparada com a versão paga.

Diante do que foi exposto e devido à complexidade das simulações, o software que propõe a melhor viabilidade para fins de projeto é o EPANET 2.0, por ser um software de domínio público, de fácil acesso e com manuais disponíveis, tornando-o mais didático apesar de seu nível de detalhes e complexidade. Além de ser um software utilizado em larga escala por empresas de abastecimento de água.

3.2.2.1 EPANET

O EPANET é um software de modelagem hidráulica voltado para a distribuição de água em sistemas de abastecimento. Sua primeira versão foi desenvolvida pela Agência Norte-Americana de Proteção Ambiental (USEPA) em 1993. É um programa de domínio público com código aberto, permitindo que o usuário o altere de acordo com a sua demanda. Existe também a versão mais atual em português adaptada pela UFPB.

Atualmente o EPANET é um dos sistemas para gestão da distribuição de água mais utilizados e eficiente. Segundo o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LENEC) em 2002, o programa faz simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico, da qualidade da água em sistemas de abastecimento, além de indicar vazões, pressões, concentrações químicas, idade da água e outras funcionalidades. O EPANET permite também a análise de gráficos e mapas de pressão e vazão para determinada área do sistema de abastecimento. A Figura 24 ilustra a simulação de pressões gerada através do EPANET em um período de 24 horas. A Figura 11 mostra um mapa de vazão de pressões construído através do EPANET.

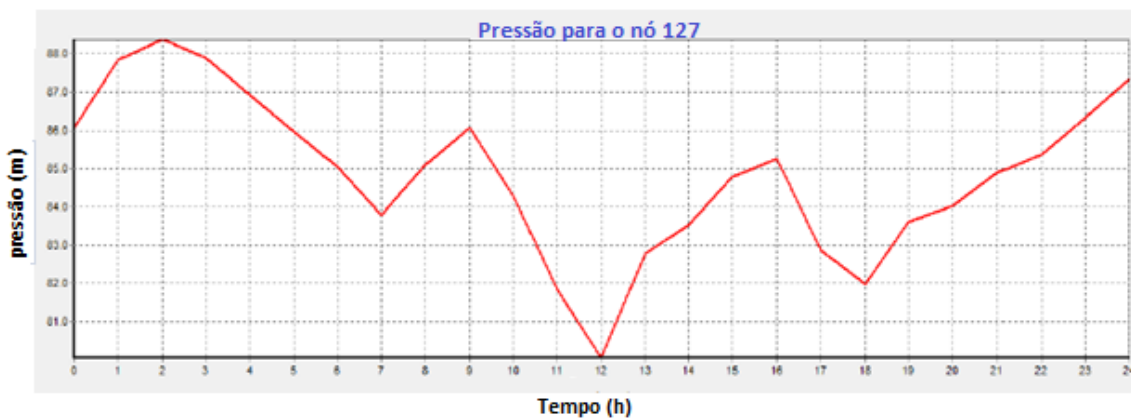


Figura 10: Simulação de pressões pelo EPANET em um período de 24 horas. Retirado de Sosnoski 2015

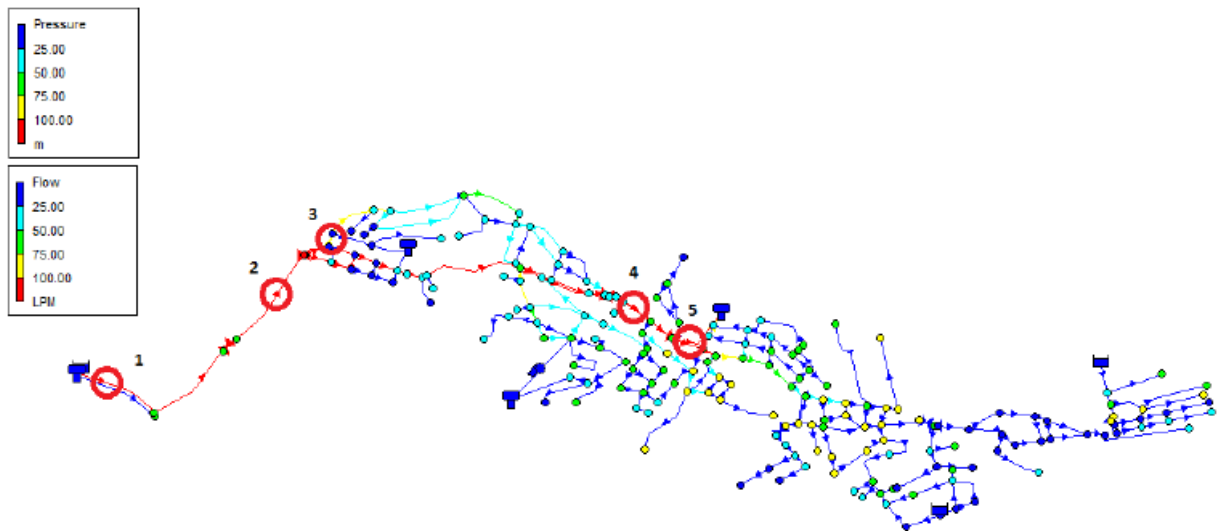


Figura 11: Mapa de pressões e vazões simulado pelo EPANET. Retirado de Sosnoski 2015

Dentre as principais características do software, relacionadas aos cálculos, podemos destacar:

- Dimensão (número de componentes) da rede a analisar ilimitada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc.;
- Modelação de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombagem e do respectivo 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 função da altura de água;
- Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Modelação da relação entre pressão e caudal efluente de dispositivos emissores (por exemplo, aspersores de rega, ou consumos dependentes da pressão);

- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (por exemplo, altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

3.2.2.2 VALIDAÇÃO EPANET

A fim de validar os cálculos do EPANET, foram calculados ponto a ponto a perda de carga de cada trecho e a pressão em cada nó. Para o sistema, os nós representam os pontos de consumo enquanto que os trechos são as tubulações que unem os nós. O cálculo foi realizado através da equação de Hazen Williams 3.1 e da equação 3.2.

$$J = 10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot C^{-1,85} \cdot D^{-4,87} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

$$H_f = J \cdot L \quad (3.2)$$

Em que:

Q: Vazão [m³/s];

C: Coeficiente de Hazen Willians;

D: Diâmetro do tubo [m];

J: Perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/km];

H_f: Perda de carga contínua [m.c.a];

L: Comprimento do trecho reto do tubo [m].

Para se determinar o coeficiente de Hazen Willians foi adotado valor para tubulações de ferro fundido revestido com cimento novo, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Coeficiente de Hazen Williams por material

MATERIAL do TUBO	NOVOS	USADOS Cerca de 10 Anos	USADOS Cerca de 20 Anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-
Aço rebitado novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestido c/ betume)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epoxi	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento amianto	140	130	120
Cobre	130	135	130
Concreto, bom acabamento	130	-	-
Concreto acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido , revestido com epoxi	140	130	120
Ferro fundido revestido com cimento	130	120	105
Grés ceramico,vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130

Foi simulado um sistema de abastecimento simples conforme a Figura 12, contendo um reservatório de nível fixo a 150 metros do nível do mar, uma válvula genérica GVP com perda de carga parametrizada de 10 m.c.a para a vazão de 2 litros por segundo e trechos de tubulação com diâmetro de 50 mm, comprimento variável e coeficiente de Hazen Williams igual a 130. Os nós foram criados com cota zero e com consumos base escolhidos arbitrariamente.

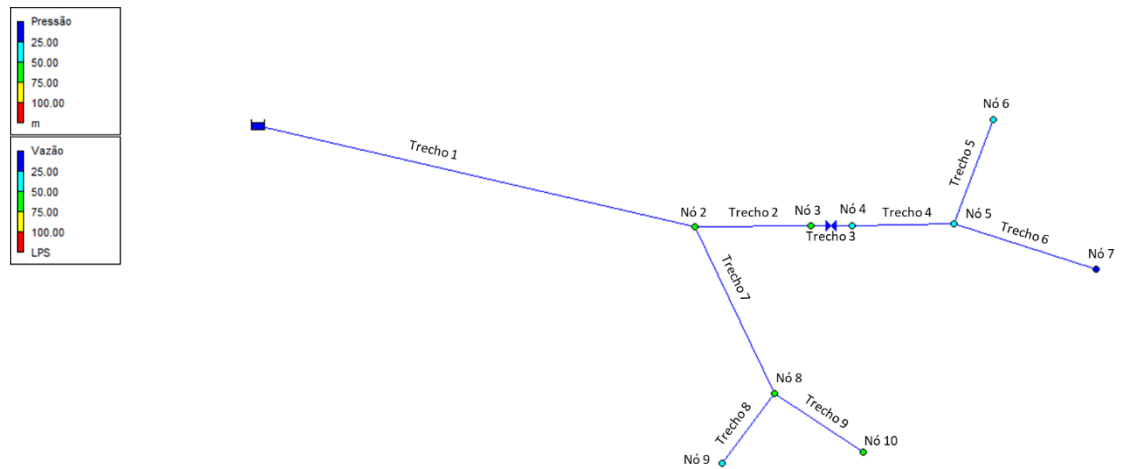


Figura 12: Sistema de abastecimento simulado no EPANET.

Para calcular a vazão de cada trecho, utiliza-se o somatório do consumo base de cada nó a jusante do trecho. O cálculo da pressão de cada nó é feito através da equação 3.3.

$$P_n = P_{n-1} - H_{f-1} \quad (3.3)$$

Em que:

P_n : Pressão no nó [m.c.a]

P_{n-1} : Pressão no nó anterior [m.c.a]

H_{f-1} : Perda de carga contínua do trecho anterior [m.c.a]

Tendo os valores das variáveis das equações 3.1, 3.2 e 3.3, chegou-se aos seguintes resultados para a perda de carga distribuída e a perda de carga contínua conforme a Tabela 4. Quando comparados aos resultados gerados pelo EPANET na Tabela 5, verificou-se um erro médio de cerca de -1,79% conforme a tabela 6, o que pode ser considerado adequado para os critérios de projeto. O trecho 3 não entrou em comparação pois é o trecho onde a válvula genérica GVP foi instalada.

Tabela 4: Cálculo de perda de carga através das equações de Hazen Williams.

Hazen Williams									
Parâmetro	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9
Q [m ³ /s]	0,0035	0,002	0,002	0,002	0,0005	0,0015	0,0015	0,001	0,0005
C	130	130	-	130	130	130	130	130	130
D [m]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
L [m]	1000	500	-	500	500	500	1000	500	500
J [m/km]	81,06	28,79	-	28,79	2,22	16,91	16,91	7,99	2,22
Hfc [m.c.a]	81,06	14,39	10,00	14,39	1,11	8,45	16,91	3,99	1,11

Tabela 5: Valores para perda de carga retirados do EPANET.

EPANET									
Parâmetro	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9
Q [m ³ /s]	0,0035	0,002	0,002	0,002	0,0005	0,0015	0,0015	0,001	0,0005
C	130	130	-	130	130	130	130	130	130
D [m]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
L [m]	1000	500	-	500	500	500	1000	500	500
J [m/km]	79,79	28,30	-	28,30	2,17	16,61	16,61	7,84	2,17
Hfc [m.c.a]	79,79	14,15	10,00	14,15	1,09	8,31	16,61	3,92	1,09

Tabela 6: Comparação entre os valores de perda de carga por Hazen Williams e EPANET.

Variação										
Parâmetro	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Média
J %	-1,57%	-1,69%	-	-1,69%	-2,03%	-1,75%	-1,75%	-1,82%	-2,03%	-1,79%
Hfc %	-1,57%	-1,69%	-	-1,69%	-2,03%	-1,75%	-1,75%	-1,82%	-2,03%	-1,79%

A pressão em cada nó foi calculada com base nos dados encontrados de perda de carga contínua e da equação 3.15. Desta forma foram calculadas as pressões de todos os nós conforme a Tabela 7 e foram comparadas com as pressões encontradas pelo EPANET conforme a Tabela 8. Verificou-se uma média de erro de 4,36% conforme a Tabela 9 o que é admissível para os critérios do projeto.

Tabela 7: Pressão calculada através do método de Hazen Williams.

Hazen Williams									
Parâmetro	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
P [m.c.a]	68,94	54,55	44,55	30,15	29,05	21,70	52,03	48,04	50,93

Tabela 8: Pressão calculada pelo EPANET

EPANET									
Parâmetro	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
P [m.c.a]	70,21	56,06	46,06	31,91	30,83	23,61	53,60	49,68	52,52

Tabela 9: Comparação entre os valores de pressão por Hazen Williams e EPANET.

Variação										
Parâmetro	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10	Média
P %	1,84%	2,78%	3,40%	5,83%	6,13%	8,78%	3,01%	3,41%	3,12%	4,36%

3.3 ESTUDO DE CASO

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 distribuição. Alguns aspectos e conceitos devem ser estudados para que a BFT opere de forma eficiente.

De acordo com Sosnoski (2015) as redes de grandes dimensões e com vazões significativas e de grande solicitação (como as adutoras) oferecem maiores potenciais de geração de energia. Adutora é o canal ou tubulação destinado para a condução de grandes volumes de água em um sistema de abastecimento. A adução pode ser realizada das seguintes maneiras: de acordo com a energia de movimentação do líquido: gravidade, recalque e mista, de acordo com o modo de escoamento do líquido: livre, forçada e mista e de acordo com a natureza da água: bruta e tratada.

Entre os conceitos de adução estudados, a adução por gravidade possui extrema importância para que a BFT opere de maneira satisfatória. Caso a BFT não funcione por

gravidade a mesma irá gerar uma perda de carga que deverá ser superada pela estação elevatória, aumentando assim o seu consumo de energia que será maior que a potência gerada.

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

No primeiro caso, em que toda a energia poderá ser aproveitada, o monitoramento da pressão e vazão do local a ser estudado, deve ocorrer no período de menor consumo (maior pressão disponível). Assim, será possível determinar a vazão e altura de projeto, que serão os valores mínimos encontrados. Desta forma a geração de energia será contínua, facilitando a operação da BFT e o atendimento às cargas do sistema.

No segundo caso, onde apenas parte da energia disponível poderá ser aproveitada, é necessário realizar o cálculo da perda de carga máxima que pode ser aplicada ao sistema de distribuição de água. Neste caso, o monitoramento da pressão e vazão do local deverá ser realizado no período de maior consumo, quando a pressão disponível é menor e consequentemente a perda de carga aplicada é mínima.

Em casos em que a instalação da BFT será efetuada diretamente na rede de distribuição, a pressão deverá ser medida em diferentes pontos da rede, além de levantar os diâmetros e comprimentos da tubulação e a topografia do local, para que seja possível realizar sua calibração. Diante disso, a BFT deverá ser selecionada para a vazão máxima e a perda de carga máxima, ou seja, diferença entre a pressão mínima medida no ponto de menor pressão da rede e o valor mínimo estabelecido por norma.

Pontos onde existem VRP's instaladas são altos potenciais para a instalação de BFT's, visto que são instaladas em locais onde a pressão é elevada. A prática de substituição de VRP's por BFT's pode ser uma solução interessante para as análises de cada sistema.

Neste trabalho, as curvas de altura, vazão e pressão da BFT serão plotadas e posteriormente uma simulação no software EPANET 2.0, pois o mesmo possibilita determinar as pressões e vazões em cada ponto ou nó da rede de distribuição de água. Tal simulação será

realizada para afirmar a operação eficiente do sistema. A simulação será feita antes da instalação da BFT de acordo com a faixa de pressão e vazão do projeto. Determinando assim, pontos viáveis para a geração energética e posterior instalação da BFT; garantindo que o sistema opere dentro dos padrões regidos pela NBR 12218 (1994): Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Por fim, será realizado o estudo para verificar a viabilidade econômica do projeto.

3.3.1 SUGESTÃO DE ÁREA PARA O ESTUDO

Entre os possíveis locais viáveis para instalação eficiente de uma BFT podemos citar as regiões de Nova Friburgo e de Piquete, devido a ambos os municípios serem localizados em região serrana e possuírem desníveis consideráveis em seu relevo além de elevada pressão de água.

3.3.1.1 NOVA FRIBURGO

O município de Nova Friburgo é localizado no centro-norte do estado do Rio de Janeiro, distando 136 km da capital fluminense. Possui 846 m de altitude sendo que alguns bairros ou distritos chegam a 1000 m ou mais. A região contempla uma densidade demográfica de 195.07 hab./km² IBGE (2010). Trata-se de uma região com elevadas pressões e recursos para geração de energia. A Figura 13 representa a localização de Nova Friburgo no mapa do Estado do Rio de Janeiro.

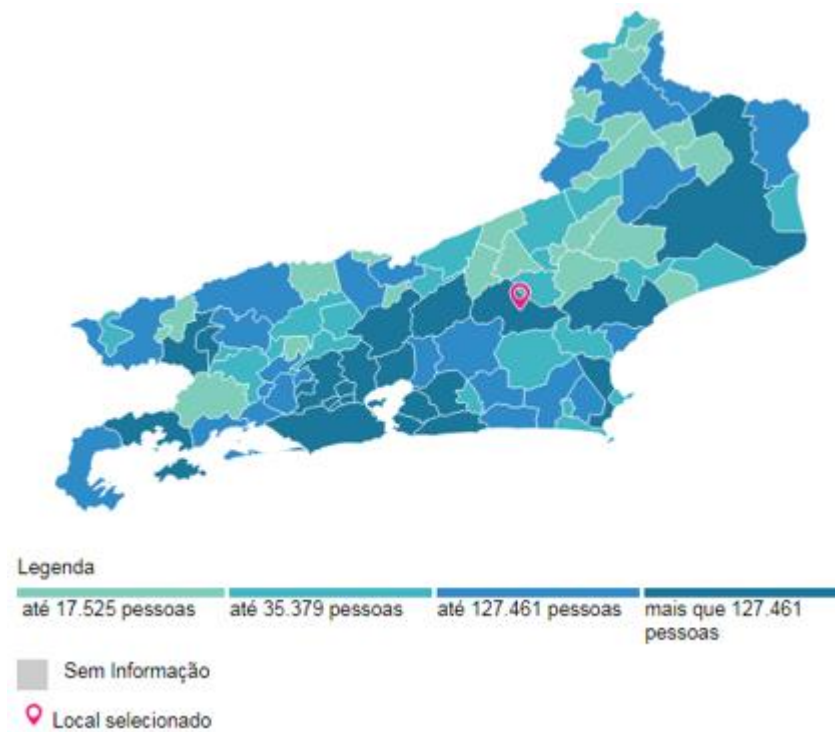


Figura 13: Localização de Nova Friburgo no mapa do estado do Rio de Janeiro. (Fonte: IBGE)

Segundo Grupo o Grupo Águas de Friburgo, o sistema de abastecimento de água da região é composto por quinze estações de tratamento. Sendo a principal delas a estação de Rio Grande de Cima, com produtividade estável, mesmo nos períodos de estiagem, pois a captação é feita no rio Grande, que mantém seu nível constante o ano inteiro.

Dados do ETA de Rio Grande de Cima:

- Localização: Estrada Luiz Mendes de Moraes – Rio Grande de Cima
- Capacidade de Tratamento: 280 l/s
- População Atendida: 81.006 pessoas
- Tipo de Tratamento: Convencional
- Captação: Rio Grande

O Rio Grande tem aproximadamente 200km de extensão, desde a nascente em São Lourenço, no terceiro distrito de Nova Friburgo, até a cidade de São Fidélis, no norte fluminense, onde deságua em um dos mais importantes rios do país: o Paraíba do Sul.

Juntas, as quinze Estações de Tratamento de Água (ETAs) tratam, em média, 50 milhões de litros por dia.

A flora da Serra dos Órgãos é formada por florestas tropicais, relacionadas com a altitude. Na base, possui um trecho úmido de floresta costeira atlântica, com folhas grandes e árvores altas. A vegetação muda para florestas úmidas de montanha, conforme se sobe a serra, até chegar a florestas de altitude acima dos 2000 metros, com gramas e pequenos arbustos. A Figura 14 mostra o relevo do município de nova Friburgo.



Figura 14: Relevo do município de nova Friburgo (Fonte: a voz da serra)

3.3.1.2 PIQUETE

O município de Piquete está localizado na região central do vale médio do Rio Paraíba, no estado de São Paulo, possui 176 Km² e densidade demográfica de 80,26 hab./km² IBGE (2010). A região está assentada na encosta da serra da Mantiqueira e possui altitude de 645 metros. Figura 15 representa a localização de Piquete no mapa de São Paulo.

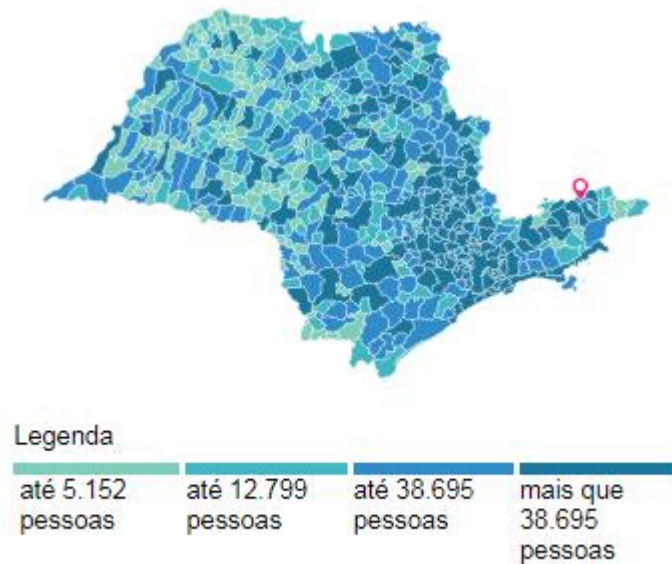


Figura 15: Localização de Piquete no mapa de São Paulo. (Fonte: IBGE).

O município é abastecido por três mananciais, sendo eles o Ribeirão Benfica, o Córrego da Tabuleta e o Ribeirão Piquete, localizados na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul.

Segundo a CAB Ambiental, companhia de saneamento em Piquete, o sistema de distribuição de água conta com uma estação de tratamento de água localizada no bairro de Tabuleta com capacidade de tratar 67 l/s e dois poços, sendo eles: poço vila Cristina e o Poço Santa Isabel.

O relevo é bastante acidentado, por estar localizado na serra da Mantiqueira detentora de elevadas escarpas e morros isolados o que torna as condições favoráveis para o aproveitamento de energia para geração de energia proposto neste projeto.

3.3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para o estudo em questão, foi simulado um sistema de abastecimento de água fictício através do EPANET 2.0 relativamente simples, porém com desníveis energéticos acentuados, necessitando assim, de medidas específicas para a redução de pressões da rede de abastecimento.

O sistema simula um local de demanda de abastecimento variada, composta por três áreas. Tais áreas correspondem a demandas domésticas, demandas de pequeno porte comercial e uma área correspondente a uma alta demanda de consumo, proveniente de um polo industrial, conforme a Figura 16. Além disso, o sistema de abastecimento comporta uma estação de tratamento de água situada à 830 metros do nível do mar. Essa estação de tratamento é representada pelo reservatório de nível fixo na modelagem EPANET, e está localizada em relação ao ponto mais baixo da rede (650 metros) com um desnível de 170 metros.

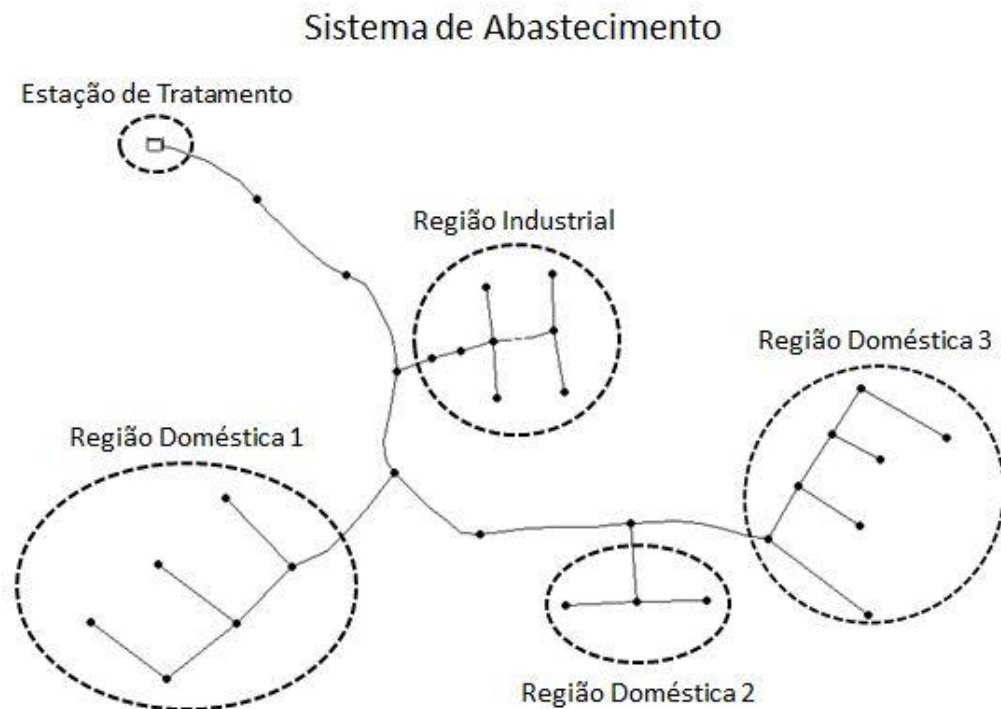


Figura 16: Sistema de abastecimento fictício

3.3.3 MODELAGEM DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO

Para resultados mais assertivos e próximos do real cenário a ser estudado, serão necessárias simulações do sistema de abastecimento de água. Essa simulação deverá contemplar as pressões praticadas nos diversos pontos do sistema de abastecimento, além de caracterizar as vazões de consumo da rede nos diversos horários.

Esse projeto demanda de pelo menos dois momentos de simulação. O primeiro é anterior a instalação da BFT, onde serão analisados tanto as pressões quanto as vazões e serão calculados os pontos de maior potencial energético do sistema de abastecimento de água para a instalação do equipamento. O segundo momento será a simulação posterior a aplicação do equipamento. Nessa simulação será avaliado o impacto causado pela sua instalação no restante do sistema de abastecimento.

Caso a segunda simulação acuse uma interferência relacionada à pressão e vazão fora dos limites estabelecidos para o abastecimento conforme a NBR 12218, será necessária uma reanálise dos pontos que demonstrem possibilidade de instalação da BFT. Dessa maneira, as simulações serão feitas por tentativa e erro até que as condições de projeto sejam atendidas.

3.3.4 SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO EPANET

Como a demanda de consumo por parte dos usuários varia durante o dia, inseriu-se para cada nó, o padrão de consumo dois, tanto para as demandas domésticas como para as industriais conforme a Figura 17. O padrão de consumo consiste em estabelecer de hora em hora um fator multiplicativo para um determinado consumo-base (estipulado para todos os nós), dessa forma criou-se uma curva de demanda que varia de acordo com as horas do dia para cada nó.

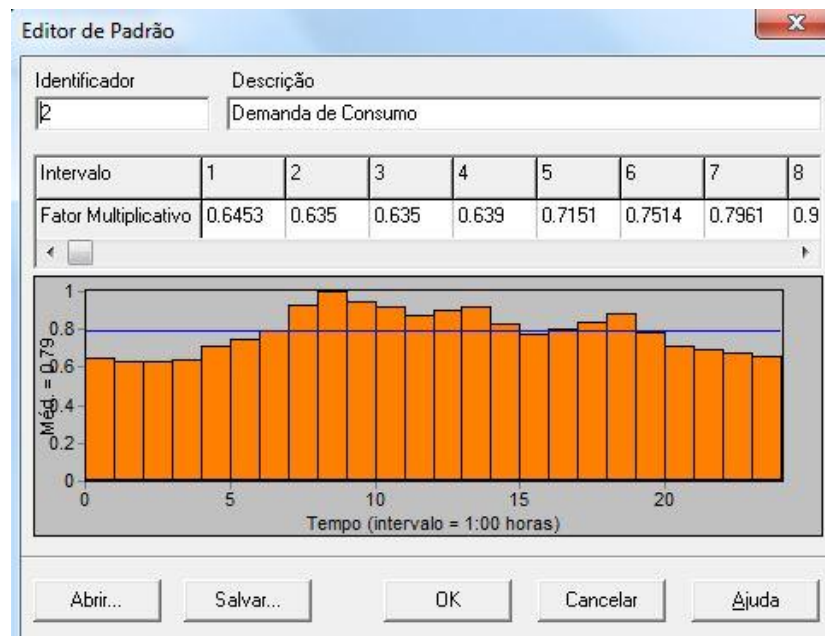


Figura 17: Padrão de Consumo 2

3.3.4.1 SIMULAÇÃO INICIAL

Realizadas as parametrizações iniciais como a escolha dos consumos-base, cotas, diâmetros, comprimentos, rugosidades e padrões de consumo de cada componente do sistema de abastecimento (reservatório de nível fixo, trechos e nós), deu-se início a primeira simulação do sistema de abastecimento.

A primeira simulação tem o intuito de estudar os trechos com maiores vazões e os nós com maiores pressões além dos que apresentam as menores pressões em seu momento crítico, onde ocorrem as maiores vazões, conforme a Figura 18. Após a análise determina-se o ponto de instalação da BFT levando em consideração o potencial energético do local de instalação.

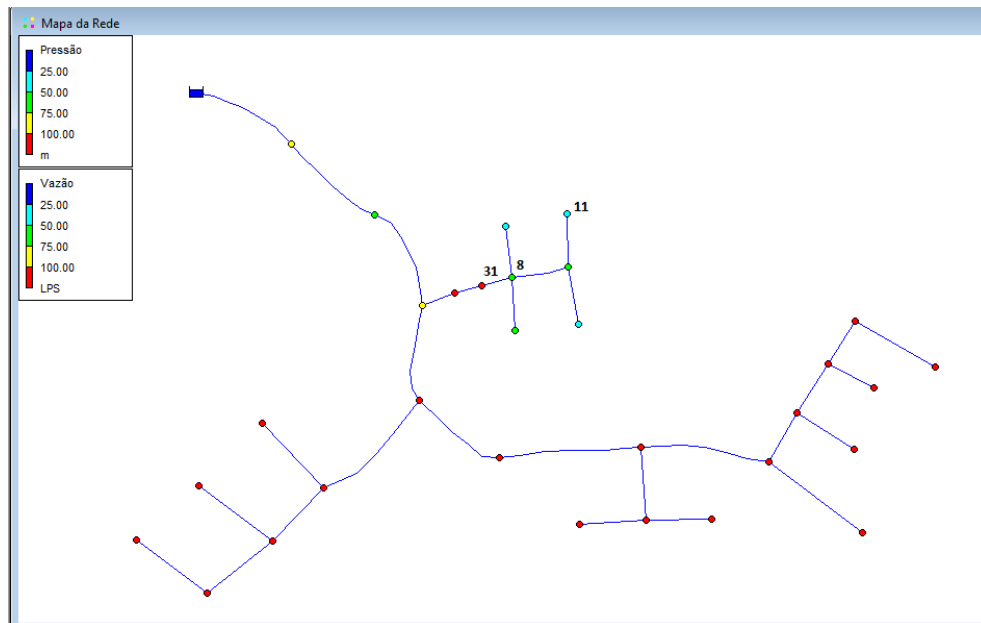


Figura 18: Simulação Inicial do Sistema de Abastecimento

Após a análise do sistema, definiu-se que um dos pontos de melhor aproveitamento para a instalação da BFT seria no trecho 31 que se situa na entrada da área industrial, apresentando vazão máxima de 9,94 litros por segundo e pressão de 96 metros em seu nó à jusante (nó 8). Outros pontos também apresentaram potencial energético, porém como o intuito do projeto é aplicar uma BFT para a geração de energia e redução de pressão na rede, não há potencial melhor do que o trecho que considera a demanda de consumo da área industrial visto que a demanda máxima das áreas domésticas é de 1,53 L/S.

Determinado o local de instalação da BFT deve-se considerar com cautela o ponto crítico de pressão da rede em que a perda carga proveniente da geração atuará verificando na simulação pós instalação se o nó não ultrapassará os limites estabelecidos por norma. A instalação da BFT reduzirá as pressões praticadas a montante do equipamento, visto que parte da energia hidráulica será aproveitada para a geração de energia, dessa forma gerando uma perda de carga localizada no sistema de abastecimento. No caso da instalação no trecho 31 o ponto crítico é o nó 11 que tem as menores pressões na rede posterior ao local da instalação da BFT.

3.3.4.2 SIMULAÇÃO – PÓS INSTALAÇÃO DA BFT

Para simular essa perda de carga deve-se instalar no trecho determinado uma válvula genérica GPV e conseqüentemente deve-se determinar a sua curva de perda de carga.

Para a determinação da curva de perda de carga, normalmente são realizados ensaios em bancada de testes. Diante disso, optamos por adaptar a Tabela 3, gerada através dos resultados experimentais do artigo de [3] Gustavo Meirelles Lima. Neste ensaio foram simuladas as condições de operação de um sistema de abastecimento, no qual o controle de vazão é realizado através do consumo da população, localizada à jusante da BFT. Nessa hipótese, a pressão de entrada irá aumentar à medida que a vazão for reduzida e a BFT passa a exercer o papel de controladora de pressão. A bancada utilizada foi composta por uma bomba de maior potência e um conversor de frequência e ambos desempenharam papel de simular a queda da BFT. Enquanto resistências foram responsáveis por dissipar a energia gerada. Controlando assim, a rotação da BFT. Colocando-se mais ou menos carga.

A medição de vazão foi realizada através de medidores ultrassônicos da marca Thermo Polysonics instalados a montante da BFT e as medidas de pressão foram realizadas através de transdutores de pressão da marca SMAR instalados a montante e a jusante da BFT. A potência elétrica foi medida através de um medidor de grandezas elétricas. Além disso, foi determinada a medida de rotação da BFT através do tacômetro ótico. Evitando assim, que a máquina dispare, mantendo sua velocidade constante. Desta forma, foi possível calcular a altura de queda líquida da BFT, a potência hidráulica fornecida e seu rendimento através das Equações 3.4 a 3.7.

$$H = \left(\frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g} \right) + \frac{(v_1^2) - (v_2^2)}{2 \cdot g} + (z_1 - z_2) \quad (3.4)$$

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (3.5)$$

$$Ph = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (3.6)$$

$$\eta_c = \frac{P_{el}}{P_h} \quad (3.7)$$

Em que:

H : altura de queda líquida da BFT [m];

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

$p_2/\rho \cdot g$: pressão na saída da turbina[m];

v1 : velocidade na seção de entrada da BFT[m/s];

v2 : velocidade na seção de saída da BFT[m/s];

z1:cota de posição na entrada da BFT[m];

z2:cota de posição na saída da BFT[m];

Q: vazão turbinada[m³/s];

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

Ph: potência hidráulica[kW];

ρ : massa específica da água[kg/m³];

η_c : rendimento do grupo gerador [%];

Pel: potência elétrica gerada[kW].

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos no ensaio de BFT com controle de vazão à jusante.

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

Tabela 10: Dados obtidos no ensaio realizado na BFT com controle de vazão a jusante. (Fonte: [3] Gustavo Meirelles Lima).

Dessa forma foi parametrizado no sistema a curva um de perda de carga da BFT conforme a Figura 19 utilizando os dados da Tabela 3.

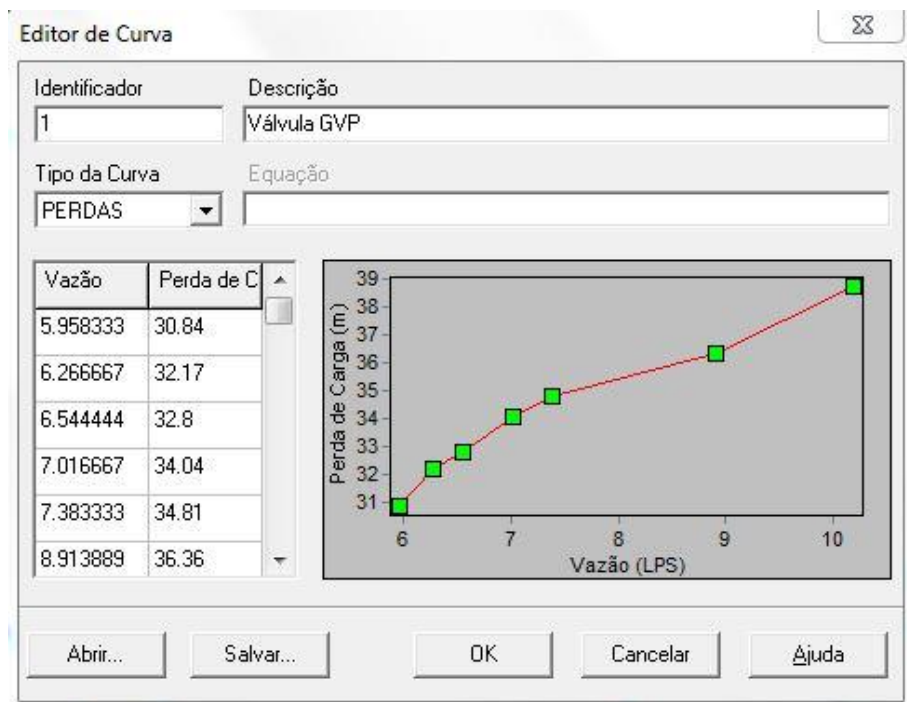


Figura 19: Curva de perda de carga da BFT

Feito isso a simulação pode ser realizada, as curvas de pressão dos nós e vazões dos trechos podem ser traçadas. Como foi dito item 3.3.4.1., o nó crítico 11 merece atenção especial pois é o nó com menor pressão no qual a BFT influenciará diretamente. Para determinar se o projeto é viável levantou-se a curva de pressão do nó crítico 11 ao longo de sua demanda diária conforme a Figura 20 e verificou-se que no momento de menor pressão o seu valor é de 13,18 m.c.a. Também foi feita a verificação das pressões no restante do sistema de abastecimento em seu horário crítico de menor pressão conforme a Figura 21 e como em nenhum dos nós a pressão foi inferior ao limite estabelecido pela NBR 12218 de 10 m.c.a, o projeto foi considerado viável.

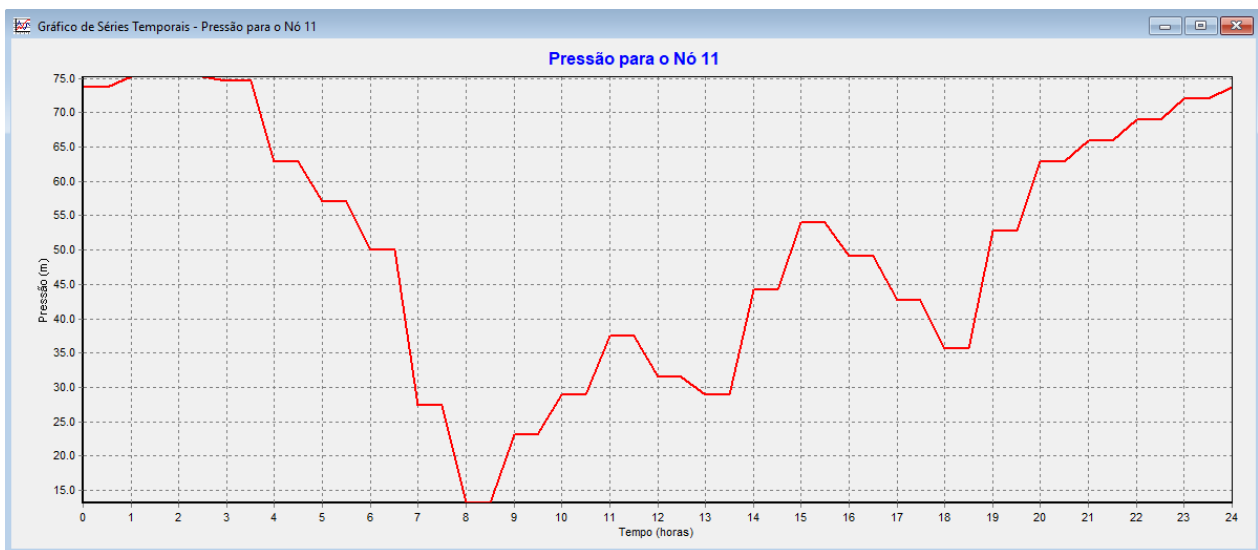


Figura 20: Pressões praticadas no nó 11 após a instalação da BFT

*NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Esta Norma fixa as condições exigíveis na elaboração de projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público.

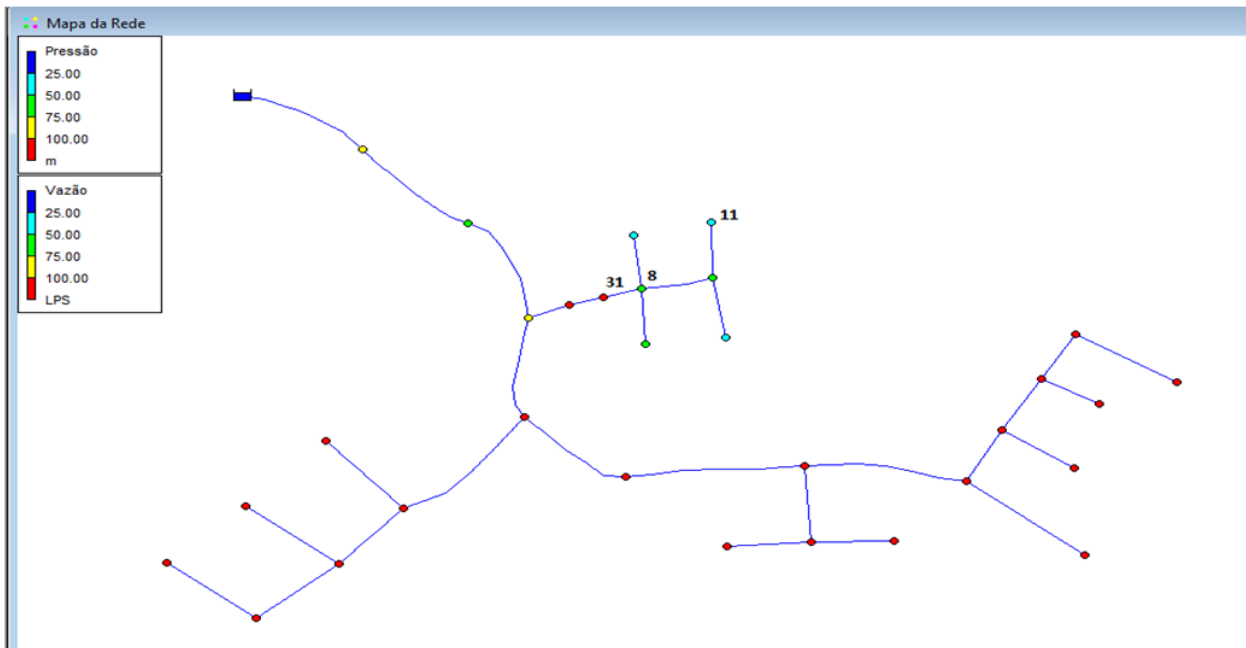


Figura 21: Sistema de abastecimento após a instalação da BFT

3.3.5 CÁLCULOS PRÉ DIMENSIONAMENTO DA BFT

Antes do dimensionamento da BFT através dos métodos desenvolvidos por Viana e Chapallaz, deve-se calcular a altura disponível no aproveitamento (H_t) e a vazão disponível no aproveitamento (Q_t) através dos dados obtidos pelas simulações do EPANET 2.0 pós instalação da BFT. A altura e vazão disponíveis no aproveitamento são os dados de entrada para a realização dos cálculos para ambos os métodos propostos.

Após a determinação dos dados de entrada, os mesmos foram transportados para o Excel juntamente com as equações necessárias para selecionar a bomba através dos métodos de Viana e Chapallaz conforme anexo I e os gráficos necessários para as etapas de seleção da bomba foram plotados no Excel.

3.3.5.1 ALTURA DISPONÍVEL NO APROVEITAMENTO (HT)

A metodologia para se determinar a altura disponível de projeto consiste em calcular a variação de pressão média em relação ao nó a jusante do trecho de instalação da BFT (nó 8). Para isso traçou-se a curva de pressão do nó na simulação inicial e na simulação posterior a instalação do equipamento conforme a Figura 22.

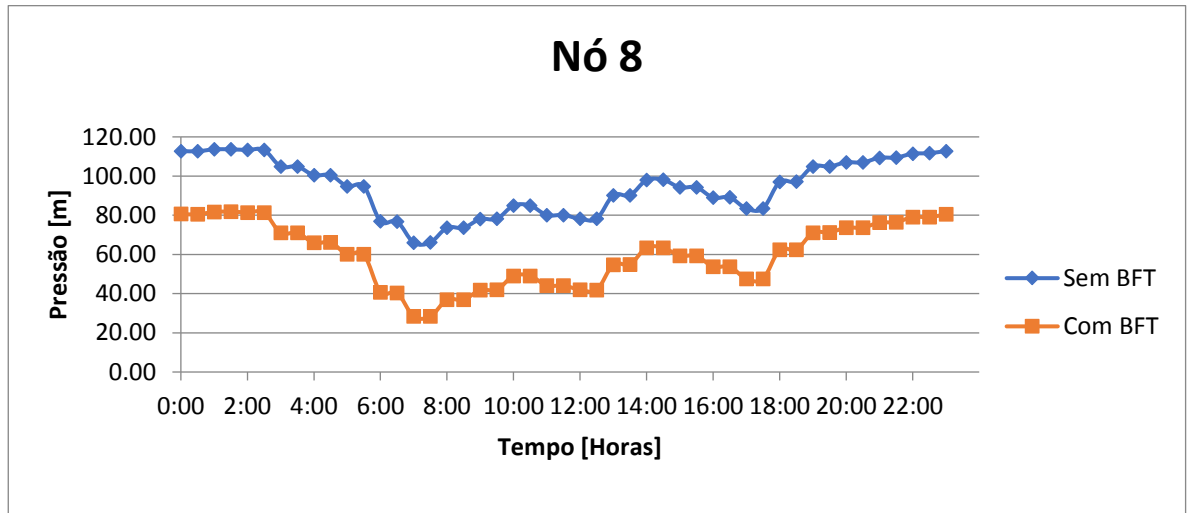


Figura 22: Gráfico de pressões do nó 8

Posteriormente calculou-se a variação da pressão ponto a ponto e foi determinada a sua média considerada a altura disponível de projeto conforme a Figura 23. Por tanto:

$$H_t = 34,62\text{m}$$

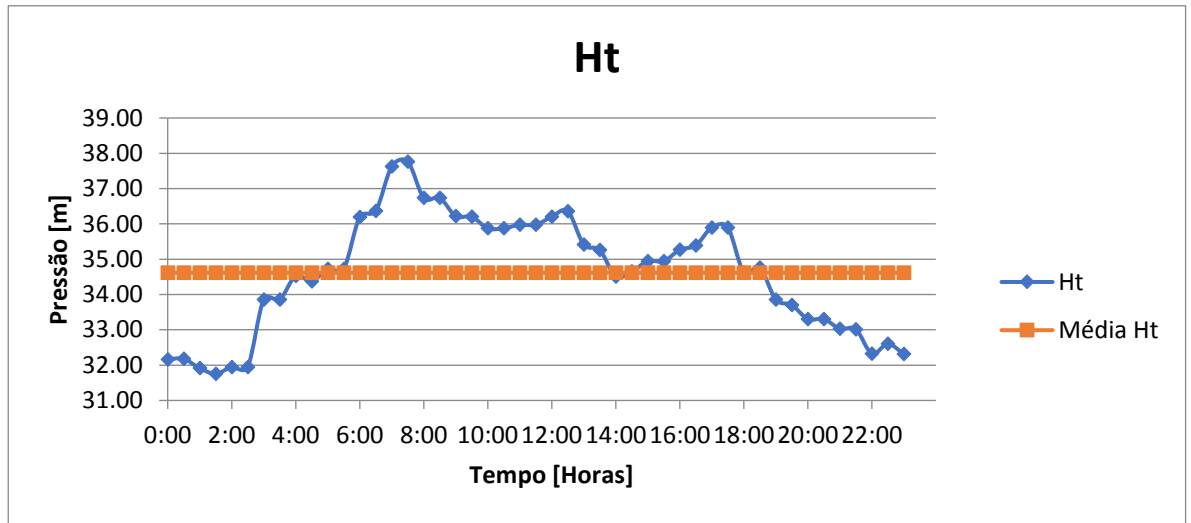


Figura 23: Gráfico de Ht

3.3.5.2 VAZÃO DISPONÍVEL NO APROVEITAMENTO (QT)

A vazão disponível no aproveitamento pode ser determinada diretamente através da média das vazões praticadas no trecho 31 onde foi instalada a BFT conforme a Figura 24. Portanto:

$$Q_t = 0,0072 \text{ m}^3/\text{s}$$

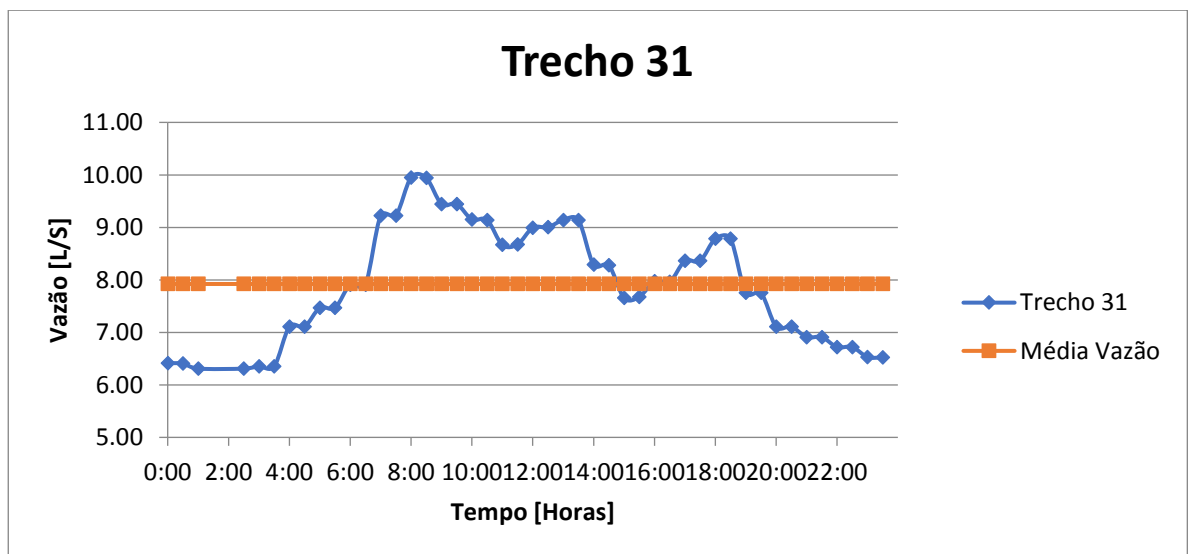


Figura 24: Vazões praticadas no trecho 31.

3.4 MÉTODOS DE SELEÇÃO DA BFT

Diversos estudos foram realizados ao longo dos anos por diferentes autores, a nível mundial, como mencionado no capítulo 2, com o objetivo de estudar o comportamento das BFT's e desenvolver métodos de seleção para aplica-las em sistemas de distribuição hídrica.

Os métodos considerados de maior confiabilidade, mais precisos e com melhores resultados são aqueles baseados na rotação específica da bomba, nos quais uma bomba com a mesma rotação específica irá operar em condições de altura e vazão similares como turbina. Entre os métodos estudados que utilizam a rotação específica, os mais utilizados em pesquisas e para fins acadêmicos são os dos autores Viana (1987) e Chapallaz (1992). Diante disto, estes métodos foram os selecionados para o nosso projeto.

Baseando-se em dados do aproveitamento energético, ou seja, altura e vazão disponíveis no local em que a BFT será instalada, é possível selecionar uma bomba para operar como turbina através dos métodos propostos. Os valores para a altura (Ht) e vazão (Qt) do local de aproveitamento foram obtidos através da simulação realizada pelo software EPANET 2.0. Para os cálculos de ambos os métodos, as fórmulas desenvolvidas pelos autores foram calculadas com auxílio do Excel.

3.4.1 MÉTODO VIANA

Neste método, através das equações desenvolvidas, com base nos valores de vazão (Qt) e altura (Ht) do aproveitamento, obtidos através da simulação, e de posse dos valores da rotação da bomba dos fabricantes, encontra-se a rotação específica da BFT, com a definição da rotação específica, encontram-se os valores dos coeficientes de altura e vazão da BFT. Tais coeficientes foram obtidos experimentalmente pelo autor e nos trabalhos de Kittredge (1961) e Buse (1981). Com os coeficientes determinados, calcula-se a altura e vazão da BFT. Por fim, é realizado um ajuste na altura e vazão encontradas a fim de considerar as rotações encontradas nos catálogos de fabricantes através das Leis de semelhança.

Para as bombas comerciais são adotadas rotações do eixo (n_t) de 3600 rpm e 1800 rpm, por aspectos econômicos, pois quanto maior a rotação da bomba menor o custo. As rotações de eixo das bombas são encontradas em catálogos de fabricantes.

A rotação específica possui função importante para a seleção da BFT, é a grandeza que define a geometria e o tipo de rotor da bomba. Seu cálculo é efetuado aliando-se os três parâmetros mais importantes de uma bomba de fluxo, ou seja, a vazão, altura total de elevação e a rotação.

O método do autor Viana possui limitação quanto à rotação específica (n_{qA}), a mesma deve estar na faixa de 40 a 200 rpm o que restringe a seleção das bombas à família das bombas centrífugas ou radiais. Quanto a potência hidráulica, o seu limite é de 50 kW o que corresponde a potência de uma microcentral hidroelétrica.

A Figura 25 mostra a família da bomba de acordo com a faixa de rotação específica (n_{qA}) encontrada.

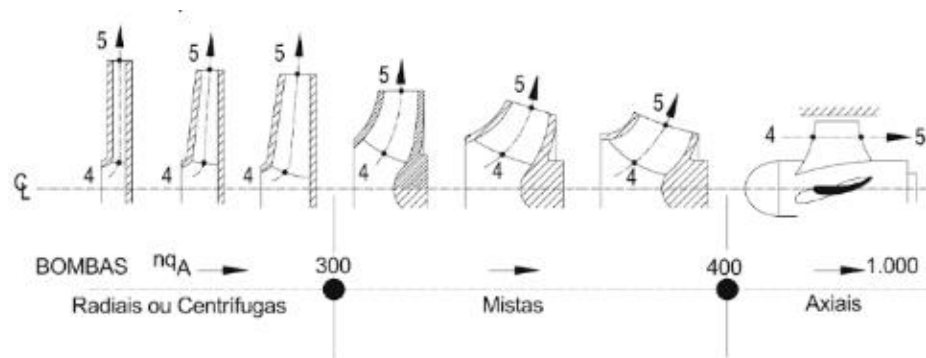


Figura 25: Faixas de rotação específicas das bombas – Viana (1987).

3.4.1.1 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DO PROJETO: MÉTODO VIANA

Com conhecimento dos valores de vazão e altura do aproveitamento e da rotação de eixo, calcula-se a rotação específica da bomba através da equação 3.8:

$$n_{qA} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{3/4}} \cdot 10^3 \quad (3.8)$$

Em que:

n_{qA} : rotação específica da BFT [rpm];

n_t : rotação de eixo da bomba [rpm];

Q_t : vazão disponível no aproveitamento [m³/s];

g : aceleração da gravidade [m/s²];

H_t : altura disponível no aproveitamento [m].

De acordo com a equação 3.8, para rotação de eixo de 3600 rpm, $H_t = 34,62$ m, $Q = 0,0072$ m³/s, obtidos através da simulação no EPANET 2.0, a rotação específica da bomba será:

$$n_{qA1} = 4049,7 > 200 \text{ rpm}$$

Como o valor encontrado para a rotação específica é maior que o limite permitido pelo método, é preciso recalcula-la, para uma rotação de eixo menor. Assumindo a rotação do eixo da

bomba igual a 1800 rpm e para $H_t = 34,62$ m e $Q_t = 0,0072$ m³/s, o novo valor para a rotação específica da bomba será:

$$n_{qA2} = 2024,8 > 200 \text{ rpm}$$

Como a rotação específica da bomba encontrada para ambas as rotações de eixo (3600 rpm e 1800 rpm) está acima da máxima admissível de 200 rpm, o método do autor Viana foi descartado para fins de projeto, já que não será possível determinar a família da bomba.

Apesar de o método ter sido desconsiderado para o trabalho, seguem abaixo os próximos passos que deveriam ser tomados para a seleção da BFT, caso o valor encontrado estivesse dentro da faixa permitida de rotação específica.

Com o valor obtido para a rotação específica (dentro da faixa permitida), os coeficientes de vazão e altura da bomba poderiam ser obtidos com base na Figura 26, na qual são utilizadas bombas com rotação específica até 200 rpm, ou seja, rotores radiais ou centrífugos.

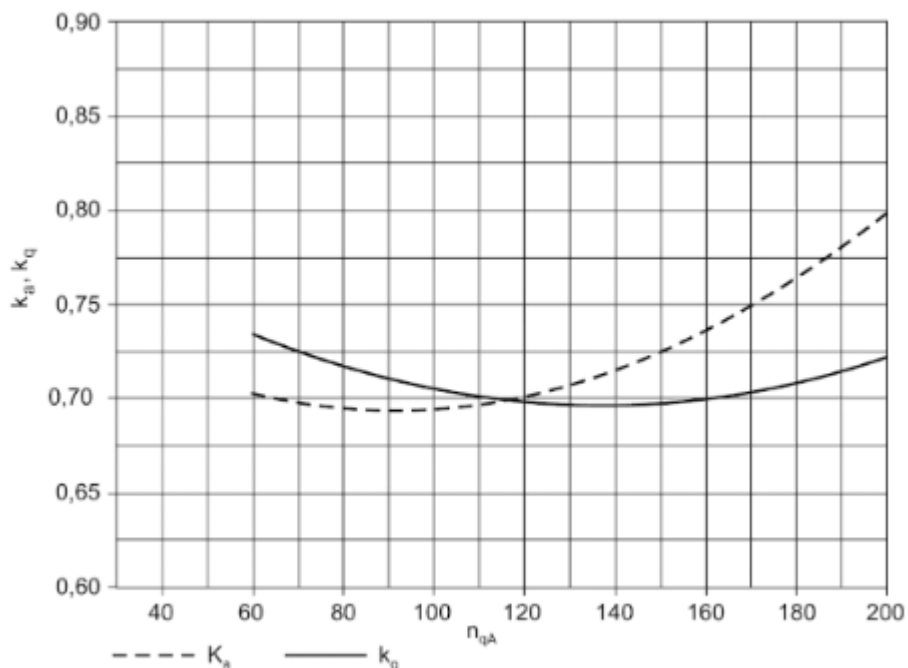


Figura 26: Coeficientes de vazão e altura – Viana (1987)

Após da determinação dos coeficientes e de posse da altura e da vazão disponíveis no aproveitamento energético, seriam encontradas a altura e a vazão da bomba pelas equações (3.9) e (3.10):

$$H_b = c_H \cdot H_t \quad (3.9)$$

$$Q_b = c_Q \cdot Q_t \quad (3.10)$$

Em que:

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

c_H : coeficiente de altura [adimensional];

H_t : altura disponível no aproveitamento [m];

Q_b : vazão da bomba que será utilizada como turbina [m³/s];

c_Q : coeficiente de vazão [adimensional];

Q_t : vazão disponível no aproveitamento [m³/s].

È importante ressaltar que os catálogos de fabricantes não possuem as rotações de 1800 rpm e 3600 rpm para as BFB's, uma vez que as bombas convencionais operam abaixo dessa faixa de rotação devido a velocidade dos motores assíncronos. Geralmente, as rotações dos catálogos de fabricantes estão em torno de 1750 rpm e 3500 rpm. Visto isso, os valores para a altura e

vazão encontrados devem ser corrigidos e encontrados para rotação existente nos catálogos. Tal correção, é realizada, utilizando as Leis de Semelhança determinadas pelas equações 3.11 e 3.12:

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot H_b \quad (3.11)$$

$$Q_{ob} = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b \quad (3.12)$$

Em que:

H_{ob} : altura referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante 1750 rpm ou 3500 rpm [m];

n_{ob} : velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante 1750 rpm ou 3500 rpm [rpm];

n_b : velocidade da bomba 1800rpm ou 3600rpm [rpm];

H_b : altura da bomba que será utilizada como turbina referente às velocidades de 1800rpm ou 3600rpm [rpm];

Q_{ob} : vazão referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m³/s];

Q_b : vazão da bomba que será utilizada como turbina referente às velocidades de 1800 ou 3600rpm [m³/s].

Realizados estes procedimentos, o último passo seria selecionar a bomba, através dos catálogos de fabricantes. O rendimento da BFT é considerado igual ao da bomba no ponto selecionado, logo deve-se escolher a bomba que possua o melhor rendimento possível.

3.4.2 MÉTODO CHAPALLAZ

O método desenvolvido por Chapallaz parte do mesmo princípio do método do autor Viana, determinar a altura e vazão de bombas presentes em catálogos de fabricantes para operarem em reverso. Primeiramente, Chapallaz (1992) realiza uma pré-seleção e determina o tipo de bomba a ser utilizada através de um gráfico altura disponível versus vazão disponível no local de instalação da BFT em função das linhas com os dados de potência da BFT. Após a seleção do tipo de bomba, iniciam-se os cálculos a partir de equações desenvolvidas para determinar a bomba a ser utilizada de acordo com os dados de altura e vazão do aproveitamento determinados pela simulação no EPANET 2.0.

De posse do valor da rotação da bomba, calcula-se a rotação específica da BFT, com base no valor obtido, calcula-se a rotação específica da bomba. Posteriormente, é realizada a estimativa da vazão da bomba, com base na vazão do aproveitamento. Feito isto, determina-se graficamente a curva de rendimento em função da rotação específica e vazão nominal da bomba. Conhecida a rotação específica da bomba e o seu rendimento, determinam-se os coeficientes de altura e vazão através de análise gráfica. Em seguida, com os valores dos coeficientes, calcula-se a altura e vazão da bomba. Por fim, são realizados os cálculos de correção dos valores obtidos para a altura e vazão da bomba a fim de considerar as rotações encontradas nos catálogos de fabricantes.

O método de seleção de Chapallaz (1992), é aplicável a uma faixa maior de rotação específica, abrangendo toda a faixa de rotação até 1000 rpm. Diante disto, apresenta resultados desde as bombas radiais ou centrífugas, mistas, até as axiais. A potência hidráulica é um parâmetro que varia desde 1 KW até 1000 KW.

Para as bombas comerciais, são adotadas rotações de eixo (n_t) de 3600 e 1800 rpm, por aspectos econômicos, de forma semelhante ao método de Viana (1987).

3.4.2.1 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DO PROJETO: MÉTODO CHAPALLAZ

Baseando-se na altura e na vazão disponíveis no aproveitamento: $H_t = 34,62\text{m}$ e $Q_t = 0,0072\text{ m}^3/\text{s}$, realiza-se a pré-seleção da bomba, de acordo com a análise do gráfico da Figura 27.

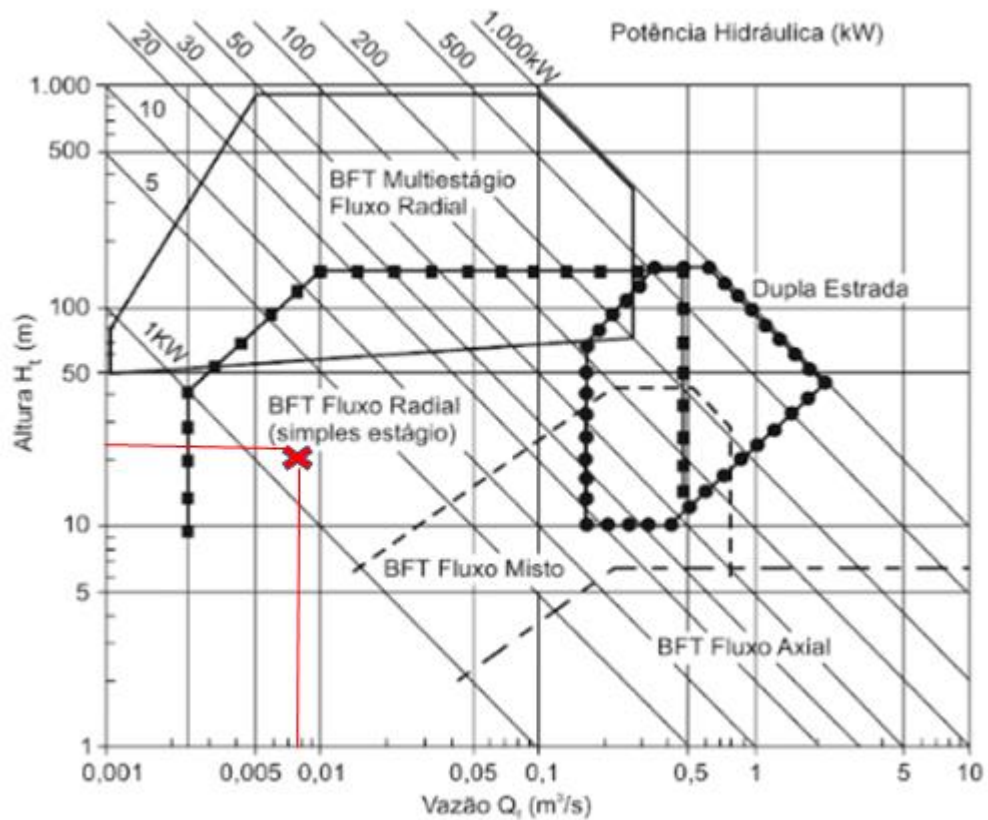


Figura 27: Gráfico de pré-seleção da BFT, adaptado de Chapallaz (1992).

Conclui-se que a família da bomba é a de bombas centrífuga ou fluxo radial.

Após selecionar o tipo de bomba a ser utilizada e adotar o valor da rotação da BFT igual a 3600, calcula-se a rotação específica (n_{qt}) da BFT pela equação 3.13:

$$n_{qt} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{3/4}} \quad (3.13)$$

➤ Para: $H_t = 34,62\text{m}$ e $Q_t = 0,0072 \text{ m}^3/\text{s}$

$$n_{qt} = 22,45 \text{ rpm}$$

Em que:

n_{qt} : rotação específica da BFT no Sistema Internacional [rpm];

n_t : rotação da BFT [rpm];

Q_t : vazão disponível no aproveitamento (BFT) [m^3/s];

H_t : altura disponível no aproveitamento (da BFT) [m].

A partir do valor obtido para rotação específica da BFT (n_{qt}), determina-se a rotação específica da bomba através da equação 3.14 obtida experimentalmente.

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (3.14)$$

➤ Para: $n_{qt} = 22,45 \text{ rpm}$

$$n_{qb} = 25,22 \text{ rpm}$$

Em que:

n_{qb} : rotação específica da bomba[rpm];

n_{qt} : rotação específica da BFT [rpm]; calculada de acordo com a equação (3.13).

Em seguida, estima-se a vazão nominal da bomba em função da vazão do aproveitamento, através da equação (3.15):

$$Q_n = \frac{Q_t}{1,3} \quad (3.15)$$

➤ Para $Q_t = 0,0072 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q_{nb} = 0,0061 \text{ m}^3/\text{s}$$

Em que:

Q_n : vazão nominal da bomba [m^3/s];

Q_t : vazão disponível no aproveitamento [m^3/s].

Esta equação é apenas uma estimativa da vazão da bomba Chapallaz (1992), para que seja feita uma pré-seleção da máquina. O coeficiente 1,3 é chamado de fator de conversão médio.

A partir dos valores obtidos para a rotação específica da bomba (n_{qb}) e de sua vazão estimada, é determinado o rendimento da bomba de acordo com a Figura 28 que representa a eficiência máxima da bomba em função da vazão nominal da bomba e rotação específica obtida de forma experimentalmente.

➤ Para: $Q_{nb} = 0,0061 \text{ m}^3/\text{s}$ e $n_{qb} = 25,22 \text{ rpm}$

Por critério de aproximação, após devida análise das coordenadas x e y do gráfico, foi considerado que o rendimento da bomba equivale ao da curva de 0,65 que equivale a 65%.

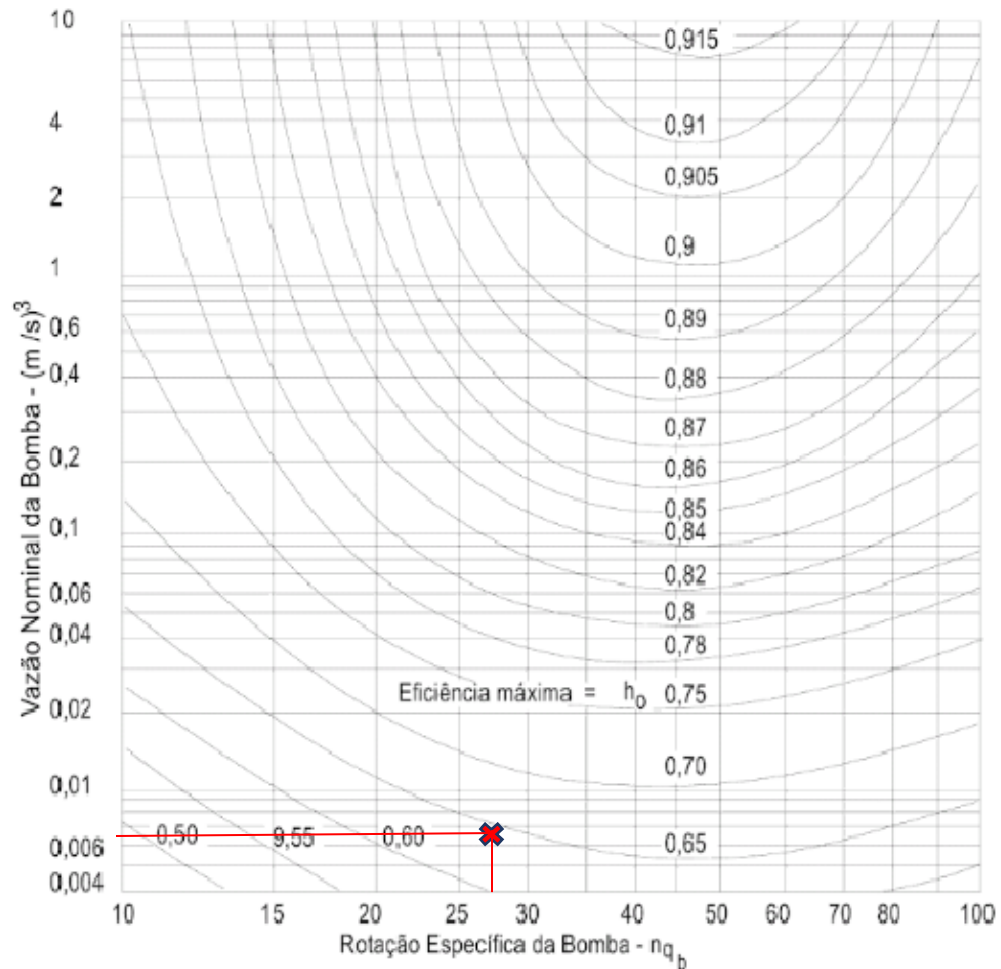


Figura 28: Estimativa de rendimento da BFT, adaptado de Chapallaz (1992)

Com os valores da rotação específica da bomba e o rendimento da bomba, que será considerado igual ao da BFT, determinam-se através das Figuras 29 e 30 os coeficientes de altura e vazão da bomba.

- Para: rendimento = 65% e $n_{qb} = 25,22$ rpm

Aproxima-se o valor de 65% de rendimento para a curva em vermelho correspondente a 70% de rendimento para a determinação dos coeficientes de altura e vazão.

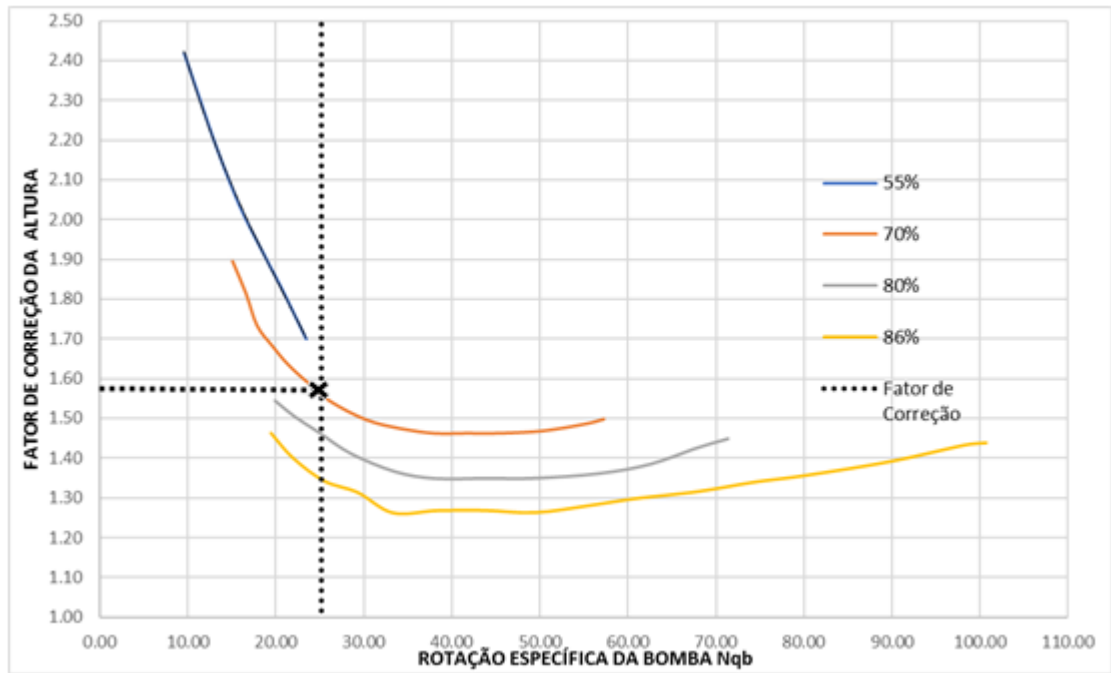


Figura 29: Coeficientes de altura de Chapallaz (Fonte: Autores)

$$c_H = 1,57$$

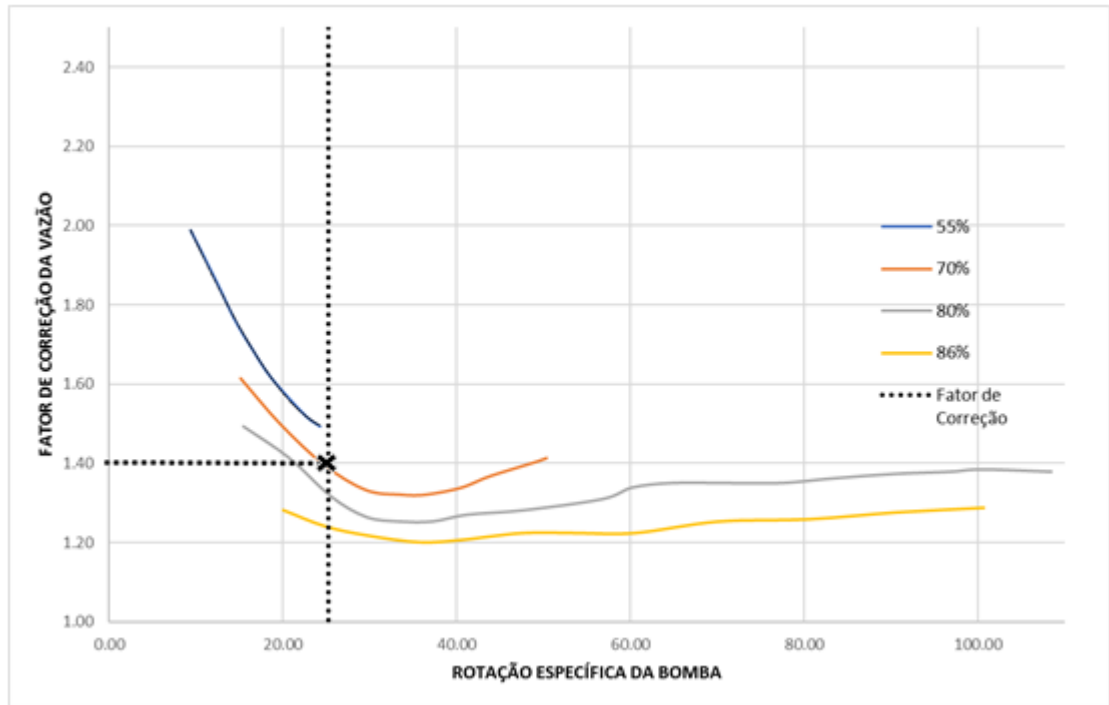


Figura 30: Coeficiente de vazão de Chapallaz. (Fonte: Autores)

$$c_Q = 1,4$$

Com os valores dos coeficientes e de posse dos valores de Q_t e H_t do aproveitamento, são calculadas a altura e vazão da bomba através das equações 3.16 e 3.17.

- Para $H_t = 34,62\text{m}$ e $Q_t = 0,0072 \text{ m}^3/\text{s}$
- Para: $c_H = 1,57$ e $c_Q = 1,4$

$$H_b = \frac{H_t}{c_H} \quad (3.16)$$

$$H_b = 22,05\text{m}$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{c_Q} \quad (3.17)$$

$$Q_b = 0,0054 \text{ m}^3/\text{s}$$

Em que:

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

c_H : coeficiente de altura [adimensional];

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

Q_b : vazão da bomba que será utilizada como turbina [m³/s];

c_Q : coeficiente de vazão [adimensional];

Q_t : vazão disponível no aproveitamento (BFT) [m³/s].

Com os valores obtidos para altura e vazão da bomba, é realizada a correção dos mesmos para a rotação 3500 rpm, presente no catálogo do fabricante, através das Leis de semelhança, segundo as equações 3.11 e 3.12.

- Para $H_t = 34,62\text{m}$ e $Q_t = 0,0072 \text{ m}^3/\text{s}$
- $n_{ob} = 3500 \text{ rpm}$ e $n_b = 3600 \text{ rpm}$

$$H_{ob} = 20,84\text{m}$$

$$Q_{ob} = 0,0052\text{m}^3/\text{s}$$

Com os valores corrigidos, seleciona-se no catálogo, a bomba que possua melhor rendimento possível. As Figuras 31 e 32 mostram o catálogo Schneider Motobombas utilizado para selecionar a bomba e a bomba centrífuga selecionada para o projeto, respectivamente.

Motobombas Centrífugas Monoestágio
BC-23 - Rotor fechado

Aplicações Gerais:
Irrigação, abastecimento predial, sistemas de refrigeração, sistemas de prevenção e combate a incêndio, indústrias.

MODELO	Potência (cv)	Monofásico	Trifásico	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Pressão máxima sem vazão (m.c.a.)	Altura máxima de sucção (m.c.a.)	Ø Rotor (mm)	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS																								
									Altura Manométrica Total (m.c.a.)																								
BC-23 R 1 1/4	12,5	x	x	2	1 1/4	72	8	197	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	66	70	74	78	82	86	90	94	98	102	106	110	114	
	15	x	x	2	1 1/4	81	8	208	*	*	*	*	41,0	39,9	38,6	37,3	36,0	34,6	25,5	20,5													
	20	x	x	2	1 1/4	98	8	228	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	43,8	41,6	39,1	36,5	33,6	30,3	26,3	21,1						
	25	x	x	2	1 1/4	112	8	245	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	43,6	41,4	39,0	36,5	33,7	30,6	27,1	22,9	17,1		
	30	x	x	2	1 1/4	117	8	250	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	45,0	42,9	40,7	38,2	35,6	32,7	29,5	25,8	21,1	14,0	

MODELO	Potência (cv)	Monofásico	Trifásico	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Pressão máxima sem vazão (m.c.a.)	Altura máxima de sucção (m.c.a.)	Ø Rotor (mm)	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS																								
									Altura Manométrica Total (m.c.a.)																								
BC-23 R 1 1/2	15	x	x	2 1/2	1 1/2	67	8	193	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	90	94	98	
	20	x	x	2 1/2	1 1/2	80	8	209	*	*	48,8	46,3	43,7	41,0	38,0	34,7	30,9	26,6	43,8	41,0	38,0	34,6	30,8	26,4									
	25	x	x	2 1/2	1 1/2	88	8	225	*	*	61,3	59,5	57,5	55,5	53,4	51,1	48,8	46,4	52,6	50,5	48,2	45,9	43,4	40,7	37,8	34,6	31,0	26,7					
	30	x	x	2 1/2	1 1/2	103	8	240	*	*	*	*	*	*	*	58,4	56,6	54,6	52,6	50,5	48,2	45,9	43,4	40,7	37,8	34,6	31,0	26,7					

MODELO	Potência (cv)	Monofásico	Trifásico	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Pressão máxima sem vazão (m.c.a.)	Altura máxima de sucção (m.c.a.)	Ø Rotor (mm)	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS																								
									Altura Manométrica Total (m.c.a.)																								
BC-23 R/F 2	15	x	x	3	2	55	8	177	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	54	58	62	66	70	74	78	82	
	20	x	x	3	2	65	8	192	*	*	106	103	100	97,4	94,3	91,2	87,9	84,5	80,8	76,9	72,7	68,2	63,2	57,5	50,7								
	25	x	x	3	2	73	8	207	*	*	*	*	*	*	109	107	104	101	98,3	95,2	92,0	88,7	85,2	81,5	77,5	68,6	57,5	40,7					
	30	x	x	3	2	86	8	225	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	106	103	99,9	96,7	93,5	90,1	82,9	74,9	65,8	55,2	41,5				

Figura 31: Catálogo com a bomba selecionada (Fonte: Schneider Motobombas)

MODELO	Potência (cv)	Monofásico	Trifásico	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Pressão máxima sem vazão (m.c.a.)	Altura máxima de sucção (m.c.a.)	Ø Rotor (mm)
BC-23 R 1 1/4	12,5	x	x	2	1 1/4	72	8	197
	15	x	x	2	1 1/4	81	8	208
	20		x	2	1 1/4	98	8	228
	25		x	2	1 1/4	112	8	245
	30		x	2	1 1/4	117	8	250

Figura 32: Bomba selecionada (Fonte: Schneider Motobombas)

Outros catálogos de bomba foram cogitados para se encaixar no trabalho como o KSB *Meganorm*. Entretanto, ao analisar o gráfico para determinar o rendimento da bomba através da vazão corrigida encontrada pelo método Chapallaz de $Q_{ob} = 0,0052\text{m}^3/\text{s}$, que equivale a $18,72\text{ m}^3/\text{h}$, não conseguimos chegar a uma linha de rendimento correspondente a este valor de vazão. Diante disso, a seleção de bomba por este catálogo foi descartada, conforme mostrado na Figura 33.

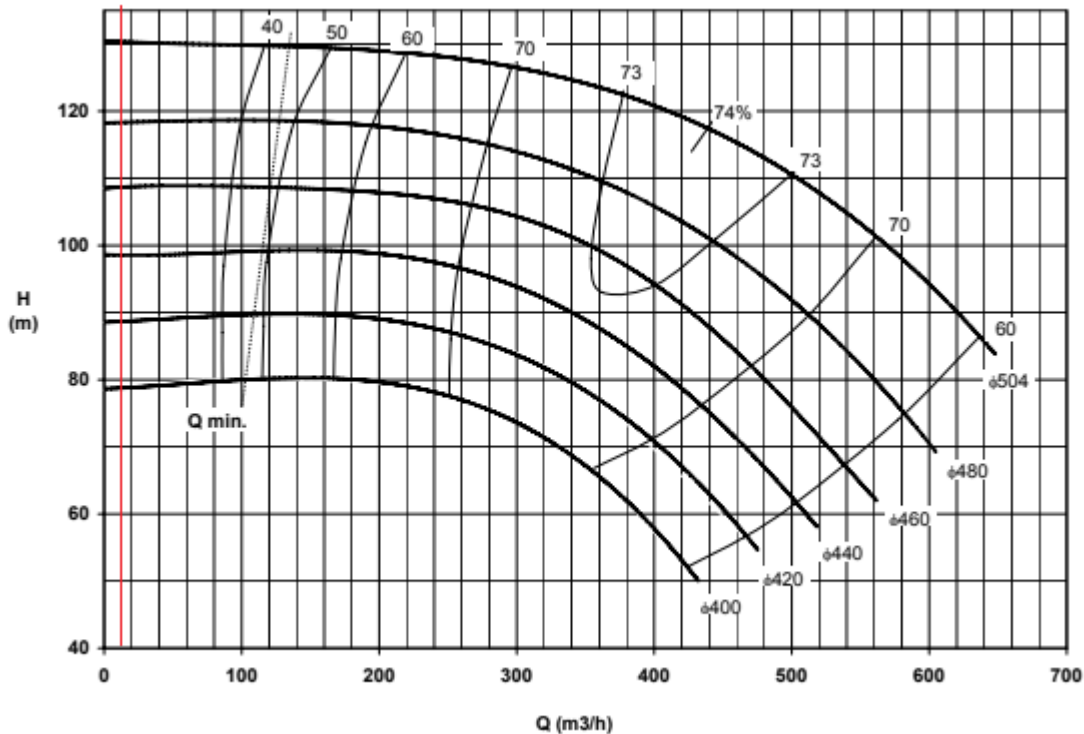


Figura 33: Curva de rendimento da bomba KSB

Com base no catálogo do fabricante utilizado e na bomba selecionada com potência de 30 cv, determina-se então o rendimento da BFT, utilizando a vazão corrigida $Q_{ob} = 18,72\text{ m}^3/\text{h}$, pelo gráfico da Figura 34.

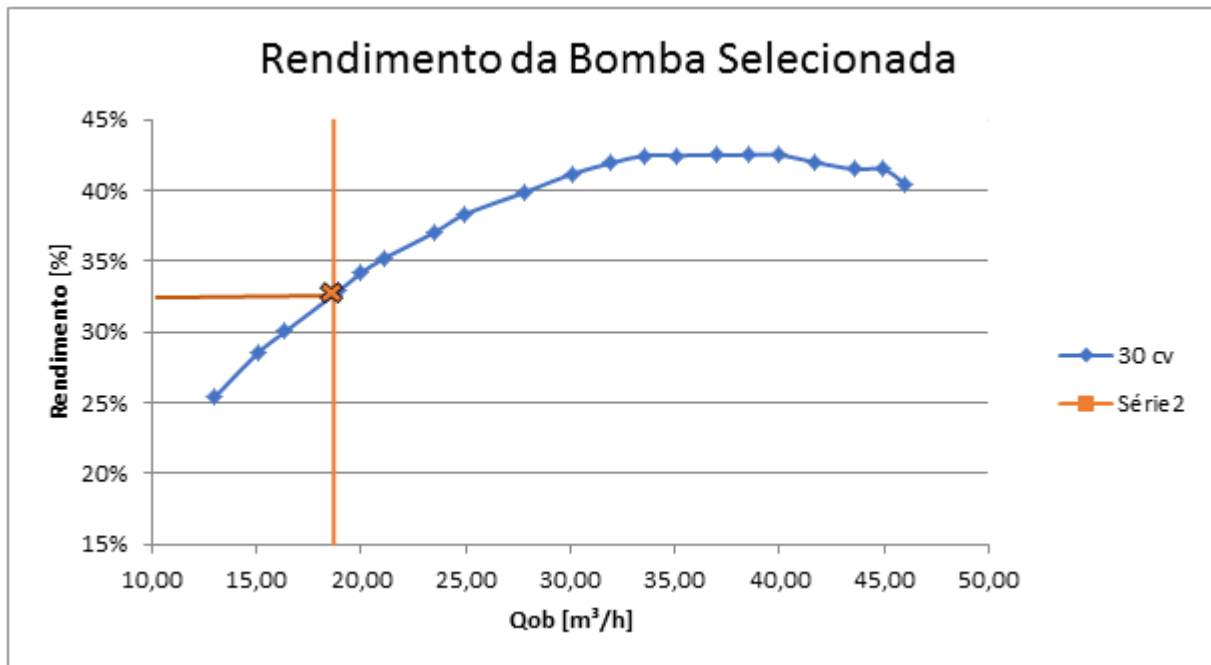


Figura 34: Curva de rendimento da BFT

De acordo com o gráfico, para uma vazão corrigida de $0,0052 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $18,72 \text{ m}^3/\text{h}$ e potência de 30 cv, o rendimento da BFT é de 33%.

Dessa maneira, para se determinar a potência gerada pela BFT ainda restam duas incógnitas a serem descobertas, a perda de carga média provocada pela BFT e a Vazão média de trabalho da BFT de acordo com a equação 3.6.

Para se determinar a perda de carga média é necessário definir a curva da perda de carga em função da vazão e então determinar o ponto de interseção entre a vazão disponível no aproveitamento ($Q_t = 28,51 \text{ m}^3/\text{h}$) e a curva da perda de carga de acordo com a Figura 35. Dessa forma:

$$H = 35,5\text{m}$$

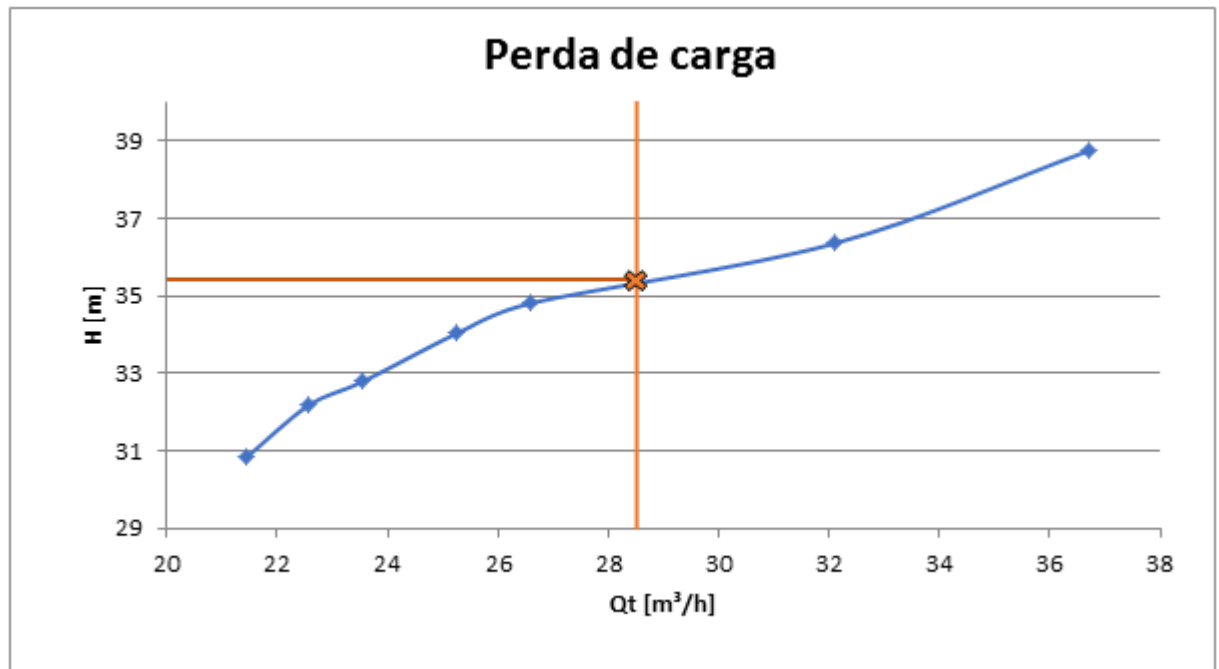


Figura 35: Gráfico da perda de carga em função da vazão

Por tanto, de acordo com a equação 3.6, multiplicada pelo rendimento, temos que:

$$Ph = 0,91 \text{ KW}$$

Partindo dos valores obtidos para rotação específica da bomba (n_{qb} e n_{qb}) e da BFT (n_{qt}) assim como da altura e vazão do aproveitamento foi criada a Tabela 11.

Tabela 11: Tabela com os valores obtidos

Método	n_{qb} [rpm]	n_{qt} [rpm]	H_{ob} [m]	Q_{ob} [m³/s]	Ph [Kw]
Chapallaz	25,22	22,45	20,84	0,0052	0,91

3.4.3 CAVITAÇÃO

A cavitação é caracterizada pela formação de bolhas de vapor no interior dos sistemas hidráulicos, causada pelo abaixamento de pressão entre a linha de sucção e a entrada do rotor da bomba. Essas bolhas são levadas no lado côncavo das pás em locais de maior pressão onde ocorrerá a implosão delas e poderá ser arrancado material no local de ocorrência.

Tal fenômeno ocorre majoritariamente em bombas hidráulicas e pode causar erosão, desgaste de componentes da bomba, danos na carcaça e no rotor da bomba além de causar queda no rendimento da bomba. Diante disso, é fundamental evitar que ocorra cavitação na BFT a ser utilizada no projeto.

A altura geométrica de sucção (H_s) de uma bomba corresponde a distância vertical do centro do eixo da bomba até o nível do líquido no reservatório de sucção. Caso a altura geométrica de sucção (H_s) for positiva (bomba não afogada), o nível do líquido no reservatório de sucção está abaixo do centro da bomba. Se altura geométrica de sucção (H_s) der negativa (bomba afogada), o nível do líquido no reservatório de sucção está acima do centro da bomba. As Figuras 36 e 37 ilustram a altura geométrica de sucção positiva e negativa.

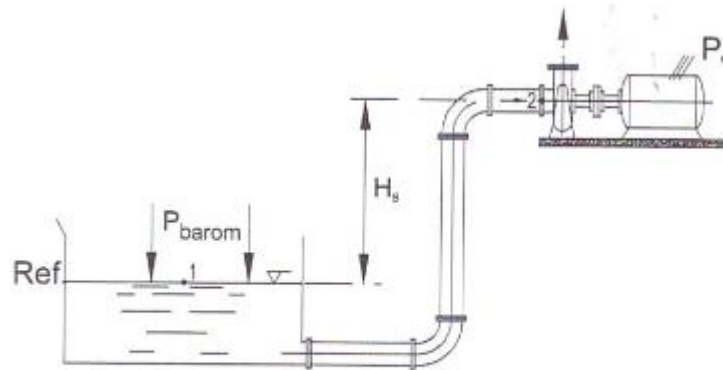


Figura 36: Altura geométrica de sucção positiva. (Fonte: Livro Viana)

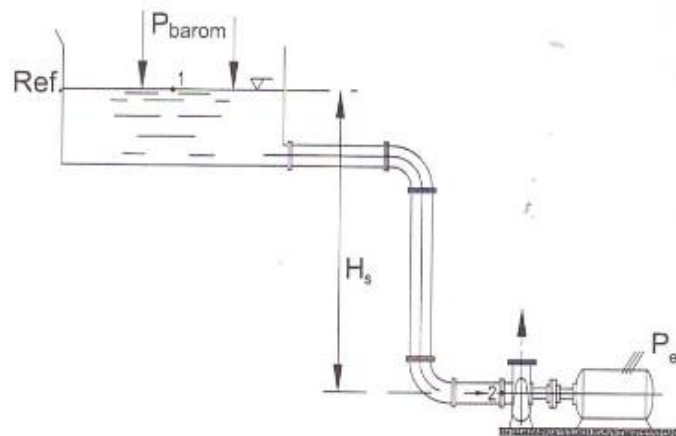


Figura 37: Altura geométrica de sucção negativa. (Fonte: Livro Viana)

Para evitar que ocorra a cavitação deve-se calcular a altura geométrica de sucção, e a altura de projeto não deve exceder a altura geométrica encontrada, evitando assim que ocorra cavitação na bomba operando como turbina. Para ambos os métodos o cálculo da altura geométrica de sucção é realizado através da equação 3.18.

A altura geométrica de sucção pode ser calculada de acordo com a equação 3.18:

$$H_s = H_b - \sigma \cdot H = 10 - 0,00122 \cdot A - \sigma \cdot H_t \quad (3.18)$$

Em que:

H_s : altura geométrica de sucção [m];

H_b : altura referente a pressão barométrica ou atmosférica no nível de jusante [m];

A : altitude local (nível de jusante) [m];

σ : Coeficiente de Thoma [adimensional];

H_t : altura de queda líquida da turbina [m].

No trabalho de Viana (1987), como foi considerada uma turbina de Francis, o coeficiente de cavitação de Thoma, para bombas centrífugas, é dado pela equação 3.19:

$$\sigma = 0,025 \cdot (1 + 10^{-4} \cdot n_{qA}^2) \quad (3.19)$$

Em que:

σ : Coeficiente de cavitação de Thoma [adimensional];

n_{qA} : rotação específica no sistema internacional [rpm]

Para o método de Viana, a cavitação não será determinada, uma vez que o limite de rotação específica estipulado pelo método é igual a 200 rpm e o mesmo foi ultrapassado tanto para a rotação de eixo de 3600 rpm quanto para a de 1800 rpm. Sendo assim, a cavitação será calculada apenas para o método proposto por Chapallaz.

O coeficiente de cavitação de Thoma proposto por Chapallaz (1992) para BFT's é determinado pela Figura 38 em função do valor para a rotação específica da BFT encontrado e está localizado na região entre os valores de coeficientes das BFB's e os coeficientes das turbinas, ou seja, na região definida como BFT's.

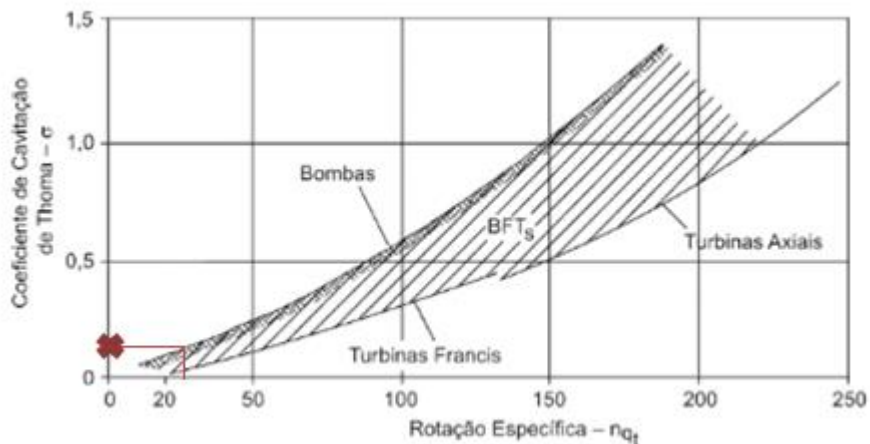


Figura 38: Coeficiente de cavitação das turbinas, bombas e BFT's. – Adaptado de chapallaz,1992.

- Para $n_{qt} = 22,45$ rpm
- Considerando a região do gráfico de BFT's

$$\sigma = 0,09$$

De posse dos valores do coeficiente Thoma para o Chapallaz, calcula-se a altura máxima de sucção da bomba para ambos os métodos segundo a equação 3.18:

$$H_s = H_b - \sigma \cdot H = 10 - 0,00122 \cdot A - \sigma \cdot H_t$$

$$H_s = 10 - 0,00122 \cdot 650 - 0,09 \cdot 34,62$$

$$H_s = 6,0912 \text{ m}$$

Desta forma, a altura de sucção da bomba não deve exceder os valores encontrados para H_s para o método Chapallaz, garantindo assim que não ocorra cavitação

3.4.4 CUSTOS DA BFT

Nesta seção iremos expor os custos da BFT selecionada. O valor de aquisição da bomba centrífuga BC-23 R 1 ¼ 30 c.v., da Schneider é de R\$ 9.769,29.

As bombas possuem manutenção mais simples e suas peças são fabricadas em série, devido à grande demanda de utilização quando comparadas às turbinas. Outro ponto importante

de se ressaltar, é que uma bomba não é um equipamento de difícil manipulação, logo é fácil encontrar profissionais aptos para a manipulação de bombas. A manutenção das mesmas, pode ser calculada como 5% do valor de aquisição da bomba.

Através do potencial hidráulico calculado para a BFT de 0.91 KW, que convertido equivale a 655 kWh/mês. Calculando em reais, de acordo com valores obtidos pela tarifa industrial da Light, seriam R\$ 610,39 por mês de desconto na energia. E o retorno completo do investimento da BFT seria após 18 meses.

A Tabela 12 mostra os valores de aquisição, manutenção anual e a potência hidráulica calculada para a BFT.

Tabela 12: Informações da BFT selecionada.

Bomba Centrífuga BC-22 R2 30 c.v.	
Valor de aquisição	R\$ 9.769,29
Manutenção anual	R\$ 488,46
Energia produzida por mês	R\$ 610,39
Retorno do investimento	18 meses

Como visto nos cálculos da BFT, seu potencial energético não é tão alto para que se possa comparar com uma turbina. Entretanto, em hipótese de potenciais energéticos parecidos, mesmo que sejam utilizadas duas ou mais BFT's em série, o custo de aquisição da turbina pode chegar a quatro vezes mais do que o de BFT's. A manutenção da turbina, é mais complexa se comparada a de uma BFT, uma vez que as peças são fabricadas de forma unitária e em alguns casos, sob medida. Tal processo de fabricação requer um profissional mais qualificado e com maiores conhecimentos técnicos para realizar essa função.

A conclusão que podemos tirar, tendo uma comparação de potenciais energéticos equivalentes, é que o preço de custo e aquisição da BFT é menor em relação à turbina.

4) CONCLUSÃO

Após as simulações no sistema de abastecimento, conclui-se que a utilização da BFT em questão para o controle das pressões, em um sistema de abastecimento com altos desníveis energéticos, não é tão eficaz de acordo com o gráfico da Figura 22. Foi visto que mesmo com a sua utilização, na maior parte do tempo de operação a rede permanece com pressões acima das estabelecidas pela NBR 212218.

Em relação a energia gerada conclui-se que as BFT's são de fato uma alternativa para a geração de energia, porém não em níveis elevados. Mesmo com um sistema de abastecimento de certa forma com alto potencial de geração de energia com potência de 0,91 kW. A geração de energia é influenciada também pelo tempo de operação da BFT, admitindo que a BFT opere 24 horas por dia durante 30 dias no mês, com o rendimento calculado, a energia gerada seria de 648 kWh/mês. Caso fosse revertida para a rede com o mesmo valor de tarifa industrial da Light para a categoria não residencial trifásica o desconto na conta poderia ser de R\$ 603,87. O que pagaria o custo do projeto em cerca de 18 meses.

Pode-se concluir também que para as duas situações o retorno esperado não é tão satisfatório justamente pela falta de estudos e avanço na tecnologia em relação ao uso de BFT's. De maneira geral as BFT's podem servir para determinadas práticas como o controle de pressões e geração de energia no sistema de abastecimento, porém não serão tão eficazes quanto a utilização de válvulas redutoras de pressão e turbinas de geração de energia.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Avaliando o sistema de abastecimento estudado, foram levantadas algumas sugestões para melhorar o controle de pressões e a geração de energia da BFT.

Existe a possibilidade da geração de energia em série nos casos onde as pressões são demasiadamente altas, não chegando aos níveis de operação regidos pelas normas vigentes, pode-se instalar múltiplas BFT's em série até que esse nível seja alcançado.

Para situações onde a perda de carga faz com que a baixa pressão em certos pontos do sistema seja inferior a 10 m.c.a, em determinados momentos de demanda, pode-se instalar um

sistema de controle em paralelo com a BFT criando um by-pass para que nesses momentos a BFT não seja acionada e as pressões permaneçam estabelecidas.

Além desses itens é interessante para verificar a viabilidade da implantação do equipamento um estudo de caso real onde se possa levantar a curva de perda de carga da operação da BFT, seus respectivos rendimentos e um mapeamento de riscos durante a sua operação.

No aspecto relacionado aos esforços do mecanismo, poderia ser feita também uma análise em laboratório do desgaste de seus componentes e uma verificação da viabilidade de substituição de peças para otimizar o seu rendimento.

5) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Daniel de Macedo Medeiros, A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica.2004; Itajubá;

[2] Adriano Filipe Monteiro Oliveira, Recuperação de energia hidráulica em sistemas de distribuição de água, junho de 2008; Porto.

[3] Gustavo Meirelles Lima, Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água. Universidade Federal de Itajubá.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012 (2012). Lex: Resolução Normativa ANEEL, Brasília, DF,abr. 2012.

NOGUEIRA, F. J. H.; Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas. Trabalho de Pesquisa; Departamento de Mecânica; EFEI; Itajubá, Março, 1990.

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

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

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

EPIA- European Photovoltaic Industry Association. Global Market Outlook for PhotovoltaicsUntil 2016, Bélgica, 2012

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

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

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

Tsutiya. M.T.,2006. Abastecimento de Água. 3ª Edição. São Paulo – SP. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006. 643 p.

Lima, G. M. Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água. 86 p. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia, Itajubá 2013.

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

NBR 12218/94 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público.

Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL – Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em 20 de maio de 2018.

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

Augusto Nelson Carvalho Viana, Fabio José Horta Nogueira, Bombas de fluxo operando como turbinas- procedimento de seleção.

Orlando A. AUDISIO, Bombas utilizadas como turbinas.

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

VIANA, A.N.C.; Bombas de Fluxo Operando como Turbinas - Por que não usá-las? PCH Notícias&SHP News; Ano 4; Num. 12; CERPCH; Itajubá; Nov.-Dez.-Jan.; 2002.

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

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

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

André Sandor Kajdacsy Balla Sosnoski, Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de água. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

IBGE, disponível em - <http://www.cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/nova-friburgo>. Acesso em 19/08/2018.

EOS, disponível em - <http://www.eosconsultores.com.br/epanet/>. Acesso em 18/08/2018.

Exame, disponível em- <https://exame.abril.com.br/negocios/dino/quem-foi-o-grande-responsavel-e-quando-surgiu-o-excel-shtml/>. Acesso em 27/08/2018.

Techtudo, Disponível em- <https://www.techtudo.com.br/dicas-e-tutoriais/noticia/2016/03/o-que-e-e-como-usar-vba-no-excel.html>. Acesso em 20/08/2018.

Ambiente Brasil, disponível em – <https://ambientes.ambientesbrasil.com.br/ecoturismo/destinos/>. Acesso em 10/08/2018.

BAPTISTA, V. B. S. Uso do EPANET 2.0 na Avaliação Hidráulica de Sistemas de Hidráulica de Sistemas de Irrigação por Pivô Central. 110 p. Dissertação para obtenção do título de mestre em Engenharia- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

NEVES E LEITE, Utilização do Simulador EPANET no Estudo de Sistemas Prediais de Abastecimento de Água. 10 p. 3.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente 2008, FEUP, ISBN 978-989-95557-2-3

Grupo Águas do Brasil, Disponível em- <https://www.grupoaguasdobrasil.com.br/aguas-novafriburgo/agua-e-esgoto/estacao-tratamento-agua/>. Acesso em 06/11/2018.

Danilo Derick Silva Alves, Contribuições para o estudo e a aplicação de bombas funcionando como turbinas na geração descentralizada. Universidade Federal de Minas Gerais. 2010.

ANEXO

A.1- CÁLCULOS MÉTODO VIANA

$$\eta_{qa} = \frac{\eta_t \times \sqrt{Q_t}}{(g \times H_t)^{3/4}} \times 10^3 \leq 200$$

Nt =	1800	
Qt	Ht	Nqa
0,00792	34,62	2024,827557

Nt =	3600	
Qt	Ht	Nqa
0,00792	34,62	4049,655

$$Q_t = \left(\frac{200 \times (g \times H_t)^{3/4}}{\eta_t \times 10^3} \right)^2$$

Ht	g	Nt * 10 ³	Qt [m ³ /s]	Qt [m ³ /h]	Ht
160	9,81	1800000	0,000767712	2,763764	160
150	9,81	1800000	0,000696876	2,508753	150
140	9,81	1800000	0,000628363	2,262106	140
130	9,81	1800000	0,000562255	2,024119	130
120	9,81	1800000	0,000498644	1,795117	120
110	9,81	1800000	0,00043763	1,57547	110
100	9,81	1800000	0,000379331	1,365592	100
90	9,81	1800000	0,000323879	1,165963	90
80	9,81	1800000	0,000271427	0,977138	80
70	9,81	1800000	0,00022216	0,799775	70
60	9,81	1800000	0,000176297	0,63467	60
50	9,81	1800000	0,000134114	0,48281	50

Qt	Ht	Nqa
0,00792	34,62	2024,828

A.2 – CÁLCULOS MÉTODO CHAPALLAZ

a.1 – Cálculo da rotação específica da BFT

Qt	Ht
0,00792	34,62

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

2) Determinar a rotação específica da BFT (Nqt)

3600 rpm

Nt	Qt	Ht	Nqt	Nqb	Qb
1800	0,00792	34,62	11,2238	12,61101	0,006092
1800	0,006028	33	10,14999	11,40448	0,004637
1800	0,010192	53,86	9,139982	10,26964	0,00784
1800	0,008914	44,63	9,842059	11,05849	0,006857
1800	0,007383	39,4	9,83505	11,05062	0,005679
1800	0,007017	37,38	9,973749	11,20646	0,005397
1800	0,006544	36,21	9,864782	11,08403	0,005034
1800	0,006267	34,45	10,02072	11,25923	0,004821
1800	0,005958	32,86	10,12358	11,37481	0,004583
3600	0,00792	34,62	22,44759	25,22202	0,006092
3600	0,006028	33	20,29998	22,80897	0,004637
3600	0,010192	53,86	18,27996	20,53929	0,00784
3600	0,008914	44,63	19,68412	22,11699	0,006857
3600	0,007383	39,4	19,6701	22,10124	0,005679
3600	0,007017	37,38	19,9475	22,41292	0,005397
3600	0,006544	36,21	19,72956	22,16805	0,005034
3600	0,006267	34,45	20,04144	22,51847	0,004821
3600	0,005958	32,86	20,24717	22,74962	0,004583

Nqt

22.44759

a.2 – Cálculo da rotação específica da bomba e vazão nominal da bomba

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89}$$

Nqt	Nqb
22,44759	25,22202

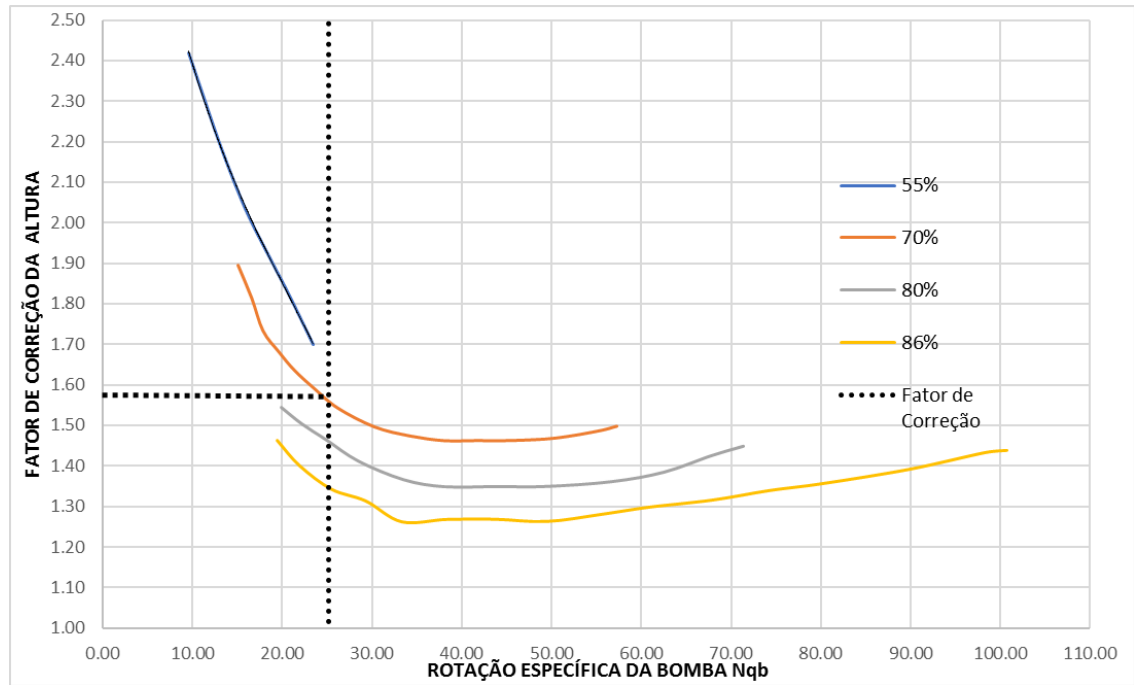
a.3 – Vazão nominal da bomba

$$Q_b = \frac{Q_t}{1,3}$$

Qt	Qb
0,00792	0,006092

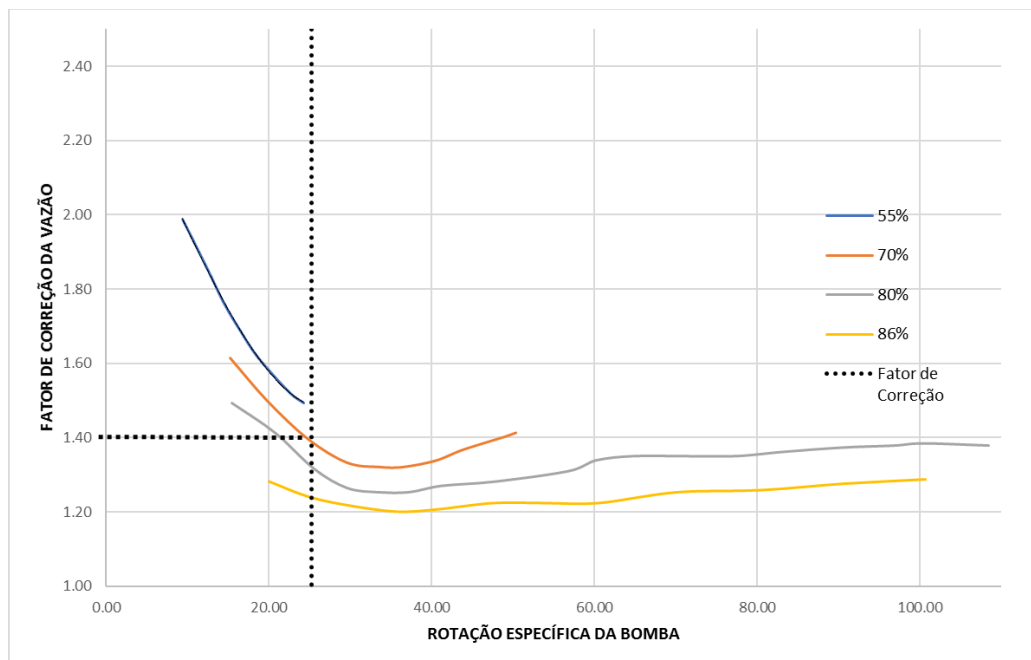
a.4 – Fator de correção da altura Ch

Nqb	Ch
25.22202	1.57



a.5 – Fator de correção da vazão Cq

Nqb	Cq
25.22202	1.4



a.6 – Altura da bomba (Hb) e vazão da bomba (Qb)

$$H_b = \frac{H_t}{c_H}$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{c_Q}$$

Ht	Ch	Hb
34.62	1.57	22.05096

Qt	Cq	Qb
0.00792	1.4	0.005657

a.7 – Altura corrigida da bomba (Hob) e vazão corrigida da bomba (Qob)

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

$$Q_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right) \times Q_b$$

Nob	Nb	Hb	Hob
3500	3600	22.05096	20.84292

Nob	Nb	Qb	Qob
3500	3600	0.005657	0.005247

a.8 – Rendimento da bomba pelo gráfico

Rendimento da Bomba Seleccionada

30 cv

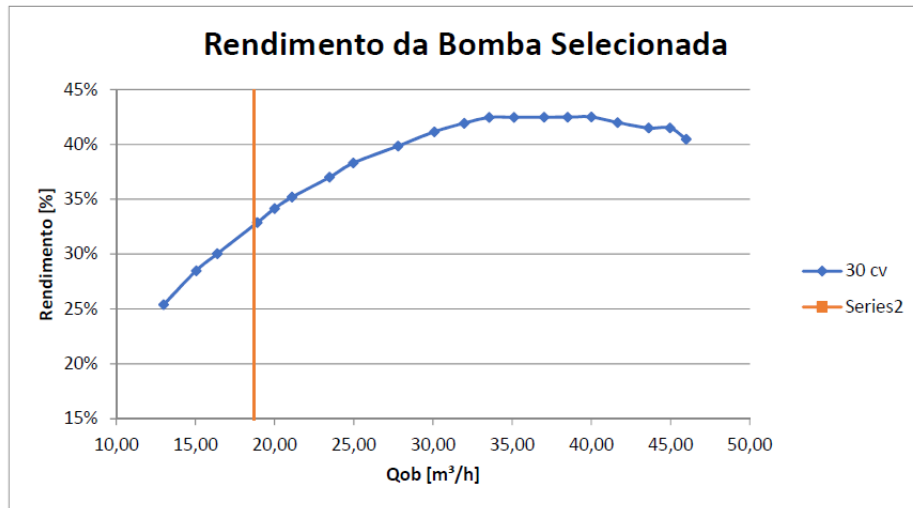
12,99	25%
15,04	28%
16,38	30%
18,90	33%
20,00	34%
21,10	35%
23,46	37%
24,96	38%
27,80	40%
30,08	41%
31,97	42%
33,54	42%
35,12	42%
37,01	42%
38,50	42%
40,00	43%
41,65	42%
43,62	41%
44,96	42%
45,98	40%

Qob [m³/h]

18.72

Rendimento

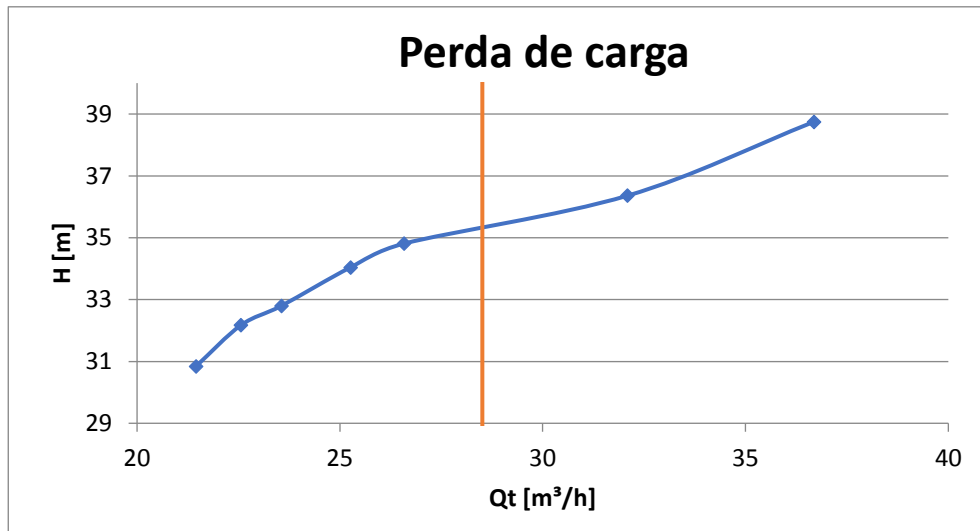
33%



a.9 – Perda de carga para a vazão média de trabalho

Qt [m³/h] 28.512

Ht[m] 34.62

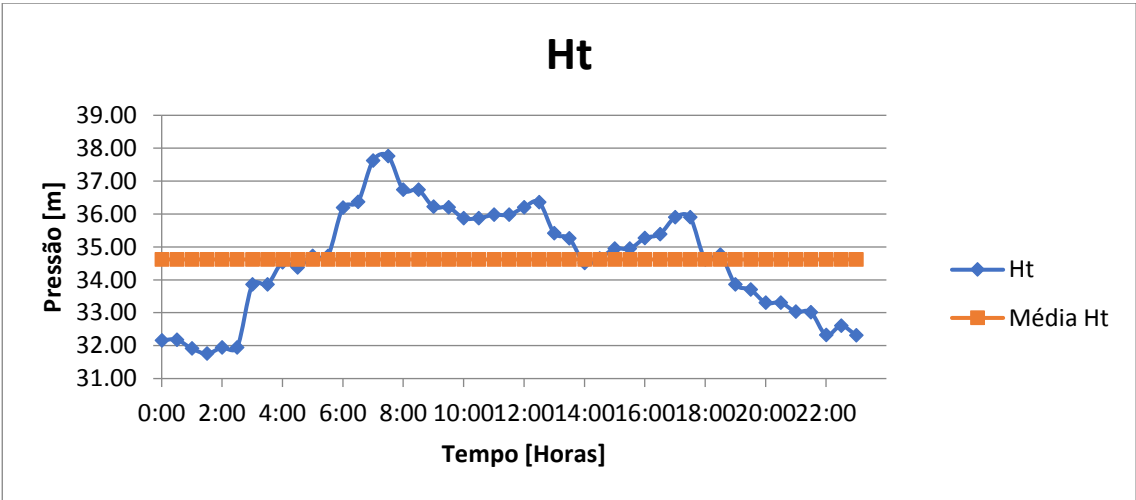
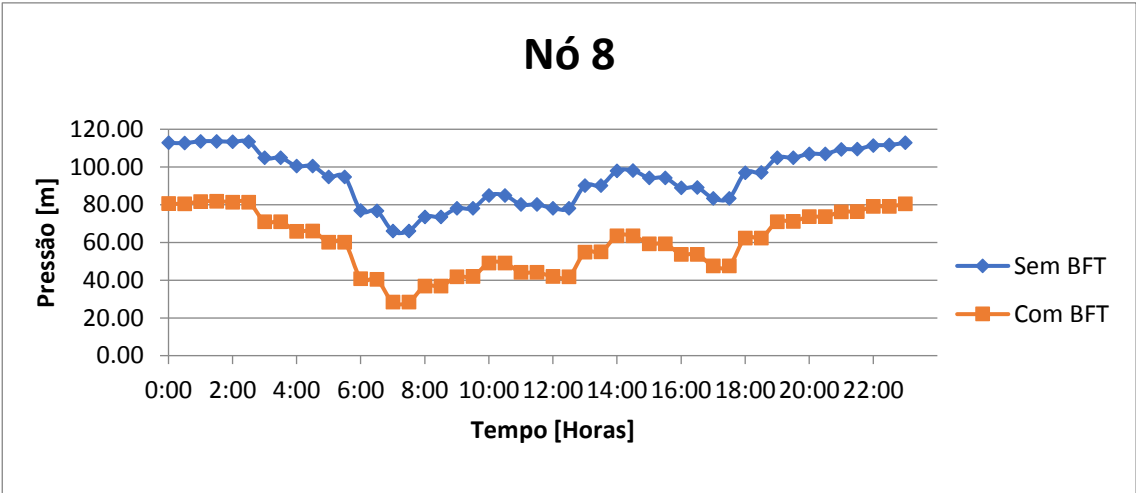


a.10 – Potência hidráulica

p	1000	Ph
g	9.81	0.887637
n	33%	

A.3 – NÓ 8

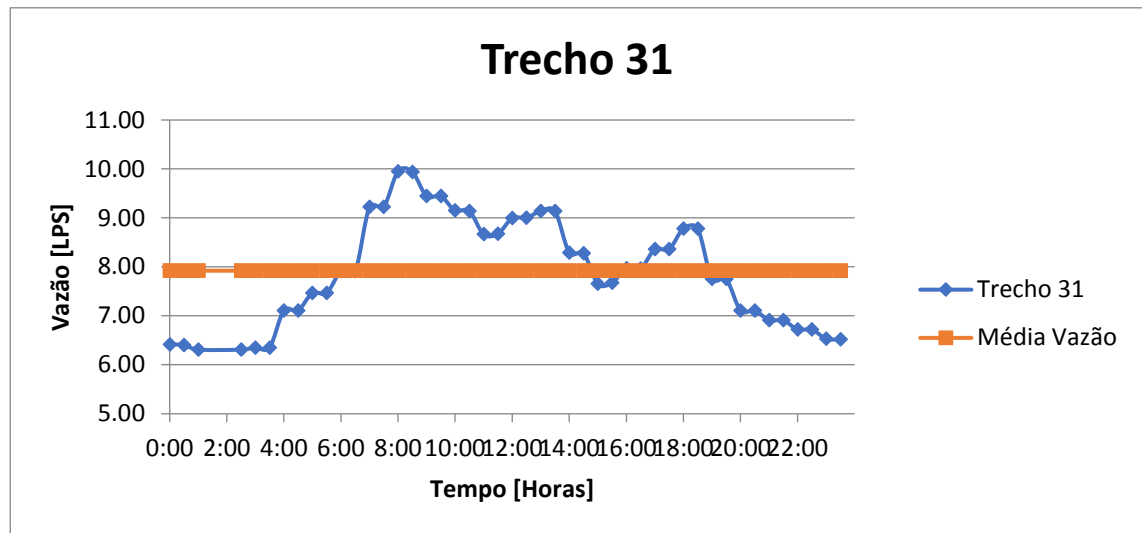
NÓ 8		NÓ 8		NÓ 8		
Sem BFT		Com BFT		Ht	Média Ht	
Hora	Pressão	Hora	Pressão	Hora	Ht	Média Ht
00:00	112,80	00:00	80,64	00:00	32,16	34,62
00:30	112,66	00:30	80,48	00:30	32,18	34,62
01:00	113,63	01:00	81,72	01:00	31,91	34,62
01:30	113,63	01:30	81,87	01:30	31,76	34,62
02:00	113,35	02:00	81,41	02:00	31,94	34,62
02:30	113,35	02:30	81,41	02:30	31,94	34,62
03:00	104,91	03:00	71,05	03:00	33,86	34,62
03:30	104,91	03:30	71,05	03:30	33,86	34,62
04:00	100,48	04:00	65,95	04:00	34,53	34,62
04:30	100,48	04:30	66,10	04:30	34,37	34,62
05:00	94,80	05:00	60,07	05:00	34,73	34,62
05:30	94,80	05:30	60,07	05:30	34,73	34,62
06:00	76,94	06:00	40,74	06:00	36,19	34,62
06:30	76,80	06:30	40,44	06:30	36,36	34,62
07:00	66,00	07:00	28,37	07:00	37,63	34,62
07:30	66,14	07:30	28,37	07:30	37,76	34,62
08:00	73,62	08:00	36,88	08:00	36,74	34,62
08:30	73,62	08:30	36,88	08:30	36,74	34,62
09:00	78,05	09:00	41,83	09:00	36,22	34,62
09:30	78,18	09:30	41,98	09:30	36,20	34,62
10:00	84,97	10:00	49,09	10:00	35,88	34,62
10:30	84,97	10:30	49,09	10:30	35,88	34,62
11:00	80,12	11:00	44,15	11:00	35,98	34,62
11:30	80,12	11:30	44,15	11:30	35,98	34,62
12:00	78,18	12:00	41,98	12:00	36,20	34,62
12:30	78,18	12:30	41,83	12:30	36,36	34,62
13:00	90,23	13:00	54,82	13:00	35,42	34,62
13:30	90,23	13:30	54,97	13:30	35,26	34,62
14:00	97,99	14:00	63,47	14:00	34,51	34,62
14:30	98,12	14:30	63,47	14:30	34,65	34,62
15:00	94,25	15:00	59,30	15:00	34,95	34,62
15:30	94,25	15:30	59,30	15:30	34,95	34,62
16:00	89,00	16:00	53,73	16:00	35,27	34,62
16:30	89,12	16:30	53,73	16:30	35,39	34,62
17:00	83,45	17:00	47,55	17:00	35,90	34,62
17:30	83,45	17:30	47,55	17:30	35,90	34,62
18:00	97,02	18:00	62,39	18:00	34,62	34,62
18:30	97,15	18:30	62,39	18:30	34,76	34,62
19:00	104,91	19:00	71,05	19:00	33,86	34,62
19:30	104,91	19:30	71,21	19:30	33,70	34,62
20:00	106,99	20:00	73,68	20:00	33,31	34,62
20:30	106,99	20:30	73,68	20:30	33,31	34,62
21:00	109,34	21:00	76,31	21:00	33,03	34,62
21:30	109,48	21:30	76,46	21:30	33,01	34,62
22:00	111,42	22:00	79,09	22:00	32,32	34,62
22:30	111,69	22:30	79,09	22:30	32,60	34,62



A.4 – Trecho 31

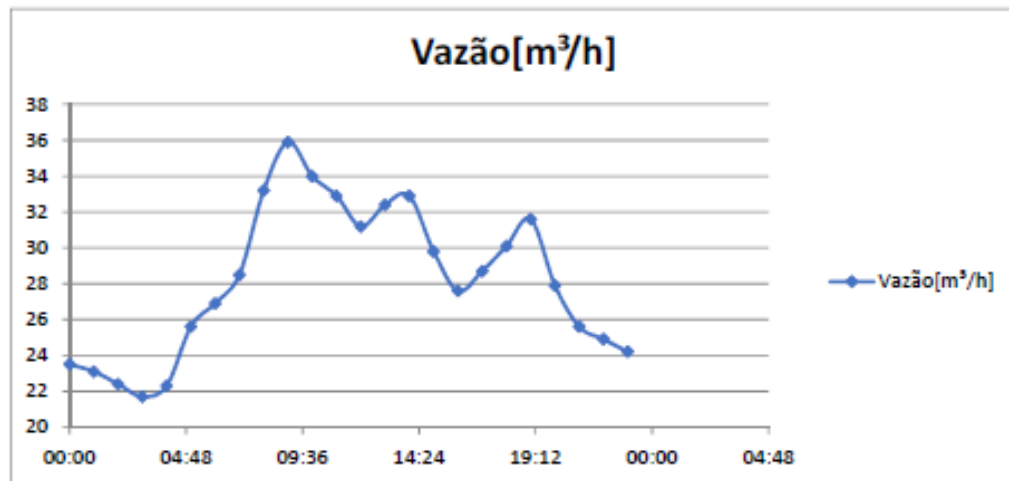
Trecho 31

Hora	Vazão [LPS]	Média Vazão
00:00	6,42	7,92
00:30	6,40	7,92
01:00	6,31	7,92
02:30	6,31	7,92
03:00	6,35	7,92
03:30	6,35	7,92
04:00	7,11	7,92
04:30	7,11	7,92
05:00	7,47	7,92
05:30	7,47	7,92
06:00	7,91	7,92
06:30	7,91	7,92
07:00	9,22	7,92
07:30	9,22	7,92
08:00	9,95	7,92
08:30	9,94	7,92
09:00	9,45	7,92
09:30	9,45	7,92
10:00	9,15	7,92
10:30	9,14	7,92
11:00	8,67	7,92
11:30	8,68	7,92
12:00	8,99	7,92
12:30	9,00	7,92
13:00	9,14	7,92
13:30	9,14	7,92
14:00	8,29	7,92
14:30	8,28	7,92
15:00	7,66	7,92
15:30	7,68	7,92
16:00	7,97	7,92
16:30	7,96	7,92
17:00	8,36	7,92
17:30	8,36	7,92
18:00	8,78	7,92
18:30	8,78	7,92
19:00	7,75	7,92
19:30	7,75	7,92
20:00	7,11	7,92
20:30	7,11	7,92
21:00	6,91	7,92
21:30	6,91	7,92
22:00	6,72	7,92
22:30	6,72	7,92
23:00	6,53	7,92
23:30	6,52	7,92



A.5 – DADOS DE VAZÃO

Hora	Vazão[m ³ /h]	Vazão [m ³ /s]
00:00	23,5	0,00652778
01:00	23,1	0,00641667
02:00	22,4	0,00622222
03:00	21,7	0,00602778
04:00	22,3	0,00619444
05:00	25,6	0,00711111
06:00	26,9	0,00747222
07:00	28,5	0,00791667
08:00	33,2	0,00922222
09:00	35,9	0,00997222
10:00	34	0,00944444
11:00	32,9	0,00913889
12:00	31,2	0,00866667
13:00	32,4	0,009
14:00	32,9	0,00913889
15:00	29,8	0,00827778
16:00	27,6	0,00766667
17:00	28,7	0,00797222
18:00	30,1	0,00836111
19:00	31,6	0,00877778
20:00	27,9	0,00775
21:00	25,6	0,00711111
22:00	24,9	0,00691667
23:00	24,2	0,00672222



A.6 – PRESSÃO NA REDE X ALTURA DE QUEDA X VAZÃO

Pressão na rede

Q [m³/h]	p1/ρ.g [m]	p2/ρ.g [m]	$(V1^2 - V2^2)/(2g)$ [m]	v1	H [m]	Pel [kW]	Ph [kW]	ηgg [%]
36,69	62,99	9,13	-15,11	5,190573211	38,75	1,84	3,87	47,66
32,09	70,63	26	-8,27	4,539806332	36,36	1,3	3,17	41,05
26,58	75,34	35,94	-4,59	3,760300789	34,81	0,83	2,52	33,04
25,26	76,44	39,06	-3,34	3,573558989	34,04	0,71	2,34	30,56
23,56	77,46	41,25	-3,41	3,333058186	32,8	0,54	2,1	25,76
22,56	78,51	44,06	-2,28	3,191587125	32,17	0,43	1,97	21,61
21,45	79,42	46,56	-2,02	3,034554248	30,84	0,29	1,8	15,95

x	Pmax	Pmin	Ht	Corte
36,69	62,99	9,13	53,86	10
32,09	70,63	26	44,63	10
26,58	75,34	35,94	39,4	10
25,26	76,44	39,06	37,38	10
23,56	77,46	41,25	36,21	10
22,56	78,51	44,06	34,45	10
21,45	79,42	46,56	32,86	10

Potência elétrica gerada x Rendimento do grupo gerador x Altura de queda líquida

