



Kassiano Pereira de Souza

Bacharel em Engenharia Mecânica

Optimização e Modelização de uma Instalação Experimental para Recuperação de Energia em Redes de Distribuição de Água

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Energias Renováveis

Orientador: João Murta Pina, Professor Doutor,
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientadores: Luis Miguel Chagas Costa Gil, Professor Doutor,
Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Março, 2020

Optimização e Modelização de uma Instalação Experimental para Recuperação de Energia em Redes de Distribuição de Água

Copyright © Kassiano Pereira de Souza, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Deus pelo dom da vida.

Ao meu orientador Professor Doutor João Murta Pina, pela orientação, apoio e atenção cedidos durante este longo período.

À família pelo amor, apoio e incentivo para realização deste projeto.

Aos amigos e todos os familiares, pelo apoio na construção do projeto e pela compreensão em tantos momentos ausentes.

A todos os professores pelos ensinamentos transmitidos.

Por fim, a todos que de maneira direta ou indireta colaboraram para realização deste projeto.

RESUMO

O consumo de energia elétrica mundial tende a aumentar com o crescente aumento da população, portanto a produção de energia elétrica é se torna um desafio por ser necessário produzir energia de forma renovável e que gere menor impacto possível para o ambiente. Além disso, surge o outro desafio que é aproveitar o máximo de energia possível, de modo a reduzir as perdas ao máximo e assim, aumentar a eficiência do consumo.

Esta dissertação surge com o intuito de realizar o aproveitamento de energia em sistemas de distribuição de água. A ideia é instalar uma bomba a funcionar como turbina (BFT) em pontos onde hoje estão instaladas válvulas reguladoras de pressão, garantindo que as ligações da rede hidráulicas pelas BFTs sejam realizadas de forma a assegurar que haja produção de energia elétrica, sendo necessário otimizar o sistema de modo que os seus componentes operem da melhor forma.

Para otimização do sistema foram implementados sensores que fornecem informação de forma digital, centralizada e em tempo real. Tal controle permite que o sistema seja monitorado e controlado permitindo, assim, uma análise dos resultados obtidos de forma mais rápida e precisa.

A instalação permite, de forma didática, perceber como a implementação de uma BFT em um sistema de distribuição de água ocorre. Além disso, a instalação permite ampliação, garantido que esta sirva de base para demais estudos sobre o tema.

Palavras-chave: Bomba a funcionar como turbina, sistemas de distribuição de água, sensores de caudal e sensores de pressão, produção de energia renovável.

ABSTRACT

The consumption of electrical energy worldwide tends to increase with the population increase, therefore the production of electrical energy is a challenge because it is necessary to produce energy in a renewable way with the least possible impact on the environment. In addition, the other challenge arises, which is to make the most of the energy possible, in order to reduce losses as much as possible and thus increase consumption efficiency.

This dissertation appears with the intention of making use of energy in water distribution systems. The idea is to install a pump as a turbine (PAT) in points where pressure regulating valves are installed today, ensuring that the connections of the hydraulic network by the PATs are carried out in order to ensure a production of electric energy, being necessary to optimize the system so that your components operate optimally.

To optimize the system, sensors were implemented that provide information in a digital, centralized and real-time manner. Such control allows the system to be monitored and controlled, thus allowing an analysis of the results obtained more quickly and accurately.

The installation allows, in a didactic way, to understand how the implementation of a PAT in a water distribution system occurs. In addition, the installation allows for expansion, ensuring that it serves as a basis for further studies on the topic.

Keywords: Pump as a turbine, water distribution systems, flow sensors and pressure sensors, renewable energy production.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
SIMBOLOGIA	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS	2
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA	3
2.1.1 PERDA DE CARGA	4
2.2 VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO (VRP).....	6
2.3 BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA	7
2.3.1 SELEÇÃO DA BFT.....	9
2.3.2 AJUSTES NECESSÁRIOS.....	14
2.4 CONTROLE DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	16
2.5 EXEMPLOS DE ESTUDOS REALIZADOS SOBRE BFTs.....	18
2.5.1 INVESTIGAÇÃO SOBRE ASPECTOS TÉCNICOS DA BOMBA COMO TURBINA EM ESQUEMAS DE MICROGERAÇÃO HIDRICA	18
2.5.2 POTENCIAL HIDROELÉTRICO NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: CONTROLE DE PRESSÃO ATRAVÉS DE BFT	19
2.5.3 UM NOVO ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DE BAIXO CUSTO DE BFTS PARA RECUPERAR ENERGIA EM ÁREAS RESIDENCIAIS.....	20
2.5.4 OPTIMIZAÇÃO DO DESIGN DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA USANDO UMA ABORDAGEM DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA	21
3 INSTALAÇÃO HIDRÁULICA	23
3.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL EXISTENTE	23
3.2 ALTERAÇÕES À MONTAGEM INICIAL.....	26
3.2.1 BOMBA.....	28
3.2.2 BFT	29
3.2.3 RESERVATÓRIO.....	33

3.2.4	TUBULAÇÃO.....	34
3.2.5	SENSORIZAÇÃO DO SISTEMA.....	38
4	METODOLOGIA	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	RESULTADO DOS TESTES EXPERIMENTAIS.....	47
5.1.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
5.1.2	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	52
6	CONCLUSÃO	57
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	59
I	DATA SHEET DA BFT	61
II	DATA SHEET DA BOMBA	65
III	CÓDIGO ARDUINO.....	67
IV	TABELAS DE CONVERSÃO	69

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 EXEMPLO DE INSTALAÇÃO HIDRÁULICA (BRUNETTI, 2008)	5
FIGURA 2.2 DIFERENTES TIPOS DE (VRP): (A) VRP CONTROLADA POR MOLA, (B) VRP CONTROLADA POR PISTÃO E (C)VRP CONTROLADA POR DIAFRAGMA.(RAMOS ET AL., 2004)	7
FIGURA 2.3 BOMBA FUNCIONANDO COMO BOMBA (MEDEIROS, 2004)	7
FIGURA 2.4 BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA (BFT) (MEDEIROS, 2004)	8
FIGURA 2.5 ESQUEMA DE PRÉ-SELEÇÃO DAS BFTS (RICARDO, 2007)	9
FIGURA 2.6 COEFICIENTES DE ALTURA E CAUDAL	11
FIGURA 2.7 RENDIMENTO MÁXIMO DA BFT	13
FIGURA 2.8 COEFICIENTE DE ALTURA.....	13
FIGURA 2.9 COEFICIENTE DE CAUDAL.....	14
FIGURA 2.10 ESQUEMAS DOS MODELOS DE HR E ER. (ADAPTADO DE (ARMANDO CARRAVETTA ET AL., 2013)).....	17
FIGURA 2.11 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS MODELOS DE HR E ER (ADAPTADO DE (ARMANDO CARRAVETTA ET AL., 2013)	18
FIGURA 2.12 ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DA BFT COM REGULAÇÃO HIDRÁULICA (FECAROTTA ET AL., 2014)	20
FIGURA 3.1 CURVA CARACTERÍSTICA DA BFT	24
FIGURA 3.2 CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA. TIPO C.	25
FIGURA 3.3 MANÔMETROS 0 - 10 BAR.....	25
FIGURA 3.4 CAUDALÍMETRO	26
FIGURA 3.5 ESQUEMA DA INSTALAÇÃO HIDRÁULICA	27
FIGURA 3.6 BOMBA CENTRÍFUGA MONOBLOCO CAPRARI CM32-16C.....	29
FIGURA 3.7 CURVA DE RENDIMENTO DA BOMBA.....	30
FIGURA 3.8 LISTA DE BOMBAS PARA SELEÇÃO.....	31
FIGURA 3.9 BFT SELECIONADA.....	32
FIGURA 3.10 RESERVATÓRIO	33
FIGURA 3.11 INSTALAÇÃO INICIAL.....	34
FIGURA 3.12 INSTALAÇÃO ATUAL	37
FIGURA 3.13 DETALHE DA INSTALAÇÃO	37
FIGURA 3.14 ESQUEMA E POSICIONAMENTO DOS SENSORES	38
FIGURA 3.15 (A) TRANSDUTOR DE PRESSÃO, (B) CONEXÃO PARA TRANSDUTOR.....	39
FIGURA 3.16 CAUDALÍMETRO	40
FIGURA 3.17 ARDUINO DUE	41
FIGURA 3.18 ESQUEMA DE LIGAÇÃO DOS SENSORES NO ARDUINO	41
FIGURA 3.19 INDICAÇÃO DO MONITOR SERIAL DENTRO DO ARDUINO IDE	42
FIGURA 4.1 AUTOTRANSFORMADOR 3 FASES	44
FIGURA 4.2 BY-PASS DA INSTALAÇÃO	45
FIGURA 5.1 LEITURAS FEITAS PELO CAUDALÍMETRO	47

FIGURA 5.2 LEITURAS OBTIDAS ATRAVÉS TRANSDUTOR DE PRESSÃO PeB.....	48
FIGURA 5.3 LEITURAS OBTIDAS ATRAVÉS TRANSDUTOR DE PRESSÃO PSB.....	48
FIGURA 5.4 LEITURAS OBTIDAS ATRAVÉS TRANSDUTOR DE PRESSÃO PeBFT.....	48
FIGURA 5.5 LEITURAS OBTIDAS ATRAVÉS TRANSDUTOR DE PRESSÃO PSBFT.....	49
FIGURA 5.6 LEITURAS FEITAS PELO CAUDALÍMETRO NOS CENÁRIOS IMPARES.....	50
FIGURA 5.7 LEITURAS OBTIDAS ATRAVÉS DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO NOS CENÁRIOS IMPARES.....	50
FIGURA 5.8 (A) CONFIGURAÇÃO DO RESERVATÓRIO, (B) CONFIGURAÇÃO DA CONEXÃO 2, (C) CONFIGURAÇÃO DA VÁLVULA 14, (D) CONFIGURAÇÃO DA TUBULAÇÃO 4.....	53
FIGURA 5.9 CURVA DA BFT IMPLEMENTADA.....	54
FIGURA 5.10 CURVA GENÉRICA DA BOMBA.....	54
FIGURA 5.11 SIMULAÇÃO CENÁRIO C9.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 EXEMPLOS DE COMPRIMENTOS EQUIVALENTES (FONTE: BRUNETTI, 2008).....	6
TABELA 2.2 INSTALAÇÕES ONDE HÁ USO DE BFT	19
TABELA 3.1 CARACTERÍSTICAS DA BOMBA.....	29
TABELA 3.2 CARACTERÍSTICAS DA BFT	32
TABELA 3.3 CARATERÍSTICAS DO MOTOR ACOPLADO.....	33
TABELA 3.4 PROPRIEDADES DOS TUBOS DE PVC.....	35
TABELA 3.5 CONEXÕES E VÁLVULAS	35
TABELA 3.6 CARACTERÍSTICAS DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO	39
TABELA 3.7 CARACTERÍSTICAS DO CAUDALÍMETRO	40
TABELA 4.1 RESUMO DOS CENÁRIOS PARA OS TESTES	44
TABELA 5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DAS LEITURAS	51

SIMBOLOGIA

Q	Caudal	c_H	Coeficiente de altura
V	Volume	n_{qA}	Velocidade de rotação específica
t	Tempo	n_T	Velocidade de rotação da turbina
A	Área da secção	Q_{bc}	Caudal corrigida
v	Velocidade do fluido	n_{nb}	Velocidade de rotação de operação
p	Pressão	H_{bc}	Altura corrigida
z	Altura	$P_{Máx T}$	Pressão máxima da turbina
ρ	Densidade	$P_{Máx b}$	Pressão máxima da bomba
H_m	Carga de uma máquina	τ_e	Tensão no eixo
ΔH_{12}	Perda de carga entre dois pontos		
H_b	Carga de uma bomba		
H_T	Carga de uma turbina		
g	Aceleração da gravidade		
Pot_T	Potência da turbina		
h_f	Perda de carga local		
h_s	Perda de carga singular		
f	Coeficiente de perda de carga		
L_{Real}	Comprimento da tubulação		
L_{eq}	Comprimento equivalente		
D_H	Diâmetro hidráulico		
Q_b	Caudal nominal		
Q_T	Caudal em funcionamento		
H_b	Altura nominal		
H_T	Altura em funcionamento		
c_q	Coeficiente de caudal		



INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A produção de energia elétrica é algo que merece a devida atenção neste momento, uma vez que o consumo de energia elétrica mundial tende a aumentar com o crescente aumento da população. Em contrapartida, a preocupação com o ambiente também merece atenção. Pensando nisso, a produção de energia renovável e sustentável é um caminho que une estes dois assuntos.

Além do desafio de produzir energia de forma renovável e que gere menor impacto possível para o ambiente, surge o outro desafio que é aproveitar o máximo de energia possível, de modo a reduzir as perdas ao máximo e assim, aumentar a eficiência do consumo.

Então, esta dissertação surge com o intuito de realizar o aproveitamento de energia em sistemas de distribuição de água. Energia essa que, nos pontos onde é necessária a despressurização do sistema, é normalmente desperdiçada sob forma de calor. A ideia é instalar uma bomba a funcionar como turbina (BFT) em pontos onde hoje estão instaladas válvulas reguladoras de pressão.

As bombas são equipamentos de fácil manutenção, baixo custo e simples funcionamento, o que reduz possíveis problemas operacionais, além de ser financeiramente uma opção interessante. Além disso, a produção de energia elétrica através do movimento da água é uma das formas mais antigas, portanto conhecidas, de aproveitamento de energia.

O objetivo do presente trabalho é garantir que as ligações da rede hidráulicas pelas BFTs sejam realizadas de forma a garantir uma produção de energia elétrica com eficiência e menores perdas de carga no sistema hidráulico. Para tal, é necessário otimizar o sistema de modo que os seus componentes operem da melhor forma.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo obter aproveitamento de energia para geração de energia elétrica através da despressurização dos sistemas de distribuição de água. Para tal se faz necessário a otimização e modelização de toda a estrutura mecânica e hidráulica de uma instalação já existente na cave do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computadores (DEEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT).

Para realização do estudo, comprovação dos resultados obtidos e cumprimento do objetivo principal, foram adotados os seguintes objetivos secundários:

- 1- Otimizar e implementar a estrutura mecânica e hidráulica da instalação.
- 2- Sensorizar toda a instalação com equipamentos digitais para recolha automática dos dados.
- 3- Avaliar diferentes cenários de regulação eléctrica e hidráulica.
- 4- Realizar a modelização da instalação em EPANET.

1.3 CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS

No presente trabalho, para além da reestruturação de uma instalação experimental que simulava uma rede de distribuição de água, tornando-a mais didática, foi implementado diversos sensores.

Tais sensores permitem um controle em tempo real dos parâmetros do fluido e do sistema, ajudando assim, uma possível automatização da instalação. Foram instalados 4 transdutores de pressão e um caudalímetro. Todos os sensores foram ligados em um Arduíno que faz a leitura e interpretação dos dados, além de disponibilizá-los ao utilizador. O Arduíno ainda permite a implementação de novos sensores e controladores a instalação.

Para além da implementação de sensores, foi elaborado uma simulação da instalação que permite ensaio e previsão de comportamento de futuras alterações, antes mesmo de serem implementadas.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A tese está organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – Introdução ao tema abordado, onde estão dispostos as motivações e objetivos do estudo.
- Capítulo 2 – Revisão da literatura onde estão abordadas as principais características do sistema e os estudos utilizados com embasamento para este.
- Capítulo 3 – Apresentação da instalação experimental antiga, bem como a instalação atual.
- Capítulo 4 – Metodologia utilizadas para a definição dos cenários e realização dos ensaios.
- Capítulo 5 – Resultados dos ensaios e discussão sobre tais resultados.
- Capítulo 6 – Conclusão dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA

A seguir, apresentam-se alguns conceitos básicos que foram importantes para a elaboração do presente estudo.

- Caudal

A definição de caudal volumétrico é dada pelo volume de um fluido que passa por uma determinada secção (A) num dado intervalo de tempo (t). Geralmente, este é mensurado em m^3/s . O caudal volumétrico pode ser definido pela Equação (2.1).

$$Q = \frac{V}{t} = A \times v \quad (2.1)$$

Onde Q é o caudal volumétrico, V é o volume e v é a velocidade do fluido na secção em análise.

- Conservação de energia

A Equação de Bernoulli mostra que existe uma conservação da energia em diferentes pontos dos sistemas variante as condições de cada ponto. Para tal é necessário conhecer a pressão (p) no ponto, a velocidade do fluido (v) e a altura (z) que o ponto está em relação ao solo. Para além disso, é necessário conhecer a densidade (ρ) do fluido que está escoando.

Entretanto, para instalações reais, existem fatores de diferem de uma situação ideal. Nomeadamente, as perdas de carga e presença de máquinas. Quando elabora-se um projeto de uma instalação deve-se levar em conta a interferência de todos os equipamentos na conservação de energia (Nakayama & Boucher, 1999). Sendo assim, a Equação (2.2) traduz a Equação de Bernoulli aplicada aos casos reais com utilização de máquinas.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_m = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \Delta H_{12} \quad (2.2)$$

Os termos H_m e ΔH_{12} representam, respectivamente, a carga adicionada ao sistema por uma máquina e as perdas de cargas totais entre os pontos analisados. As perdas de carga serão apresentadas na secção a seguir.

Quanto a carga da máquina, é importante destacar que este varia com o tipo de máquina que se utiliza. Para os casos das bombas, o $H_m = H_b$. Já para o caso das turbinas, o $H_m = -H_T$. Isso se deve pelo fato de a bomba fornecer energia ao sistema, enquanto a turbina retira energia do sistema.

- Potência da máquina

Para encontrar a potência disponível no fluido para uma turbina, é necessário mensurar a carga manométrica retirada pela turbina, multiplicado pelo peso específico do fluido e pelo caudal que atravessa a turbina. Em resumo, a potência disponível é dada pela Equação (2.3). Essa variável possui como unidade watt (W).

$$Pot_T = \rho g H_T Q \tag{2.3}$$

Onde H_T é a carga manométrica retirada pela turbina, que pode ser calculado pela Equação (2.2), e g é a aceleração da gravidade.

2.1.1 PERDA DE CARGA

Numa instalação hidráulica em que haja escoamento por dutos, é possível identificar 2 perdas de cargas características: as perdas de carga distribuídas h_f e as perdas de carga locais ou singulares h_s .

O primeiro, como o próprio nome sugere, são as perdas de cargas distribuídas no interior de um curso de tubulação pelo atrito das próprias partículas de fluido. O segundo são perdas que acontecem em locais específicos da instalação em que o fluido sofre uma brusca alteração de fluxo. Estes podem ser causadas, por exemplo, por válvulas, mudanças de direção, estreitamento de fluxo, orifícios, alargamentos bruscos, dentre outros. A Figura 2.1 mostra um exemplo de instalação onde podemos identificar melhor estes trechos.

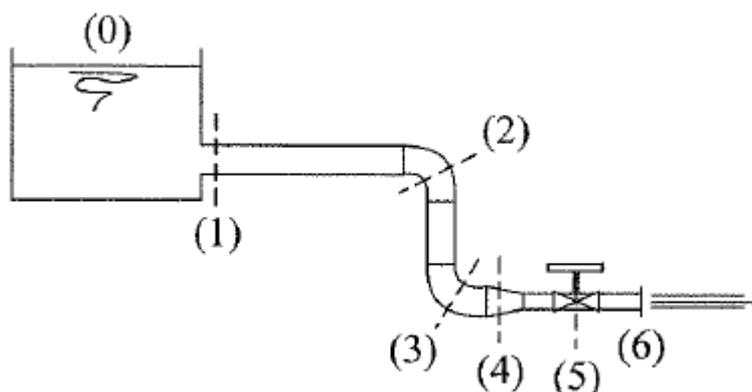


Figura 2.1 Exemplo de instalação hidráulica (Brunetti, 2008)

Nos trechos 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 e 5-6 existem perdas distribuídas.

No ponto 1 existe um estreitamento brusco, em 2 e 3 há uma mudança de direcionamento de fluxo, em 4 existe um estreitamento e por fim em 5 há uma válvula. Todos estes pontos representam perdas locais.

Portanto, as perdas totais ΔH_{12} é um somatório das perdas locais e distribuídas como mostra a Equação (2.4).

$$\Delta H_{12} = \sum h_f + \sum h_s \quad (2.4)$$

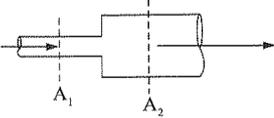
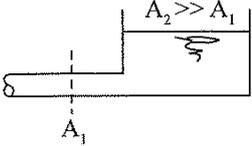
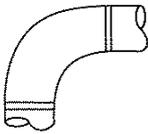
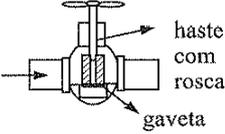
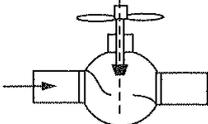
De uma maneira geral, a perda de carga através da Equação (2.5), que por sua vez que ficou conhecida com a Equação de Darcy-Weisbach.

$$\Delta H_{12} = f \frac{(L_{Real} + L_{eq}) v^2}{D_H} \frac{1}{2g} \quad (2.5)$$

Onde o f é o coeficiente de perda de carga distribuída (função do Número de Reynolds Re e da rugosidade relativa $\frac{D_H}{\epsilon}$, ambos adimensionais), v é a velocidade de escoamento, D_H é o diâmetro hidráulico (diâmetro interno do tubo) da secção, L_{Real} é o comprimento da secção estudada e L_{eq} é o comprimento equivalente de uma conexão.

Para aplicação da Equação de Darcy-Weisbach nas perdas de carga singulares foi preciso admitir comprimentos equivalentes. Ou seja, as singularidades são tratadas como tubulações de diâmetro constante e é adotado um comprimento equivalente L_{eq} para cada singularidade. Na Tabela 2.1 pode ser visto alguns exemplos.

Tabela 2.1 Exemplos de comprimentos equivalentes (Fonte: Brunetti, 2008)

Singularidade	Esquema	k_s [$L_{eq} = k_s \times D_H / f$]
Alargamento		$(1 - A_1/A_2)$ Neste caso $v = v_1$
Caso Limite		1
Cotovelo 90		0,9
Válvula de gaveta		Totalmente aberta 0,2
Válvula tipo Globo		Totalmente aberta 10

2.2 VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO (VRP)

A principal função das VRPs é reduzir a pressão do fluido na saída da mesma.

Estas consistem em equipamentos que acionam um dispositivo que obstrui o fluxo do fluido toda vez que a pressão de saída for elevada. Dessa forma, pelo aumento da perda de carga localizada, o fluido perde pressão até a pressão pretendida. Da mesma forma, caso a pressão de saída seja baixa, a válvula desobstrui o fluxo e aumenta até a pressão desejada (Ramos, Covas, & Araújo, 2004).

Portanto a VRP pode ter 3 estágios. O primeiro é chamado de estado ativo. Este acontece toda vez que a pressão de saída está elevada e a válvula precisa obstruir o fluxo para baixar a pressão. O segundo estágio acontece quando a pressão de saída é menor que a desejada, assim a válvula abre seu curso e se torna uma conexão passiva. Já o terceiro estágio acontece caso a pressão de saída seja maior que a de entrada. Neste caso a válvula passa a funcionar como uma válvula de retenção, bloqueando o fluxo (Ramos et al., 2004).

As VRPs podem ter acionamento mecânico ou elétrico. Isso faz com que a gama de ajuste de pressão seja mais flexível e varie de acordo com a aplicação, proporcionando assim um funcionamento mais eficiente do sistema. Na Figura 2.2 é possível ver os principais tipos de VRP.

Contudo, as VRPs ainda representam uma grande perda de energia interna do fluido, uma vez que seu funcionamento consiste em aumentar a perda de carga para obter o resultado pretendido. Por isso, mesmo com um funcionamento mais eficiente, as VRPs diminuem o rendimento global do sistema hidráulico (Ramos et al., 2004).

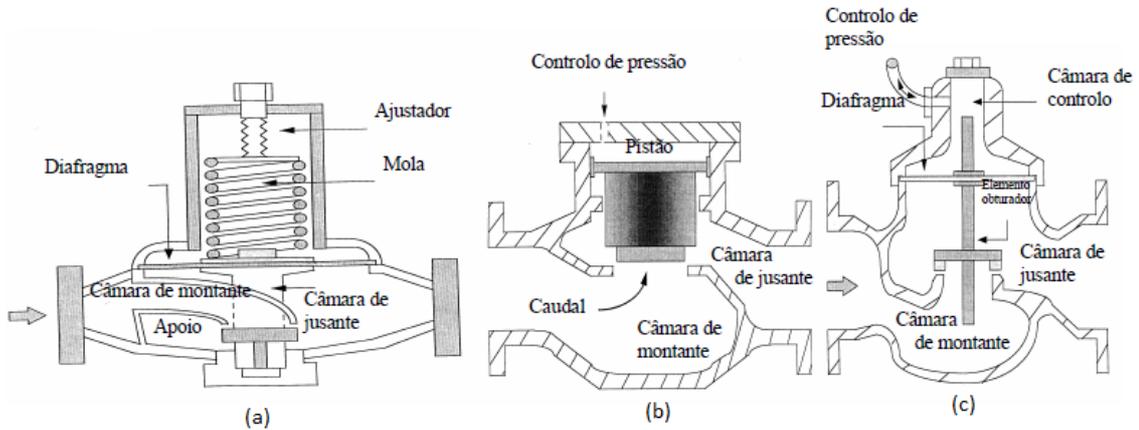


Figura 2.2 Diferentes tipos de (VRP): (a) VRP controlada por mola, (b) VRP controlada por pistão e (c)VRP controlada por diafragma.(Ramos et al., 2004)

2.3 BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA

As bombas são produzidas em larga escala para diversas aplicações. Por este fator os custos de uma bomba tendem a ser baixos quando comparados a uma turbina.

Quando analisado os aspectos de construção de uma bomba e uma turbina conclui-se que as duas são muito parecidas só desempenham papéis contrários. As bombas são máquinas que injetam energia no fluido realizando a conversão de energia elétrica aplicada a um motor elétrico de acionamento, em energia hidráulica. Já as turbinas retiram energia do fluido fazendo o caminho inverso, transformando a energia hidráulica em energia elétrica através do acionamento de um gerador elétrico acoplado (Ricardo, 2007).

Por este motivo, para uma bomba funcionar como turbina, o fluxo de entrada deve ser invertido conforme mostra a Figura 2.3 e a Figura 2.4 (Medeiros, 2004).

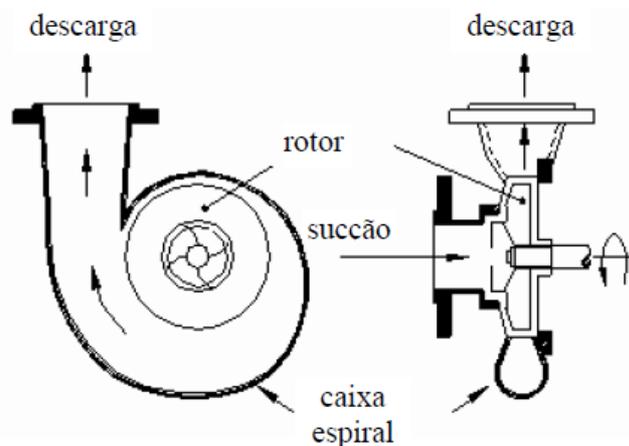


Figura 2.3 Bomba funcionando como bomba (Medeiros, 2004)

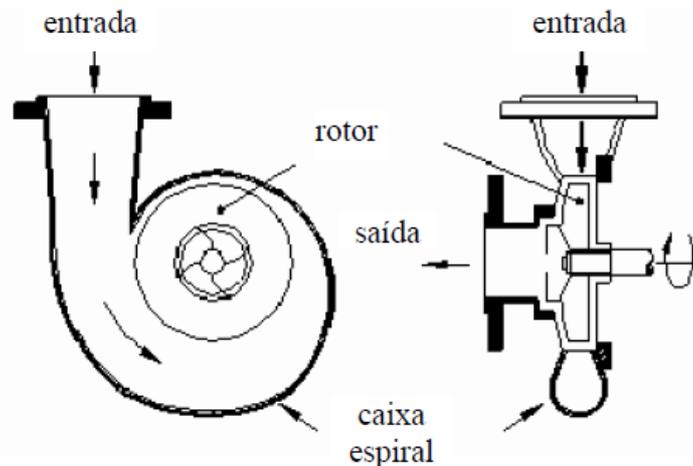


Figura 2.4 Bomba funcionando como turbina (BFT) (Medeiros, 2004)

Além da vantagem financeira, as bombas funcionando como turbina (BFTs) apresentam várias vantagens (Chapallaz, Eichenberg, & Fisher, 1992).

- Disponibilidade: A disponibilidade das bombas, assim como suas peças de reposição, é bem maior que das turbinas.
- Construção: Bombas são equipamentos robustos que exigem pouco conhecimento técnico para serem construídos. Além disso, podem-se encontrar o conjunto bomba motor vendidos juntos, peças essas necessárias para a geração de energia.
- As bombas apresentam uma faixa de tamanhos e potências mais ampla, permitindo assim diversas aplicações diferentes.
- Além da construção, a instalação do conjunto motor-bomba é bem mais simplificada. Outra vantagem é que o acoplamento direto deste conjunto representa perdas bem menores que por transmissões feitos de forma indireta.

Em contrapartida, o fato de o fluxo “natural” das bombas ter sido invertido implica em perdas de rendimento. Para compensar este fato, é necessário aumentar o caudal e a altura manométrica nas BFT para uma mesma velocidade de rotação em relação as bombas funcionando como bombas. Em consequência, o eixo da bomba sofre um esforço maior (Medeiros, 2004).

Outra desvantagem é que as BFTs não possuem controle de caudal. A função destes equipamentos é manter uma velocidade de rotação o mais constante possível para a produção de energia. Com isso, o controle do caudal de saída fica mais complicado de ser realizado. Para esse tal controle, é necessário a utilização de outro equipamento que atue diretamente na velocidade de rotação da turbina (Ricardo, 2007).

2.3.1 SELEÇÃO DA BFT

Pensando nisso, o processo de seleção de uma bomba que irá funcionar como turbina leva em conta os parâmetros citados como desvantagem, ou seja, a queda de rendimento, e a altura manométrica. Para cada modelo de bomba existe uma gama de potência que esta terá uma melhor atuação (Bogdanovic-Jovanovic, Milenkovic, Svrkota, Bogdanovic, & Spasic, 2014).

Alguns autores definiram métodos diferentes para seleção das BFTs que incluem formas diferentes de cálculos, mas que obtenham, no geral, resultados semelhantes. No presente trabalho serão descritos dois métodos. O primeiro trabalho foi desenvolvido por (Viana & Nogueira, 2002) que determina, de forma experimental, coeficientes que relacionam a altura e o caudal das bombas funcionando como bomba (BFB) e da BFT em uma velocidade de rotação específica. Outro autor com um método semelhante foi (Chapallaz et al., 1992), que também determina coeficientes para relacionar a altura e o caudal. Estes coeficientes ajudam na seleção das BFTs. Vale lembrar que ambos são métodos experimentais e por isso podem apresentar resultados diferentes da realidade e estes servem apenas como auxílio para a seleção das BFTs.

Antes de aplicar um método para seleção das BFTs, é necessário definir o tipo de bomba que será utilizado. Para tal, (Chapallaz et al., 1992) definiu uma para uma faixa de potência, qual modelo de bomba é o mais adequado para funcionar como turbina.

Na Figura 2.5 mostra o campo de atuação para cada modelo de bomba que irá funcionar como turbina em uma faixa de potência de 1 a 1000 kW.

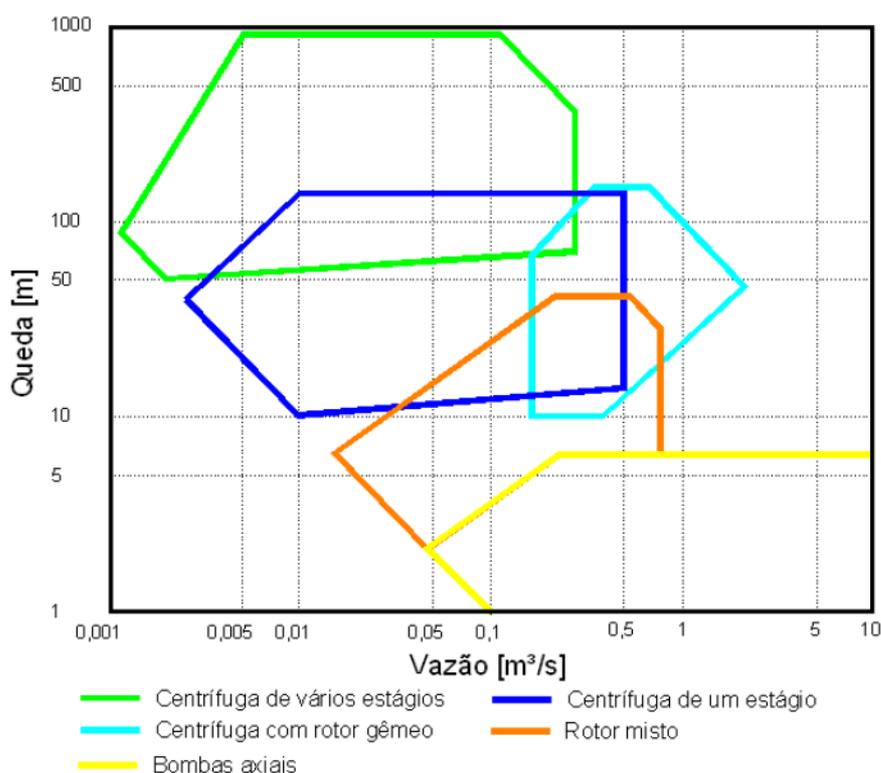


Figura 2.5 Esquema de pré-seleção das BFTs (Ricardo, 2007)

2.3.1.1 MÉTODO DE VIANA

O método de seleção de (Viana & Nogueira, 2002) consiste em encontrar o valor dos parâmetros de altura e caudal nominais das bombas baseados nos valores de altura e caudal de projeto em que as BFTs irão trabalhar.

Para tal são necessários a definição de 3 novas variáveis: o coeficiente de caudal (c_q), o coeficiente de altura (c_H) e a velocidade de rotação específica da BFT no sistema internacional (n_{qA}).

Para obtermos o caudal e a altura nominais da bomba serão utilizados as Equações (2.6) e (2.7).

$$Q_b = c_q \times Q_T \quad (2.6)$$

Onde:

Q_b é o caudal nominal da bomba [m^3/s].

Q_T é o caudal em funcionamento como turbina [m^3/s].

$$H_b = c_H \times H_T \quad (2.7)$$

Onde:

H_b é a altura nominal da bomba [m].

H_T é a altura em funcionamento como turbina [m].

Os valores do coeficiente de caudal (c_q) e do coeficiente de altura (c_H) são obtidos de relações estabelecidas empiricamente (Figura 2.6), a partir de um parâmetro n_{qA} denominado “velocidade específica de rotação”, adimensional. Este obtém-se dos dados do projeto e da velocidade de rotação da BFT de acordo com a Equação (2.8).

$$n_{qA} = \frac{n_T \sqrt{Q_T}}{(gH_T)^{3/4}} 10^3 \quad (2.8)$$

Onde:

n_T é a velocidade de rotação da turbina [rps]

g é a aceleração da gravidade [m/s^2]

Os autores (Viana & Nogueira, 2002) usam este valor de n_{qA} para obter os valores de c_H e c_q , através das relações empíricas apresentadas nas curvas da Figura 2.6. Para uso nestas relações, n_{qA} deve ter um valor entre 40 e 200. Na Equação (2.8) que define n_{qA} , usa-se para a velocidade da turbina n_T a velocidade síncrona dos motores de indução (em rps). Para se obter n_{qA} na gama apropriada (40 a 200), na Equação (2.8) deve-se seleccionar o uso de motores de um ou de dois pares de polos. Viana & Nogueira usam respectivamente 3600 rpm e 1800 rpm

(divididos por 60), visto que os trabalhos por eles descritos se referirem ao Brasil, onde a frequência usada é de 60 Hz.

Na Europa, normalmente, é utilizada uma frequência de 50 Hz. Portanto, devem ser usados os valores de 3000 rpm e 1500 rpm. Opta-se preferencialmente por 3000 rpm (50 rps), e caso n_{qA} dê superior a 200, usa-se o valor de 1500 rpm (25 rps).

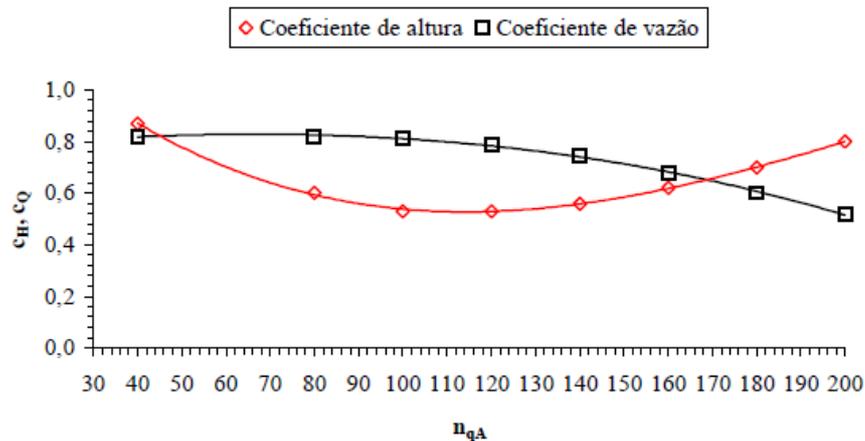


Figura 2.6 Coeficientes de altura e caudal

Com os valores dos coeficientes, já é possível determinar o caudal e a altura nominais da bomba. Entretanto, uma correção se faz ainda necessária. Conforme visto, os valores da velocidade de rotação da turbina são adotados empiricamente. Portanto, é necessário corrigi-los para a situação de operação. Esta diferença ocorre principalmente pelo fato dos motores das bombas serem assíncronos e os valores definidos por (Viana & Nogueira, 2002) serem referentes a geradores síncronos. As Equações (2.9) e (2.10) mostram como devem ser feitas estas correções.

$$Q_{bc} = \frac{n_{nb}}{n_T} Q_b \quad (2.9)$$

Onde:

Q_{bc} é o caudal corrigido da bomba [m^3/s].

n_{nb} é a velocidade de rotação de operação da bomba [rpm].

$$H_{bc} = \left(\frac{n_{nb}}{n_T}\right)^2 H_b \quad (2.10)$$

Onde:

H_{bc} é a altura corrigida da bomba [m].

Por fim, é só selecionar a bomba de acordo com os catálogos do fabricante e o melhor rendimento. O rendimento da BFT, na teoria, é igual ao da bomba selecionada, para a mesma velocidade de rotação.

2.3.1.2 MÉTODO DE CHAPALLAZ

O método de (Chapallaz et al., 1992) é muito semelhante da metodologia adotada por (Viana & Nogueira, 2002). As principais diferenças são, que por (Chapallaz et al., 1992), é possível definir uma gama muito maior de bombas e de potências. Enquanto o método de (Viana & Nogueira, 2002) é utilizado apenas nas bombas radiais ou centrífugas e com uma potência de no máximo 50kW, a metodologia de (Chapallaz et al., 1992) é aplicável em todos os equipamentos citados na Figura 2.5 além de cobrir uma gama de potência de 1kW à 1000kW.

A aplicação do método é bastante semelhante também. Primeiro é necessário saber a velocidade de rotação específica da turbina n_{qt} , através da Equação (2.11). Note-se que este parâmetro não é o mesmo usado por (Viana et al.), sendo definido de forma diferente. Corresponde a cerca de um terço do definido por Viana.

$$n_{qt} = \frac{n_T \sqrt{Q_T}}{H_T^{3/4}} \quad (2.11)$$

Neste caso n_T assume o valor de 1500 rpm.

A seguir, calcula-se a velocidade de rotação específica da bomba n_{qb} , de acordo com a Equação (2.12).

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (2.12)$$

Na sequência, estima-se o caudal da bomba.

$$Q_b = \frac{Q_t}{1,3} \quad (2.13)$$

Este valor é somente uma estimativa para uma pré-seleção. O valor de 1,3 é chamado de coeficiente médio de conversão.

De posse destes dados, é possível determinar o rendimento máximo da BFT em função da caudal e da velocidade de rotação específica através da Figura 2.7.

Com a velocidade de rotação específica e com o rendimento máximo da BFT, é possível determinar os coeficientes de altura e caudal. Este é feito através das Figura 2.8 e Figura 2.9.

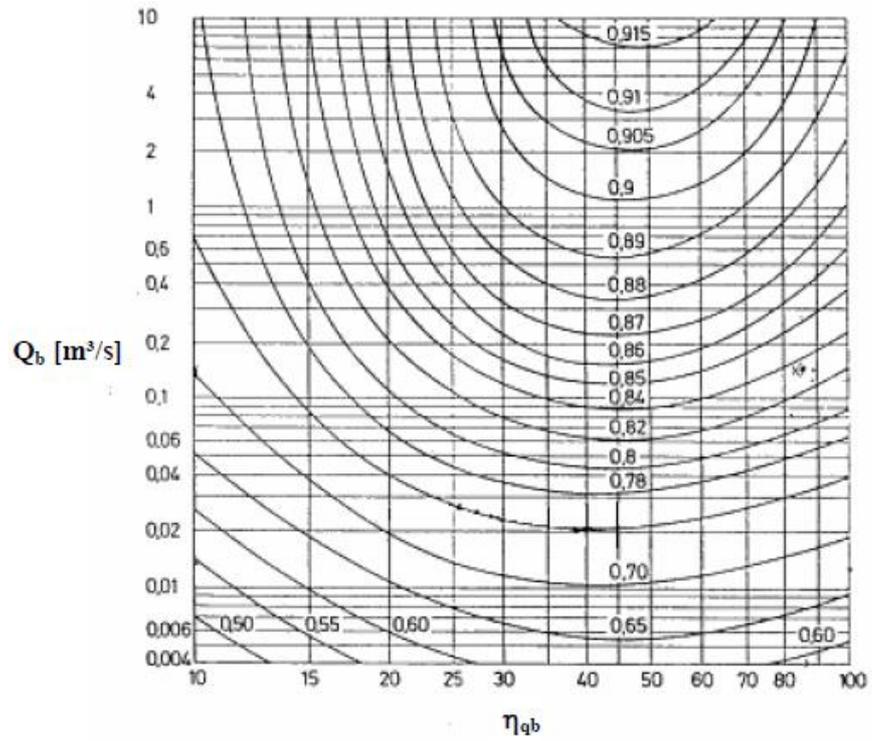


Figura 2.7 Rendimento Máximo da BFT

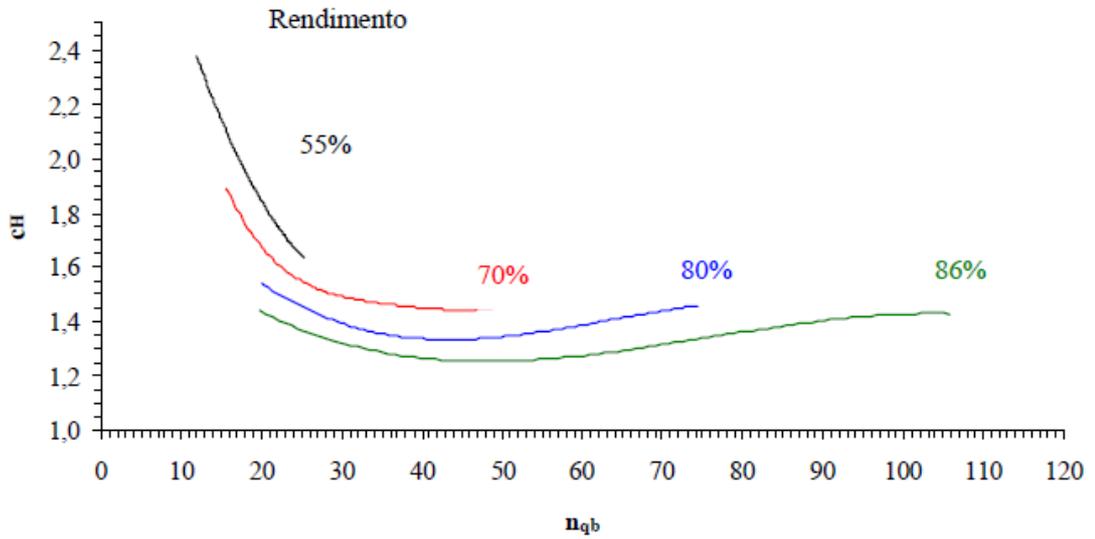


Figura 2.8 Coeficiente de Altura

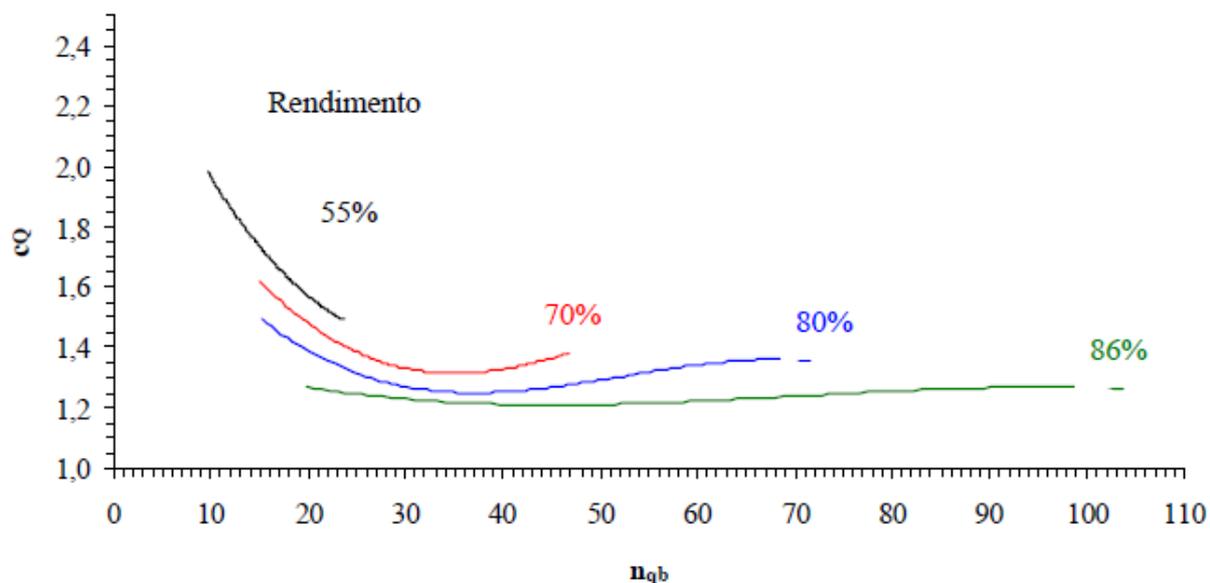


Figura 2.9 Coeficiente de caudal

Finalmente, o valor comercial da altura da bomba e do caudal é obtido através da Equações (2.14) e (2.15).

$$H_b = \frac{H_t}{c_H} \quad (2.14)$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{c_q} \quad (2.15)$$

Assim como no método de Viana, é necessário corrigir os valores utilizando as Equações (2.9) e (2.10). Após isso, é somente selecionar a opção com maior rendimento nos catálogos do fabricante. Vale lembrar mais uma vez, que o rendimento nominal da bomba dado pelo catálogo é igual ao da BFT para uma mesma velocidade de rotação.

Ambos os métodos são de fácil aplicação e bem semelhantes. Deve ser adotado o método que o autor se sentir mais confortável. No caso do presente trabalho, o método de seleção utilizado foi o de Viana por representar a gama de produtos ideal para a aplicação.

2.3.2 AJUSTES NECESSÁRIOS

Quando se pensa na operação, ainda se faz necessário ter atenção a alguns aspectos importantes uma vez que a bomba estará funcionando com fluxo invertido. Isso implica esforços extras da estrutura física do equipamento.

Um dos pontos a serem observados é a pressão na qual a BFT estará em operação. De acordo com (Viana & Nogueira, 2002), a pressão máxima de operação da BFT deve ser menor ou igual a 1,5 vezes a pressão máxima da bomba.

$$P_{Máx T} \leq 1,5 \times P_{Máx b} \quad (2.16)$$

Pelo fato do fluido ser o responsável por mover o eixo da BFT, a potência aplicada ao eixo da BFT é maior que se estivesse funcionando como bomba. Portanto, faz sentido analisar a máxima tensão mecânica admitida ao eixo da BFT (Viana & Nogueira, 2002).

$$\tau_e = 0,81 \left(\frac{P_{et}}{n_t d^3} \right) \quad (2.17)$$

Onde,

τ_e – Tensão mecânica no eixo da bomba [N/m²];

P_{et} - Potência de eixo da BFT [W];

n_t - Velocidade de rotação da BFT [rps];

d - Diâmetro do eixo [m].

A tensão mecânica no eixo deve ser menor que a tensão mecânica admissível do material em questão. Para ter acesso as tensões mecânicas admissíveis dos materiais, deve-se consultar as tabelas de característica específicas de cada material.

Além da pressão e tensão, outra variável que se altera com a inversão do fluxo é a velocidade de rotação da BFT. Portanto é necessário atenção a velocidade de rotação de disparo da BFT.

Rotação de disparo é a velocidade de rotação máxima que uma turbina, trabalhando em vazio, pode atingir. Qualquer velocidade de rotação acima deste valor, pode causar danos físicos ao equipamento. A Equação (2.18) define o valor para a rotação de disparo da BFT. Esta equação foi obtida experimentalmente por (Viana & Nogueira, 2002).

$$n_d \leq 1,53 n_n \quad (2.18)$$

Onde,

n_d – Rotação de disparo

n_n – Velocidade de rotação Nominal da bomba

2.4 CONTROLE DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Um dos desafios postos na geração de energia, é o controle desta geração de forma a manter a qualidade da energia gerada e a vida útil do equipamento.

No caso das turbinas eólicas, dentre outros controles, existe um controle que põe a pá “em bandeira”, girando-a até um ângulo em que o vento já não exerça binário sobre a mesma (Junior, 2014). Com isso é possível controlar todo o equipamento em caso de ventos excessivos, as pás para não se partirem, e os equipamentos eletrônicos para uma possível sobrecarga de energia.

No caso da geração de energia utilizando micro hidráulica, como é o caso das BFTs, a regulação e controle realizados no sistema são mais focados em manter o rendimento do sistema e a qualidade da energia entregue, do que propriamente proteger o material utilizado, uma vez que os materiais utilizados são mais robustos (Derick & Alves, 2010).

Os autores (Armando Carravetta, del Giudice, Fecarotta, & Ramos, 2013) disseram que o sistema hidráulico oferecido por uma rede de distribuição de água é muito inconstante. Sendo assim, a BFT passa muito tempo sem atuar no seu Ponto de Eficiência Máximo, ou *Best Efficiency Point (BEP)*. Neste caso, utilizar de um meio para regular a operação deste equipamento, aumenta o rendimento do sistema e faz que seja fornecida uma energia com melhor qualidade.

As formas mais simples de realizar a regulação dos sistemas são chamadas, por (Armando Carravetta et al., 2013) de regulação hidráulica e regulação elétrica.

A Regulação Hidráulica (HR) consiste em manter as condições ideais de caudal e altura para que a BFT opere sempre próximo ao BEP. Para tal, é utilizado um ramo secundário como *by-pass* que permite que seja alterado o caudal de entrada da BFT. O caudal desta *by-pass*, segundo (Armando Carravetta et al., 2013), deve ser controlado por uma válvula eletricamente controlada que permite passar somente o caudal necessário. Para além desta válvula, é necessária uma válvula de segurança a entrada da BFT que, se fechada, force todo o caudal a passar pelo *by-pass*, evitando assim sobrecarga dos equipamentos (Garay, 1990). Na Figura 2.10, é possível ver um esquema do modelo de HR proposto pelos autores.

Já na Regulação Elétrica (ER), caracteriza-se por um dispositivo de controle eletrônico capaz de variar a frequência e a tensão elétrica a fim de variar a velocidade de rotação da BFT. Com a variação da velocidade de rotação, será capaz de adequar a velocidade de rotação adequada as condições de processo. Assim, podemos aproximar a velocidade de rotação que gere a melhor eficiência global em cada condição de trabalho (Armando Carravetta et al., 2013). Na Figura 2.10, também é possível observar um esquema do modelo ER proposto.

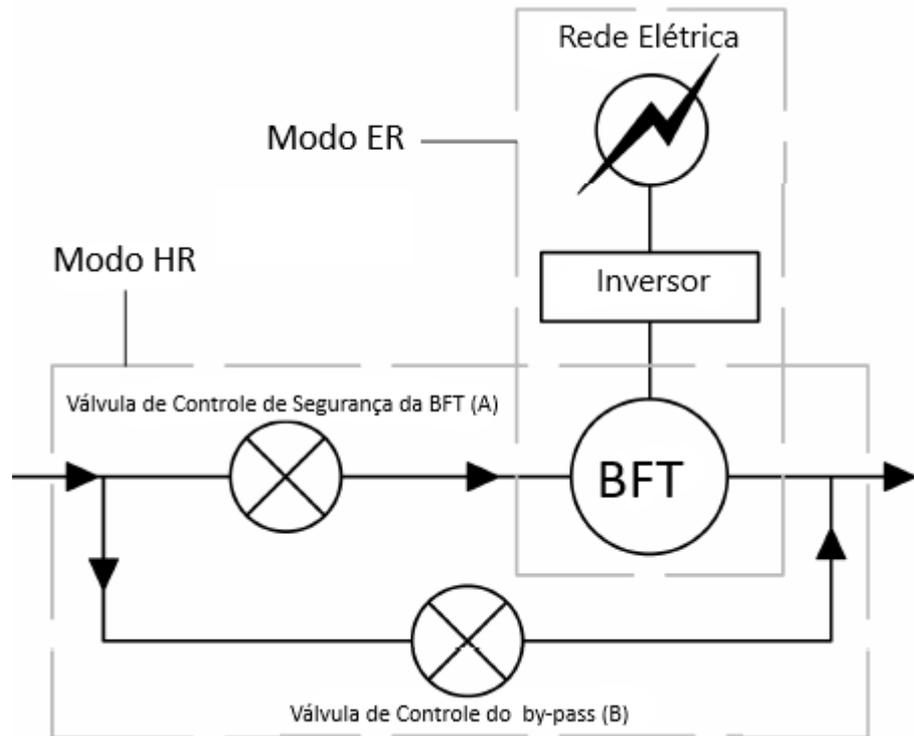


Figura 2.10 Esquemas dos modelos de HR e ER. (Adaptado de (Armando Carravetta et al., 2013))

As condições de funcionamento de ambos modelos podem ser vistas na Figura 2.11. No caso do HR, quando se têm uma altura de operação H_i , mais alta que a altura H_i^T de melhor eficiência para uma velocidade de rotação N (dados pelos pontos a esquerda da curva), a válvula (A) dissipa o excesso de pressão. Em contrapartida, se o ponto de operação estiver à direita da curva, ou seja, com um caudal Q_i maior que o ideal Q_i^T , a válvula (B) abre e reduz o caudal até o mais indicado. No caso do modelo ER, como dito anteriormente, o controlador varia a tensão elétrica e a frequência e por consequência mudam a velocidade de rotação do equipamento. Desta forma a curva de operação é movida de encontro ao ponto de funcionamento, mantendo-o sempre no mais eficiente possível (A. Carravetta, Fecarotta, & Ramos, 2018).

Quando se altera as condições de funcionamento do sistema a fim de obter a melhor eficiência global, adota-se um Estratégia de Operação Variável (VOS) (Armando Carravetta et al., 2013). No caso, das redes de distribuição de água, a operação normal já é bastante variável (Telci & Aral, 2018), o que torna mais dificultada a escolha do modo de regulação entre HR e ER. Para um VOS ideal, o mais desejado seria uma mistura de ambos modos de regulação no mesmo sistema.

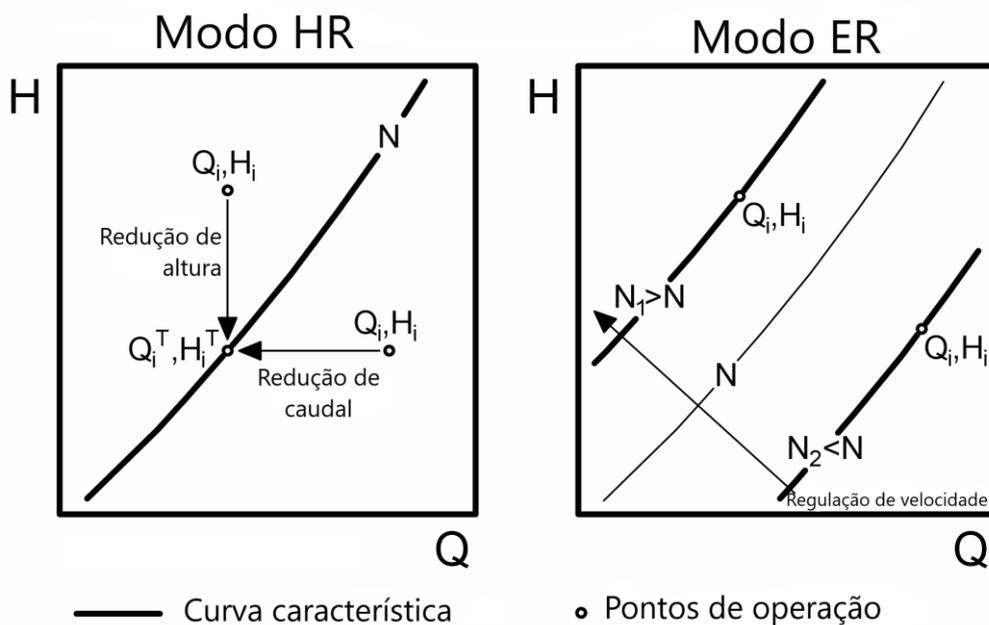


Figura 2.11 Condições de operação dos modelos de HR e ER (Adaptado de (Armando Carravetta et al., 2013))

2.5 EXEMPLOS DE ESTUDOS REALIZADOS SOBRE BFTs

2.5.1 INVESTIGAÇÃO SOBRE ASPECTOS TÉCNICOS DA BOMBA COMO TURBINA EM ESQUEMAS DE MICROGERAÇÃO HIDRICA

Na China, (Binama et al., 2017) realizaram uma pesquisa bibliográfica intensa a fim de justificar e analisar a escolha de uma BFT na micro geração de energia para agricultores de fazendas afastadas da cidade.

O estudo foi realizado em algumas instalações onde são utilizadas BFT para a micro geração de energia. A Tabela 2.2 mostra tais instalações e o ano em que foram construídas.

Após uma pesquisa profunda em artigos publicados anteriormente, (Binama et al., 2017) chegaram as seguintes conclusões:

1- Quando se inverte a direção do fluxo de fluido, as bombas conseguem trabalhar na geração de energia elétrica de forma eficaz e sem falhas mecânicas. Além disso, o custo de uma BFT é bem mais baixo que uma turbina convencional. No entanto, a seleção de uma BFT ainda apresenta dificuldades, dado que os fabricantes de bombas não fornecem dados operacionais no modo reverso de seus produtos.

2- Quanto a eficiência, as BFTs ainda trabalham em condições de carga parcial, tendo assim um desempenho pior que as turbinas convencionais. No entanto, sua eficiência ainda pode ser melhorada através de modificações no projeto do rotor, onde o arredondamento das lâminas

é, até agora, a técnica mais promissora. Além disso, o uso das BFTs visa mais um lucro econômico do que uma maior eficiência.

Tabela 2.2 Instalações onde há uso de BFT

Localização	Capacidade da instalação (kW)	Ano da instalação
Sainyabuli Province, Laos	2	2008
Thima Kenya	2.2	2001
Mae Wei village, Thailand	3	2008
West Java, Indonésia	4.5	1992
Kinko village, Tanzânia	10	2006
Fazenda Boa Esperança, Brazil	45	2007
Ambotia Micro-hydro project, Índia	50	2004
British Columbia, Canada	200	-
Vysni Lhoty, Czech Republic	332	2008

3- Ainda existe uma carência de pesquisa para um universo de velocidades específicas que são encontradas em campo.

4- A instabilidade presente nas BFTs, se dá através de condições fora de projeto, especialmente em condições operacionais críticas como a inicialização e sincronização da máquina.

5- Design diferente e parâmetros operacionais influenciam consideravelmente as condições de estabilidade do fluxo da turbina da bomba, exigindo, assim, maior atenção tanto nas fases de projeto quanto de operação.

Os autores ainda reforçam a necessidade de maiores pesquisas a respeito desta aplicação, pois acreditam que o uso de BFT seja um caminho economicamente interessante.

2.5.2 POTENCIAL HIDROELÉTRICO NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: CONTROLE DE PRESSÃO ATRAVÉS DE BFT

Uma das mais pesquisadas aplicações da BFT, é para substituição das válvulas de redução de pressão. Sendo assim, além de reduzir a pressão do fluido, as BFTs ainda aproveitam a energia do fluido para geração de energia elétrica.

Foi justamente este ponto que foi estudado por (Fecarotta, Aric, Riccardo, & Helena, 2014). O objetivo pretendido pelos autores foi analisar o uso das BFTs em centrais hidrelétricas onde estariam instaladas válvulas de redução de pressão.

No estudo, (Fecarotta et al., 2014) afirmam que o desempenho ideal da BFT é obtido através de uma Estratégia de Operação Variável, que se baseia no tempo de operação da válvula, e no retorno líquido que, por sua vez, é determinado pela produção e economia de energia e pela minimização de vazamentos.

Para conseguir esta Estratégia de Operação Variável, (Fecarotta et al., 2014) afirmam que é necessário um conhecimento a respeito do caudal e da altura manométrica de projeto. Desse modo é possível apostar em um modo de regulação hidráulica (HR). Em tal situação a instalação é composta de dois ramos: o primeiro ramo é um ramo de dissipação / produção onde a BFT e uma válvula são colocados em série, enquanto o segundo ramo é um *by-pass* regulado por outra válvula. Este esquema pode ser visto na Figura 2.12. Sendo assim, o ponto de operação do projeto diminui produzindo efeitos positivos para a regulação de pressão do fluido.

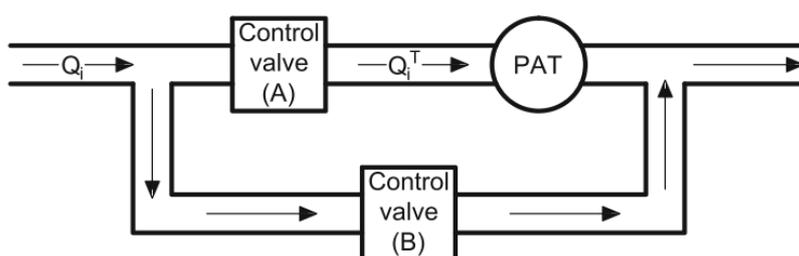


Figura 2.12 Esquema de instalação da BFT com regulação hidráulica (Fecarotta et al., 2014)

Como conclusão, mostra que a instalação de centrais hidrelétricas produz benefícios econômicos interessantes, mesmo na presença de pouca energia disponível. Foi obtido um retorno líquido financeiro num período de 10 anos. Além do retorno financeiro, o uso de BFT ainda, pode causar a redução de vazamentos, o que leva a benefícios ambientais

2.5.3 UM NOVO ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DE BAIXO CUSTO DE BFTS PARA RECUPERAR ENERGIA EM ÁREAS RESIDENCIAIS

No ano de 2018, (A. Carravetta et al., 2018), publicaram um estudo utilizando a aplicação de BFT para recuperação de energia em áreas residenciais.

Neste estudo, os autores analisaram um novo tipo de regulação do fluxo a fim de obter melhor rendimento global do processo. Neste estudo, os autores utilizaram uma técnica de regulação elétrica e hidráulica, além de comparar tal técnica com a regulação hidráulica e a regulação elétrica, separadamente. Para tal, foi utilizada uma instalação de baixo custo fornecida com duas BFTs, que podem funcionar como turbinas simples, em série ou paralela, e três válvulas on / off, cujas operações síncronas regulam os fluxos e a perda de carga.

A nova solução técnica, proposta por (A. Carravetta et al., 2018) é baseada em um relaxamento da gama de pressão e em um modo simplificado de regulação, o esquema Single-Serial-Parallel (SSP), onde as duas BFTs são ligadas com três válvulas liga-desliga para obter três condições de trabalho: único, série e paralelo. Sendo assim, a condição de trabalho para a geração de energia, se adapta a condição de trabalho da rede de água, mudando de um modo para outro quando a queda de pressão diminui. Esta técnica garante a maximização da eficácia do sistema.

A instalação apresentou um rendimento aproximadamente igual a 20%. De acordo com os autores, este valor é aparentemente muito inferior a 35%, que foi o rendimento obtido no modo de regulação hidráulica clássica da BFT para um tamanho de instalação semelhante. No entanto, com o SSP, notou-se que o custo da instalação reduz para um terço. Os autores, então, concluem que o sistema só é recomendado para instalações de baixa produtividade energética, uma vez que em um sistema com mais energia disponível, seria mais interessante a abordagem clássica.

2.5.4 OPTIMIZAÇÃO DO DESIGN DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA USANDO UMA ABORDAGEM DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Neste estudo, (Lima, Brentan, & Jr, 2018) utilizaram as BFTs para otimizar instalações de distribuição de água.

Os autores sugerem para este estudo, a substituição das válvulas redutoras de pressão presentes em redes de distribuição de água residencial por BFTs a fim de recuperar energia dissipada nas válvulas.

Este estudo de caso foi realizado em uma rede de distribuição de água localizada na cidade de Santa Bárbara do Oeste - SP, Brasil. Esta rede contém 25 nós e 31 tubos, e uma VRP já está instalada. O consumo médio para o período inicial de operação é de 67,5 L/s.

Ao fim do estudo, os autores concluíram que os custos adicionais para aumentar os diâmetros dos tubos, nos locais onde seriam instalados as BFTs, são superados pelo benefício de recuperação de energia. Além disso, a análise de sensibilidade da tarifa de energia e a pressão mínima exigida pela rede, mostraram que mesmo com condições desfavoráveis, ou seja, baixa tarifa de energia e alta pressão mínima na rede, a recuperação de energia é viável. Ainda foi observado que, quando duas BFTs são selecionadas, uma para operar com as condições iniciais de consumo e a segunda a ser instalada após 10 anos de operação, os benefícios observados aumentaram significativamente.

INSTALAÇÃO HIDRÁULICA

A coleta dos dados necessários no sistema com uma BFT, foi feita em uma instalação experimental situada no DEEC da FCT. Já havia, no entanto, uma instalação hidráulica existente. Portanto, foi realizado a otimização da mesma e implementação de melhorias a fim de um melhor design visual e coleta de dados mais precisos. No presente capítulo, serão apresentadas todas as alterações feitas no sistema, evidenciando o que estava instalado e o que foi substituído e detalhando de todo o sistema.

3.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL EXISTENTE

A instalação existente tinha a função de realizar o aproveitamento de energia através de uma BFT. Tal instalação foi projetada e implementada por (Sebastião, 2017). Segue a seguir alguns pontos e escolhas realizados pela autora. É possível ver o projeto completo na referência citada.

- PARÂMETROS DO SISTEMA

A autora sentiu necessidade de definir alguns parâmetros de funcionamento do sistema para que fosse possível projetar o mesmo e selecionar os materiais. São eles:

1. Fluido: água limpa sem rejeitos
2. Altura disponível: 4m
3. Caudal disponível: 3,4 L/s
4. Diâmetro da tubulação: 50 mm
5. Máxima pressão: 10 bar

Estes parâmetros foram utilizados para a seleção da BFT e, a partir daí, de todo o sistema.

- TUBULAÇÃO

A escolha de uma tubulação baseia-se no material que suporta as condições de trabalho e que apresente a menor perda de carga distribuída. Pensando nisso a autora definiu que a tubulação utilizada na instalação deveria ser feita de plástico, pois quando comparado com os materiais metálicos, tem um menor custo para uma mesma rugosidade. Além disso, o plástico apresenta uma rugosidade muito baixa de 0,0015 mm, segundo (Nakayama & Boucher, 1999).

Portanto, foram utilizados tubos de PEAD de 50 mm de diâmetro (DN50), conforme parâmetro pré-definido. A escolha do PEAD se deu por este material ser mais flexível em comparação ao PVC, que é o material mais semelhante.

- RESERVATÓRIO

Para manter os parâmetros adotados, o reservatório deve ter uma capacidade de 300 litros. Isso garante com que o sistema seja abastecido por 5 min, de acordo com a autora.

Entretanto, o sistema apresentado é fechado, uma vez que o fluido retorna ao reservatório. Portanto este, só tem a função de armazenar o fluido e equilibrar as pressões.

- BOMBA E BFT

A BFT foi selecionada conforme as condições de operação pré-definidas (4m de altura, 3,4 L/s de caudal). A descrição completa da BFT selecionada pode ser vista no ANEXO I e a curva característica está mostrada na Figura 3.1.

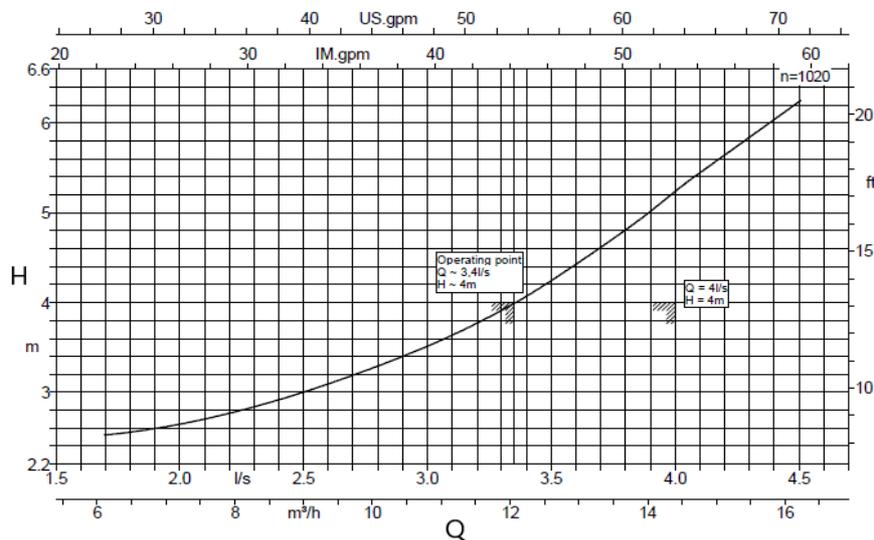


Figura 3.1 Curva Característica da BFT

A bomba utilizada para funcionar como turbina foi a *KSB Etanorm 32-125 Turbine*.

Já para a seleção da bomba, a autora analisou toda a perda de carga existente entre a saída da bomba e a entrada da BFT para assegurar que a BFT iria operar nas condições adequadas. Após esta análise, a autora chegou à conclusão que era necessária uma bomba com, pelo menos, 10 metros de altura manométrica.

Sendo assim, como forma de garantia, a bomba selecionada foi a CAPRARI CM32-16C que possui uma capacidade de 20 metros de altura manométrica. As características da bomba podem ser vistas no Anexo II e a curva característica da mesma pode ser visto na Figura 3.2.

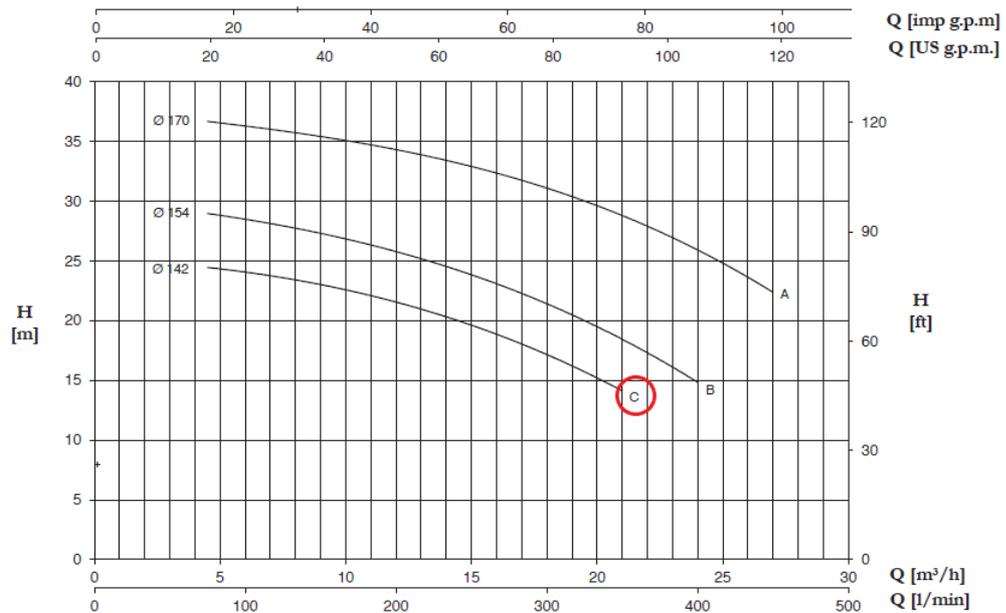


Figura 3.2 Curva Característica da Bomba. Tipo C.

- INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para mensurar a pressão e o caudal foram utilizados equipamentos adequados para cada função.

Para a medição da pressão foram utilizados 2 manômetros como mostrados na Figura 3.3. Estes manômetros tem uma gama máxima de 10 bar.



Figura 3.3 Manômetros 0 - 10 bar

Já para a medição do caudal foi utilizado um caudalímetro digital. Para coletar estes dados, é necessário a utilização de um sistema de Arduino. O caudalímetro utilizado foi produzido pela Resopre-Janz Company, Figura 3.4, e tem um limite de 12,24 m³/s.

Para além disso, a entrada e saída do caudalímetro tem diâmetro de 40mm, sendo necessário uma redução, uma vez que a tubulação tem diâmetro de 50mm.



Figura 3.4 Caudalímetro

3.2 ALTERAÇÕES À MONTAGEM INICIAL

A otimização do sistema teve o intuito de tornar a instalação mais eficiente, visualmente agradável e o mais didática possível, de modo que todos possam compreender o processo de aproveitamento de energia numa rede de distribuição de água. Além disso, o sistema precisa cumprir com o seu objetivo de geração de energia.

Vale reforçar que uma rede de distribuição de água, é um sistema pensado para funcionar 24h por dia e 7 dias por semana com o objetivo principal de distribuir água. Entretanto, toda a estrutura da rede permite a implementação de um sistema gerador de energia. Mas, para tal, os equipamentos necessários para a geração de energia elétrica e toda modificação realizada na rede devem ter o cuidado de não afetar o objetivo principal da rede.

Todos os pontos anteriormente citados foram levados em consideração para a implementação do sistema, além de deixar a instalação preparada para coleta de dados e para complementações necessárias para trabalhos futuros, como controle totalmente automatizado da instalação.

Foi montado um esquema do projeto de implementação que foi usado como guia para a execução das alterações. Este esquema pode ser visto na Figura 3.5.

O projeto foi feito em vista isométrica e consta com uma visão geral de toda a instalação hidráulica experimental presente no DEEC.

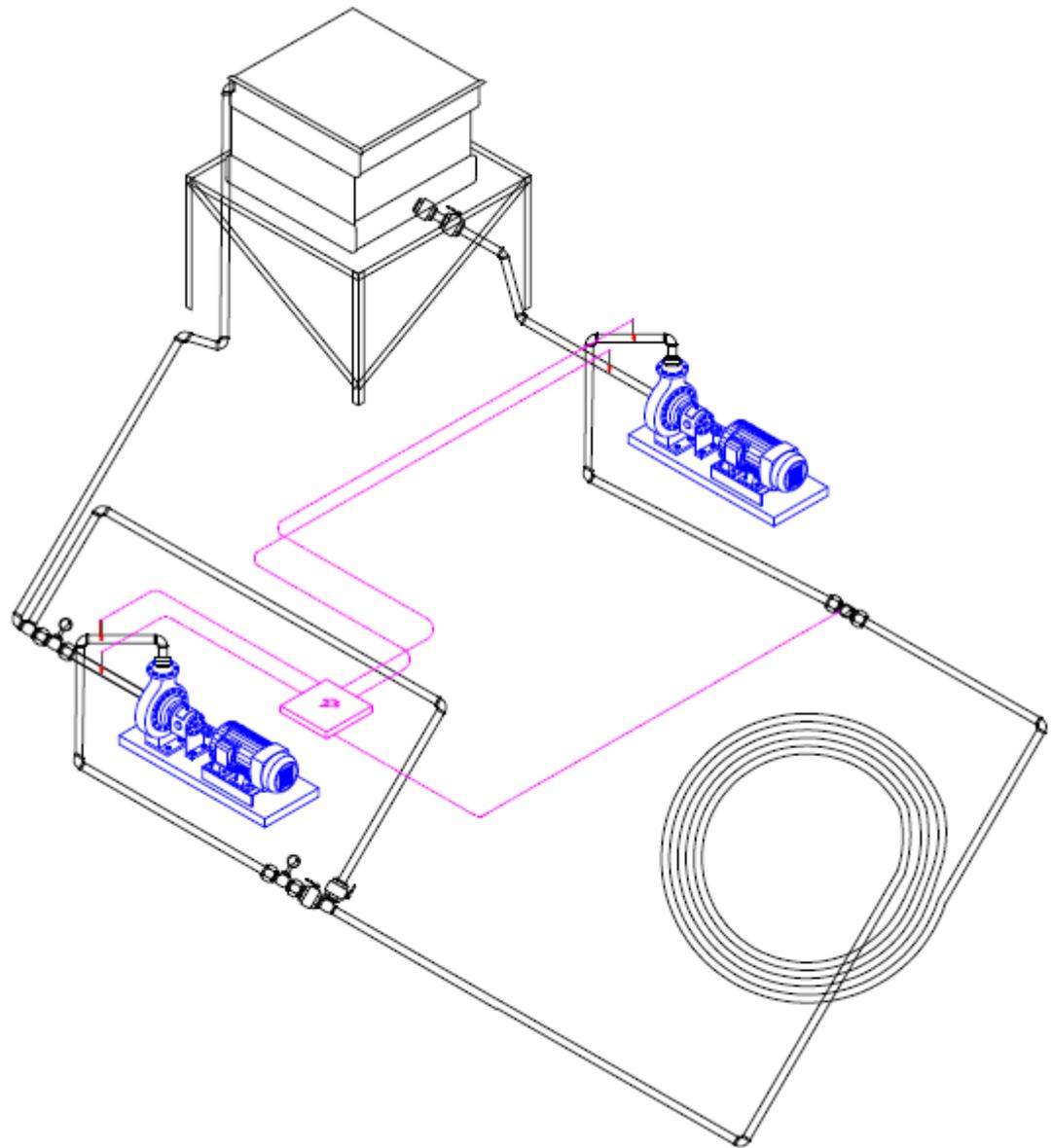


Figura 3.5 Esquema da instalação hidráulica

Conforme visto na imagem, a instalação atual consta com tubos rígidos e com monitoramento automático do sistema utilizando sensores digitais, para além de um reservatório, que abastece o circuito e de uma bomba, que fornece energia para o sistema. A seguir o fluido segue por uma tubulação que simula todo o caminho que a água percorre e adiciona uma perda de carga distribuída ao sistema. Esta perda de carga é necessária para uma simulação mais real, pois numa rede real, o fluido percorre longos caminhos da estação até o destino final. Após o caminho encontra-se uma bifurcação onde o fluido pode ir para a BFT ou para um *by-pass*. Este *by-pass* garante, tanto o funcionamento mais eficiente da BFT quanto a correta distribuição de água para o consumidor. Já a BFT está posicionada a fim de reduzir a pressão do fluido, aproveitando essa energia para a geração de energia elétrica, e adequar a distribuição nas condições mais ideais. Por fim o fluido retorna ao reservatório e o ciclo se reinicia.

Portanto, foram necessários alguns ajustes no design da instalação anterior. Entretanto, alguns parâmetros foram mantidos. A seguir, serão enumerados os pontos modificados e os pontos mantidos sempre apontando a justificativa para tal decisão.

- PARÂMETROS DO SISTEMA

A definição de certos parâmetros é de fundamental importância para o início de um projeto. Sendo assim, alguns parâmetros adotados anteriormente foram mantidos. São eles:

1. Fluido: água limpa sem rejeitos
2. Diâmetro da tubulação: 50 mm
3. Máxima pressão: 10 bar

O tipo do fluido não foi alterado, uma vez que o sistema ainda é referente a rede de distribuição de água. Os diâmetros também não foram alterados por conta da reutilização máxima do material existente, incluindo conexões. Já a pressão máxima obedece a pressão suportada pela nova tubulação.

Propositamente, o sistema foi definido a partir da bomba, o oposto do executado pela autora anterior. Assim, obrigou-se todo o sistema a funcionar com as condições de pressão e de caudal impostos pela bomba. Dessa forma, é possível selecionar a BFT adequada para as condições já presentes no sistema.

Esta medida foi tomada uma vez que para uma condição real de implementação de uma BFT em um sistema de abastecimento de água, é analisado primeiro as condições de pressão e caudal que estão presentes no sistema existente. Na instalação em estudo, estas condições foram dadas pela bomba já instalada.

3.2.1 BOMBA

A bomba presente no projeto anterior foi mantida. Conforme dito, todo o sistema será dimensionado a partir daí e seguindo os parâmetros estipulados.

Na Tabela 3.1 é possível observar todas as características da bomba escolhida. A descrição completa, assim como as curvas características estão no ANEXO II .

Esta é uma bomba centrífuga monobloco equipada com um motor trifásico de 2 polos. Na Figura 3.6 é possível observar a bomba antes de estar instalada no sistema.

Vale lembrar que a bomba foi verificada e aprovada, isto é, a bomba não apresentou nenhuma avaria e teve seu funcionamento em perfeito estado.

Tabela 3.1 Características da bomba

Modelo	CM32-16C
Caudal (m³/h)	4,5-21
Altura Manométrica (m)	24,4 -14,1
Potência (kW)	1,5
U Δ (V)	220 - 240
U estrela (V)	380 - 415
Corrente (A)	4
Frequência (Hz)	50
Velocidade de Rotação (RPM)	2900



Figura 3.6 Bomba Centrífuga Monobloco Caprari CM32-16C

3.2.2 BFT

No caso da BFT, foi necessário a verificação empírica para comprovarmos a utilização do equipamento que já estava instalado, ou se seria mais adequada uma nova BFT. Para tal, foi utilizado o Método de Viana, apresentado na Secção 2.3.1.1. Conforme mostrado, este método serve para selecionar a BFT mais eficiente para as condições de trabalho aplicáveis.

Para iniciar a seleção da BFT, é necessário definir as tais condições de pressão e caudal em que ela será submetida. Neste caso, as condições de trabalho foram definidas pela bomba do sistema. Sendo assim, optou-se por utilizar as condições em que a bomba apresenta um

ponto de operação com um rendimento mais elevado. Na Figura 3.7, curva de rendimento da bomba, pode-se observar que a bomba opera no rendimento máximo quando seu caudal assume um valor entre 17 m³/h e 18 m³/h. Portanto, adotou-se o maior valor, 18 m³/h para o caudal do sistema, de modo a trabalhar sempre no máximo ponto possível.

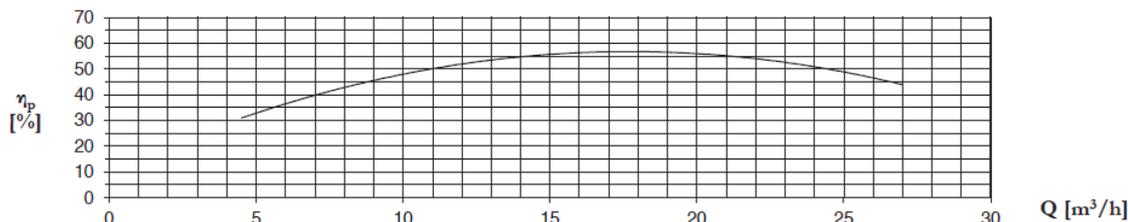


Figura 3.7 Curva de rendimento da bomba

Quando utilizamos o valor de 18 m³/h na curva de operação da bomba, apresentada na Figura 3.2, retiramos um valor de 17,2 m para a altura manométrica. Portanto, foram esses os dados de operação que serão utilizados no método de Viana para a pré-seleção da BFT.

Sendo assim, conseguiu-se iniciar os cálculos seguindo o que foi proposto na Seção 2.3.1.1 e os mesmo seguem abaixo.

$$n_{qA} = \frac{\frac{3000}{60} \sqrt{\left(\frac{18}{3600}\right)}}{(9,81 \times 17,2)^{3/4}} 10^3 = 75,52$$

Com o n_{qA} e o gráfico representado na Figura 2.6, determinou-se o c_q e o c_H . Estes assumem, respectivamente, os valores de 0,84 e 0,61.

$$Q_b = 0,84 \times 18 = 15,12 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_b = 0,61 \times 17,2 = 10,5 \text{ m}$$

Em seguida, foi preciso corrigir os valores para o caso real onde será aplicado. Como esse valor ainda é desconhecido foi adotado o valor da velocidade de rotação nominal da BFT da instalação anterior de 1020 rpm. Sendo assim, corrigindo o valor para a velocidade de rotação nominal de 1020 rpm.

$$Q_{bc} = \frac{1020}{3000} \times 15,12 = 5,14 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_{bc} = \left(\frac{1020}{3000}\right)^2 \times 10,5 = 1,21 \text{ m}$$

Portanto, os dados necessários para a seleção da bomba são 5,14 m³/h, para o caudal, e 1,21 m, para a altura manométrica.

De posse destes dados, foi possível utilizar o software KSB-EASYSELECTION. Este software é disponível no site da KSB e permite inserir todos os dados desejáveis para a operação do equipamento, assim como a sua aplicação e finalidade. Tal software pode ser acessado através do link: (https://www.ksb.com/ksb-en/Select_your_pumps_and_valves/ksb-easyselect/).

Após adicionado todos os dados anteriormente calculados, o software devolveu uma lista de bombas que se aplicavam àquelas condições de operação. Na Figura 3.8 é possível observar uma parte da lista retirada do software.

Conforme pode ser visto na Figura 3.8, a bomba com o maior rendimento para tais condições é a bomba KSB Etanorm 050-032-125, com uma eficiência de 61,29%.

	Linha de produção	Tamanho da bomba	Seleção	Rendimento	Potência absorvida	Velocidade	Passagem livre	NPSH requerido	Potência máx. da curva	Relação Q / Q _{bep}
1	Etanorm/Etabl	050-032-125	<input checked="" type="checkbox"/>	61,29 %	0,03 kW	842 rpm	6 mm	0,64 m	0,03 kW	81,37 %
2	Etanorm/Etabl	050-032-125.1	<input type="checkbox"/>	58,87 %	0,03 kW	842 rpm	6 mm	0,74 m	0,03 kW	109,98 %
3	Etanorm (SKD)	050-032-125	<input type="checkbox"/>	61,29 %	0,03 kW	842 rpm	6 mm	0,64 m	0,03 kW	81,37 %
4	Etanorm (SKD)	050-032-125.1	<input type="checkbox"/>	58,87 %	0,03 kW	842 rpm	6 mm	0,74 m	0,03 kW	109,98 %

Informação do produto		Dados hidráulicos										
Ponto nº	Velocidad	Caudal mássico	Caudal	Altura manométrica de compressão	Pressão de compressão	Rendimer	Q2Qor	Potência	Potência - Curva	Caudal mín.	Caudal mássico mín.	Pressão sonora
1	842 rpm	1,43 kg/s	5,14 m³/h	1,21 m	0,12 bar.r	61,3 %	81,4 %	0,03 kW	0,03 kW	0,95 m³/h	0,26 kg/s	0 dBa

Figura 3.8 Lista de bombas para seleção

Após selecionar a bomba, o software solicita dados como o tipo de ligação, o motor (elétrico ou por combustível), a zona de instalação, dentre outros detalhes inerentes a instalação da BFT. Finalizado o processo, o software devolve um relatório que informa as condições ideais de operação da BFT e confirma o modelo ideal para tal aplicação.

Sendo assim, a BFT selecionada pelo software, é a KSB Etanorm 050-032-125. Esta BFT é a mesma que estava na instalação anterior.

Dito isso, segue, na Tabela 3.2, os dados técnicos da BFT. Esta também se trata de uma bomba centrífuga monobloco que vem com um motor de indução acoplado (Figura 3.9). Como

este motor irá funcionar, para esta tese, como um gerador, é interessante destacar as características deste motor. Estas características estão destacadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.2 Características da BFT

Empresa	KSB
Modelo	Etanorm 50-32-125
Gama de Caudal (m³/h)	5,14
Altura Manométrica (m)	1,21
Rendimento (%)	61,29
Velocidade de Rotação (RPM)	842
Potência Absorvida (kW)	0,03
Caudal Mínimo (m³/h)	0,95
Fluido	Água limpa



Figura 3.9 BFT selecionada

Tabela 3.3 Características do motor acoplado

Empresa	Siemens
Modelo	3 MOT1LA7083-6AA10-Z
Potência (kW)	0,55
Tensão (V)	230-400
Corrente (A)	2,8/1,59
Fator de Potência	0,74
Velocidade Nominal (RPM)	910
η (%)	67,5

3.2.3 RESERVATÓRIO

O reservatório também foi mantido. O nível que o reservatório apresenta é o suficiente para alimentação do sistema e para cumprir corretamente as funções esperadas para tal.

O reservatório utilizado possui 250 litros de capacidade e foi fabricado de fibra de vidro, vide Figura 3.10. Se trata de um material resistente, porém mais denso que o polietileno, por exemplo. O reservatório em questão possui 11kg, vazio, segundo a MOMEL S.A, fabricante do reservatório. Este serve tanto para o abastecimento do sistema, quanto para a descarga do fluido e equilíbrio da pressão inicial do sistema.



Figura 3.10 Reservatório

3.2.4 TUBULAÇÃO

A utilização de um material plástico se manteve uma vez que estes apresentam uma perda de carga muito baixa.

Conforme dito anteriormente, a autora escolheu utilizar tubos de PEAD (Figura 3.11) pelo fato destes serem flexíveis, o que elimina a necessidade de conexões entre tubos, como uniões e curvas, e por sua vez, reduz a perda de carga total. Entretanto, os tubos flexíveis ficam visualmente desagradáveis. Além disso, os tubos não apresentam uma flexibilidade suficiente para o curto espaço disponível para a instalação sendo necessário a utilização de amarrações para manter os tubos nos locais desejados.



Figura 3.11 Instalação inicial

Por estes motivos, foi decidido utilizar tubos rígidos de Policloreto de Vinilo, ou PVC, na instalação. Os tubos rígidos apresentam um melhor visual e delimitam o espaço adequado da instalação. A nova instalação pode ser vista na Figura 3.12. Além disso, este composto é capaz de formar uma tubulação com propriedades bastante interessantes. Como por exemplo, tubos de PVC são rígidos e são isolantes elétricos. Também são resistentes a soluções salinas e ácidos.

A única restrição deste tipo de material é quanto à temperatura do fluido que eles transportam. Estes tubos suportam uma temperatura de até 20°C. Após essa temperatura o PVC começa a perder suas propriedades gradativamente. Como na aplicação em questão, muito dificilmente a água estará acima deste valor, não é necessário precaução quanto a este fato.

Na Tabela 3.4 pode-se observar algumas propriedades dos tubos escolhidos.

Tabela 3.4 Propriedades dos Tubos de PVC

Diâmetro (mm)	50
Espessura da parede (mm)	1,6
Densidade (g/cm³)	1,40
Pressão Máxima (bar)	10
Resistência a rotura em tração (kg/cm²)	250

A desvantagem com esta escolha é a necessidade do uso de conexões para adequar a tubulação ao caminho percorrido pelo fluido. Estas conexões aumentam a perda de carga do sistema. Contudo, esta perda de carga é necessária, uma vez que se pretende uma simulação do sistema aplicado a uma rede de distribuição real.

Quanto as conexões e válvulas necessárias para o sistema, foram analisadas as que melhor atendiam as condições do projeto. Na Tabela 3.5 abaixo contém imagens e uma breve descrição de cada item utilizado.

Tabela 3.5 Conexões e Válvulas

Descrição	Material	Função	Esquema
Adaptador Macho 50mm x 1" ½	PEAD	Conectar a tubulação às conexões	
Tê 50 x 40 x 50 mm	PEAD	Criar um ponto de redução de diâmetro	
Curva 90° 50mm	PEAD	Mudar a direção do fluxo em 90°	
Tampão 50mm	PEAD	Bloquear o fluido	
Saída de reservatório 1" ½	Latão	Conectar a saída do reservatório com o sistema	

Descrição	Material	Função	Esquema
Válvula Esfera 1" ½	Latão	Bloquear um possível caminho para o fluxo	
Flange 2"	Inox	Possibilitar a conexão com as bombas	
Redução dobro macho 2" x 1" ½	Latão	Conectar conexões de diferentes diâmetros	
União 1" ½	Latão	Unir conexões fêmeas com machos	

Após a seleção de todo material, iniciou-se o trabalho de montagem e substituição da instalação. O posicionamento da bomba e da BFT foi escolhido conforme melhor se adequou ao espaço disponível. A seguir, foram feitas as medições e os cortes dos tubos rígidos e, por fim, a interligação de todos os equipamentos dos sistemas. Neste momento, foi necessário a substituição de algumas conexões que apresentaram fugas. Optou-se pelas conexões de PEAD pois as mesmas suportam melhor a pressão e dão ao sistema, uma maior mobilidade, para o caso de ser necessário montá-lo num ambiente diferente.

Após conclusão da montagem, a instalação apresenta o visual mostrado na Figura 3.12 e na Figura 3.13.

A mudança dos tubos se deu na maioria da instalação, exceto na parte que simula o comprimento do sistema da rede. Nesta parte, mostrada na Figura 3.12, o tudo PEAD flexível foi mantido por ocupar menos espaço quando enrolado.

Nas imagens também é possível identificar a maioria das conexões utilizadas e a disposição dos equipamentos citados nas secções anteriores.



Figura 3.12 Instalação atual



Figura 3.13 Detalhe da instalação

3.2.5 SENSORIZAÇÃO DO SISTEMA

O último passo para a finalização da instalação, e também um dos objetivos principais do presente trabalho, foi a sensorização do sistema, ou seja, dotar o sistema de sensores e transdutores para uma leitura digital dos parâmetros da instalação.

Conforme mostrado, anteriormente, a pressão era mensurada a partir de manômetros analógicos e o caudal era obtido através de um caudalímetro de grande porte.

Dotar a instalação com sensores digitais é um dos objetivos principais do presente trabalho. Tais sensores permitem que os dados sejam coletados em tempo real e com uma maior precisão. Além disso, ainda existe a possibilidade de armazenamento dos dados em plataforma digital, o que permite um tratamento e interpretação das informações com mais facilidade, podendo estes serem usados em um software para controle automático de todo o sistema, por exemplo.

Foi colocado um número maior de sensores na instalação. Foram colocados 4 transdutores de pressão. Dois deles foram colocados na entrada e saída da bomba, além de outros dois na entrada e saída da BFT. Quanto ao caudal, foi instalado um caudalímetro na saída da bomba. O esquema e posicionamento dos novos pontos de coleta de dados podem ser vistos no esquema mostrado na Figura 3.5 e na Figura 3.14 a seguir.

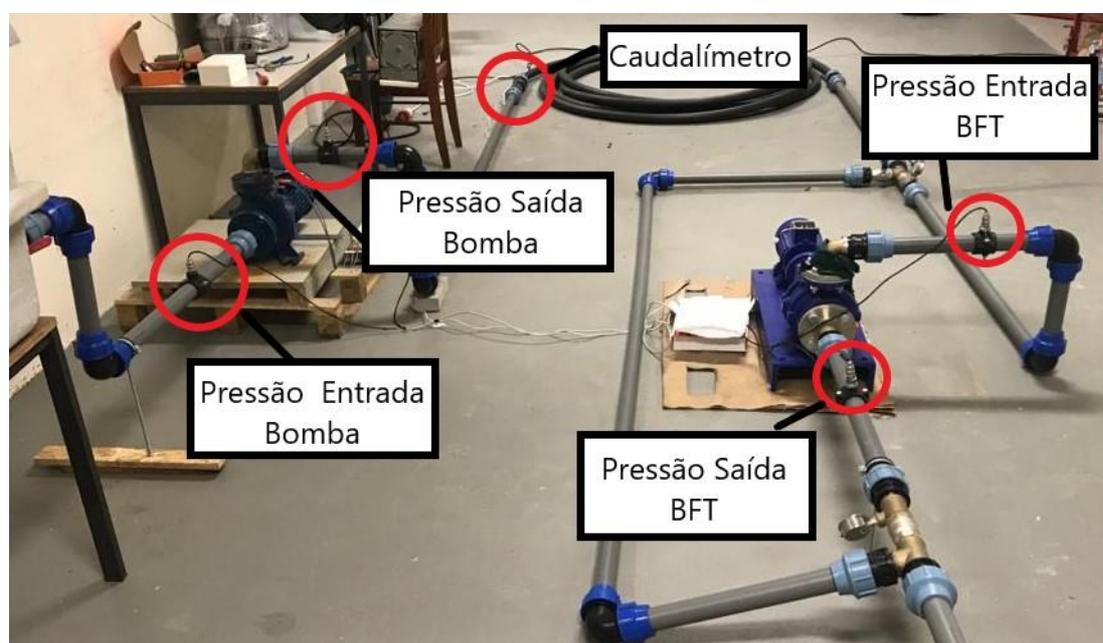


Figura 3.14 Esquema e posicionamento dos sensores

As informações geradas pelos sensores de pressão e de caudal foram lidas por um Arduino instalado juntamente da parte elétrica da instalação. Este Arduino é responsável por coletar e disponibilizar para leitura todos os dados da instalação.

Nas secções a seguir, estão as especificações de cada item responsável pela sensorização do sistema, além do programa utilizado.

3.2.5.1 SENSOR DE PRESSÃO

Os sensores de pressão são do tipo 3 pinos (positivo, negativo e sinal) (Figura 3.15(a)). O terminal do sinal é a saída do transdutor e responsável por informar, na forma de um sinal analógico, ao Arduino qual é a pressão lida no ponto onde está aplicado. Estes sensores são acoplados a tubulação por meio de uma conexão especial que faz com que o sensor esteja em contato direto com o fluido (Figura 3.15(b)). As características dos sensores de pressão estão dispostas na Tabela 3.6.



(a)



(b)

Figura 3.15 (a) Transdutor de Pressão, (b) Conexão para transdutor

Tabela 3.6 Características do Transdutor de Pressão

Empresa	DFRobot
Modelo	Gravity 3-pin
Fluido	Líquido/gás sem corrosão
Faixa de Pressão	0~1,6 Mpa
Tensão de Entrada	+ 5 VDC
Tensão de Saída	0,5 ~ 4,5 V
Precisão da Medição	0,5% ~ 1% FS

3.2.5.2 CAUDALÍMETRO

O caudalímetro utiliza uma tecnologia chamada de Efeito *Hall*. Este efeito consiste, basicamente, no uso de um íman em uma das pás da turbina do sensor e um sensor de campo magnético preso no corpo do sensor. Assim, toda vez que o íman se aproxima do sensor de campo magnético, gera um pulso. Este pulso é o sinal que o Arduino precisa para calcular o caudal presente na tubulação.

De modo a minimizar as perdas de carga, foi escolhido um sensor com um diâmetro de 2", que é o mais próximo de 50mm (diâmetro da tubulação) que está disponível comercialmente. Na Figura 3.16 mostra o sensor utilizado onde é possível ver as pás citadas anteriormente. A exemplo do transdutor de pressão, na Tabela 3.7 é possível ver a descrição técnica do caudalímetro.



Figura 3.16 Caudalímetro

Tabela 3.7 Características do Caudalímetro

Empresa	Grodia
Modelo	GR-216
Dimensão	2"
Fórmula de trabalho	$F=(0,2*Q) \pm 2\%$, $Q=L/min$
Faixa de trabalho	10~200 L/min
Tensão	5 ~ 24 VDC
Pressão máxima	1,75 MPa

3.2.5.3 ARDUÍNO

O Arduino foi responsável pela interligação de todos os pontos de coleta de dados, armazenamento desses dados, interpretação e apresentação dos dados finais ao utilizador. Para isso, foi utilizado um Arduino DUE, Figura 3.17.

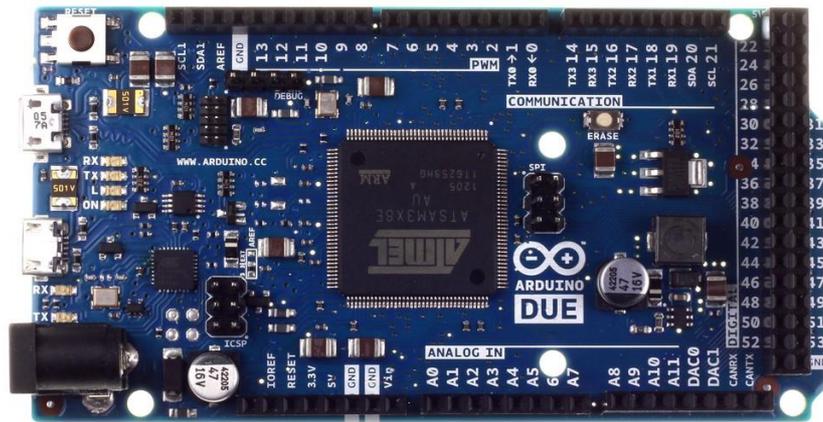


Figura 3.17 Arduino DUE

O desafio foi fazer a interligação dos sensores com a placa de comando e permitir que esta placa seja de fácil acesso para que os dados sejam monitorados, além de torná-la a mais didática possível de modo que qualquer utilizador consiga realizar este monitoramento. No esquema representado na Figura 3.5, o Arduino está representado pela caixa com um símbolo de energia. Já na Figura 3.18 é possível visualizar com maior detalhe o esquema de ligação dos sensores na placa.

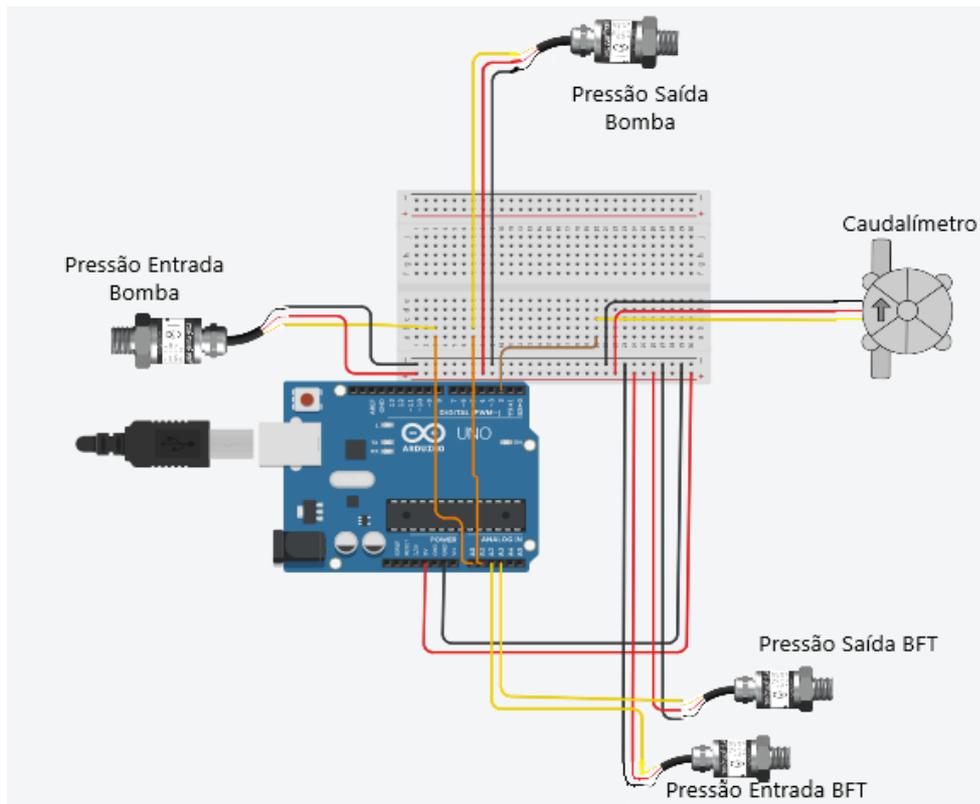


Figura 3.18 Esquema de ligação dos sensores no Arduino

Entretanto, ainda foi preciso utilizar um programa que seria responsável pela leitura, interpretação e exibição dos dados coletados para o utilizador. Para tal, foi utilizado o software Arduino IDE. Este software, além de permitir a inclusão e modificação do programa incluído no Arduino, permite também a exibição dos dados coletados através do Monitor Serial. Segue detalhamento do programa na Figura 3.19.

O programa que está carregado no Arduino que é responsável pela leitura dos sinais enviados pelos sensores está descrito no ANEXO III . O programa está com comentários sobre a finalidade de cada função e variável utilizada. Entretanto, conforme dito, para a leitura desses é preciso a utilização de um cabo com saída micro USB e um computador com o software Arduino IDE instalado.

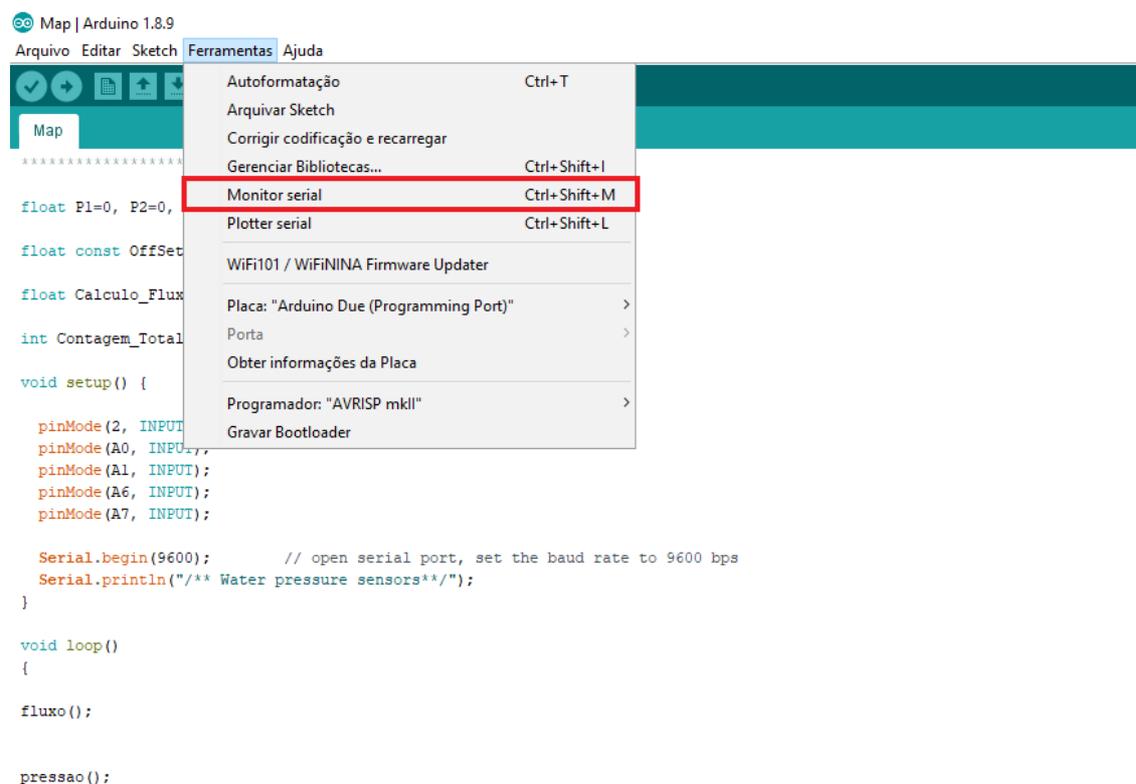


Figura 3.19 Indicação do Monitor Serial dentro do Arduino IDE

4

METODOLOGIA

Com o sistema instalado e os componentes em seus devidos lugares, foram realizados alguns testes somente ligando a bomba. Estes testes tiveram a finalidade de se observar o comportamento de todo o sistema com a nova atualização.

Comprovado que a instalação não apresenta erros mecânicos e estruturais, foi possível iniciar os ensaios. Para realização destes, foi preciso definir diferentes cenários de regulação elétrica e hidráulica do sistema, além monitorização constante dos dados gerados com o ensaio.

Sendo assim, foi necessário a utilização de alguns materiais para a realização dos ensaios. Alguns destes materiais são parte integrante da instalação e já foram apresentados no estudo. São eles: os sensores, responsáveis pela coleta dos dados, e o Arduino, responsável por receber estes dados, traduzi-los e apresenta-los de forma legível aos usuários do sistema.

A leitura feita por cada sensor presente na instalação será apresentada, a partir de agora, com as seguintes nomenclaturas: transdutor de pressão instalado na entrada da bomba (PeB), transdutor de pressão instalado na saída da bomba (PsB), transdutor de pressão instalado na entrada da BFT (PeBFT), transdutor de pressão instalado na saída da BFT (PsBFT) e caudalímetro (Q). Caso seja necessário, é possível recorrer a Figura 3.14, onde estão descritos a posição de cada sensor.

Também necessário a utilização de materiais externos a instalação. Foi utilizado um computador com o Arduino IDE instalado e, para a regulação elétrica, foi utilizado um autotransformador trifásico, Figura 4.1. O autotransformador foi ligado diretamente a bomba de tal forma que era possível regular a tensão fornecida a bomba. O objetivo de variar a tensão, foi em obter uma variação da potência de acionamento da bomba, obtendo assim uma variação na gama de caudais e pressões que a bomba forneceu. No entanto, a rotação da bomba em cada cenário não é conhecida, por falta de um taquímetro instalado nas pás da bomba.



Figura 4.1 Autotransformador 3 fases

Nota-se, que o autotransformador possui um botão de regulação de graduado em percentagem da tensão máxima. Portanto, Mediu-se a tensão composta máxima à saída do transformador, a qual era 440 V. Isto permite estimar a tensão de alimentação respeitante a qualquer posição do botão.

Foram analisados um total de 10 cenários diferentes com uma combinação de regulação elétrica e hidráulica. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos cenários possíveis.

Tabela 4.1 Resumo dos cenários para os testes

Regulação Elétrica \ Regulação Hidráulica	<i>By-pass</i> completamente fechado (BPF)	<i>By-pass</i> completamente aberto (BPA)
60% tensão (264v)	Cenário 1 (C1)	Cenário 2 (C2)
70% tensão (308v)	Cenário 3 (C3)	Cenário 4 (C4)
80% tensão (352v)	Cenário 5 (C5)	Cenário 6 (C6)
90% tensão (396v)	Cenário 7 (C7)	Cenário 8 (C8)
100% tensão (440v)	Cenário 9 (C9)	Cenário 10 (C10)

Na Figura 4.2 é possível observar os diferentes caminhos para o fluido. Nos cenários ímpares (C1, C3, C5, C7, C9), 100% do caudal passa pela BFT (indicado em azul). Já nos cenários pares (C2, C4, C6, C8, C10) as válvulas foram todas abertas deixando o caudal passar tanto pelo *by-pass* quanto pela BFT. Considerou-se o escoamento de todos os cenários em regime permanente.

Vale ressaltar que as válvulas utilizadas na instalação são válvulas do tipo esfera. Neste tipo de válvula é muito complicado de definir aberturas parciais pela impossibilidade de calcular

a abertura que a esfera faz no interior da válvula. Por este motivo definiu-se apenas os dois estados citados: totalmente fechada e totalmente aberta.

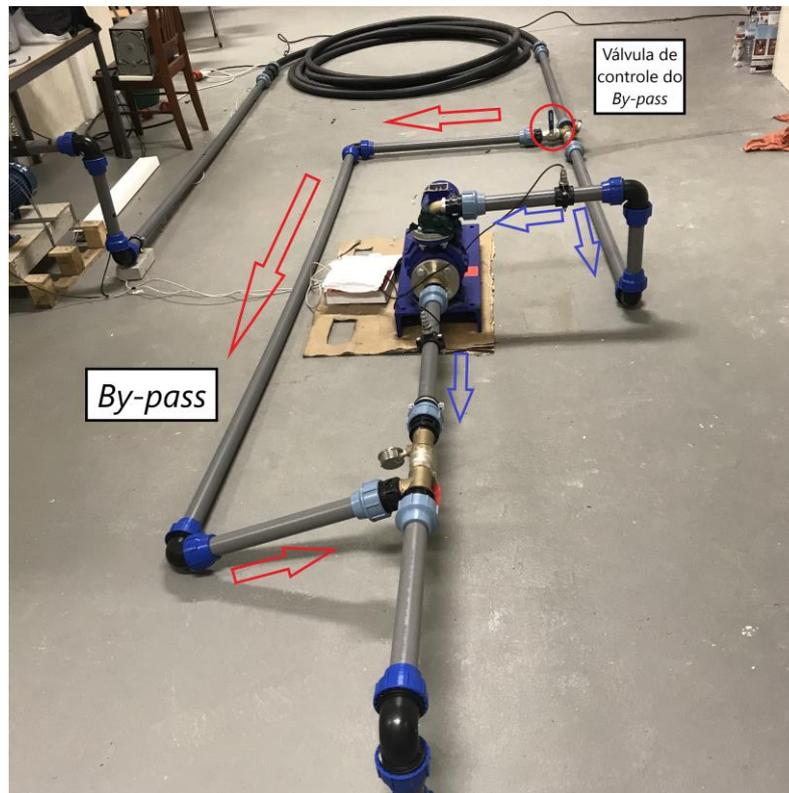


Figura 4.2 *By-pass* da instalação

O intuito foi observar o comportamento da BFT em ambos casos de regulação hidráulica, em relação a geração de energia elétrica.

Quanto a regulação elétrica, com o auxílio do autotransformador de 3 fases, fora definida 5 tensões de modo que gere na bomba uma velocidade de rotação variável.

Para este tipo de teste, seriam necessários 2 autotransformadores, um para a bomba e outro para a BFT. O autotransformador ligado na BFT serviria, ou para facilitar o arranque deste grupo (com a sua máquina elétrica funcionando de motor), ou para ajustar à rede a tensão produzida por esta, ao funcionar como gerador.

No entanto, não foi possível a utilização de 2 autotransformadores pela indisponibilidade do segundo item. Sendo assim, optou-se por ligar a bomba de forma a variar a velocidade de rotação para que fosse observado a gama de pressão e caudal que tornou a BFT operacional.

O autotransformador ligado à bomba, consegue variar a tensão entregue nos terminais de saída de 0 a 100% da tensão máxima de saída, a qual por medição se verificou ser 440 V (tensão composta). Sendo assim, os cenários adotados foram uma variação de 10% em 10% começando em 60% até os 100%. Não foram adotados valores menores que 60%, pois estes não apresentaram resultados significativos para o estudo.

Em cada um dos cenários apresentados, foram adotados a seguinte operação:

- 1- Ligou-se a bomba, regulando a tensão elétrica de acordo com o cenário em questão;
- 2- Aguardou-se 1 min com a bomba funcionando para que o fluxo se estabilizasse;
- 3- Iniciou-se a leitura dos dados. Foram retirados leitura de pressão e caudal de todos os sensores.
- 4- Aguardou-se um tempo de execução de 2 min, além do 1 min inicial para estabilização;
- 5- Salvou-se as leituras recolhidas.
- 6- Alterou-se as regulações para o próximo cenário e repetiu-se o ciclo a partir do passo 2.

Por fim, foram reproduzidas as mesmas condições apresentadas no cenário C9 no simulador computacional EPANET. O intuito de elaborar esta simulação, foi obter um modelo computacional que opere de forma semelhante a instalação. Este modelo pode ajudar na elaboração de trabalhos futuros. Não foi necessário a simulação dos demais cenários, pois os principais resultados buscados são baseados em um sistema onde é aproveitado ao máximo a energia do fluido.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na presente secção serão apresentados os resultados, e as devidas discussões, obtidos após a aplicação da metodologia apresentada.

5.1 RESULTADO DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Os dados retirados do monitor serial do Arduino IDE dos testes realizados foram exportados em texto e a seguir implementados em gráficos de modo que facilite a leitura e interpretação dos mesmos.

Antes de apresentar os gráficos, é importante lembrar que os cenários foram avaliados em regime permanente. Por este motivo, as leituras obtidas não dependem do tempo de duração do teste. Sendo assim, os gráficos a seguir apresentam os dados coletados. Cada gráfico apresenta as leituras realizadas para um dos sensores nos 10 cenários propostos.

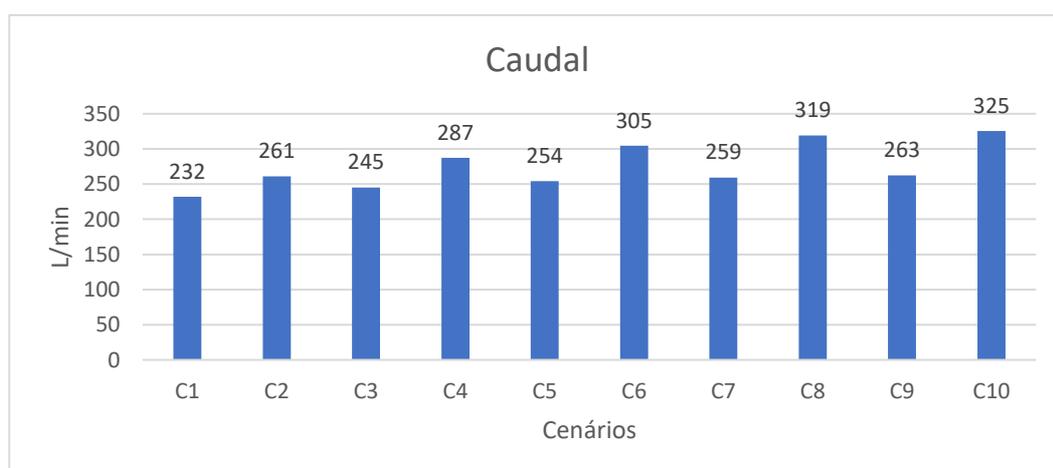


Figura 5.1 Leituras feitas pelo caudalímetro

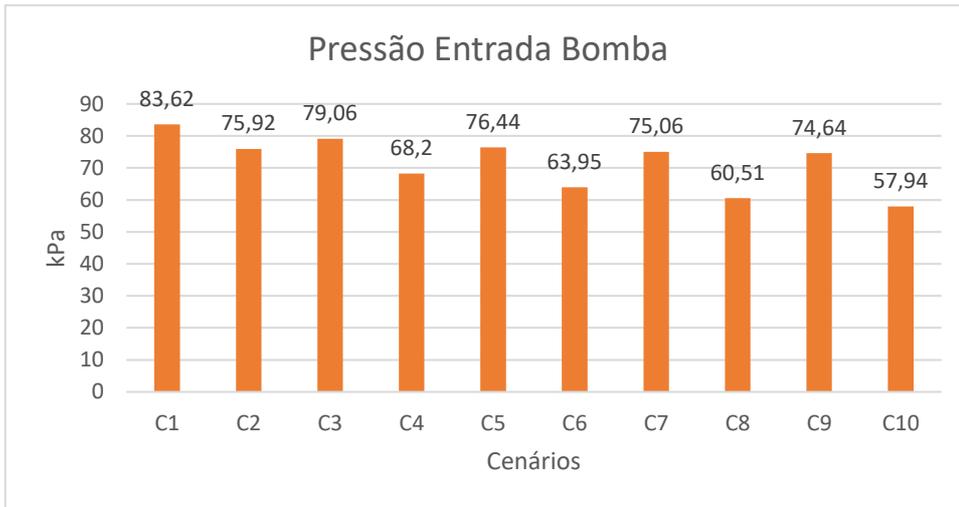


Figura 5.2 Leituras obtidas através transdutor de pressão PeB

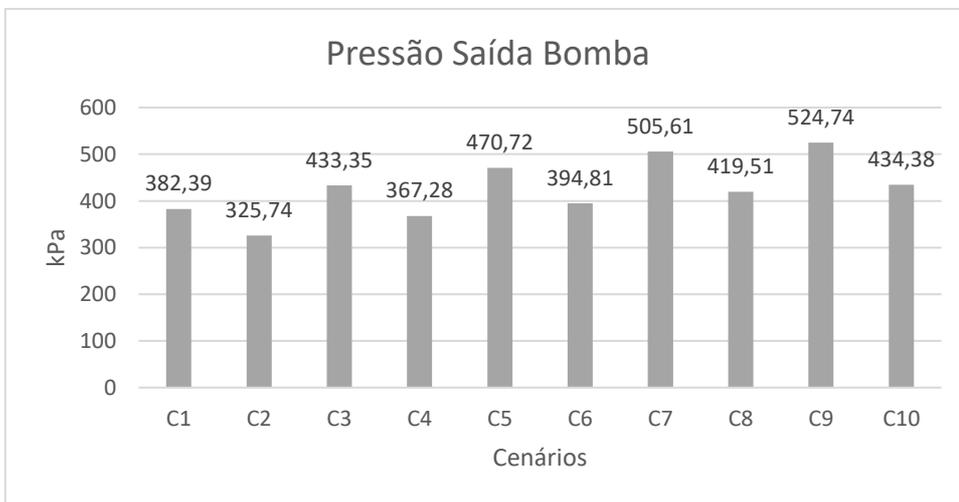


Figura 5.3 Leituras obtidas através transdutor de pressão PsB

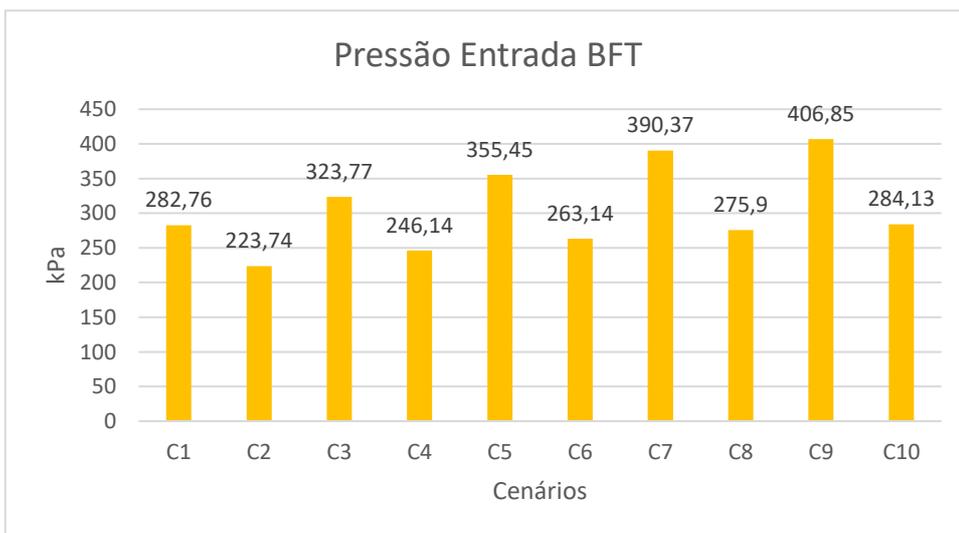


Figura 5.4 Leituras obtidas através transdutor de pressão PeBFT

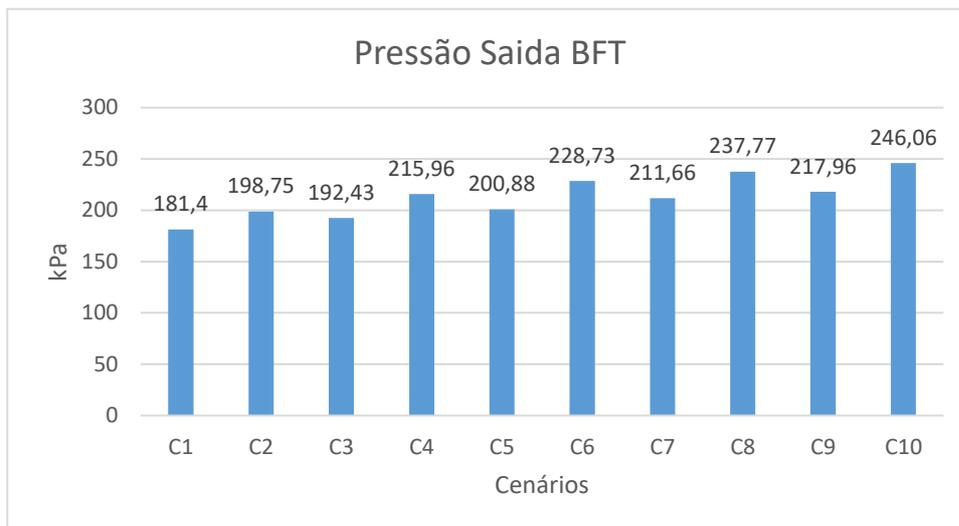


Figura 5.5 Leituras obtidas através transdutor de pressão PsBFT

É possível observar diferenças entre os cenários ímpares (com todo o caudal passando pela BFT) e os cenários pares (com todos os caminhos livres). O caudal aumenta consideravelmente nos cenários pares, uma vez que o fluido pode percorrer um caminho com menor perda de carga. Como consequência, a pressão do fluido na saída da bomba, e em todo o sistema, diminui. Esta é uma constatação importante em casos que seja preciso um maior caudal.

Após a coleta das leituras dos testes, foi possível observar que nos cenários pares não pode haver geração de energia, porque a BFT permaneceu imóvel durante os testes. Este fato é consequência de o circuito hidráulico da BFT estar hidráulicamente curto-circuitado pelo “*bypass*”, sendo o escoamento de água feito por este e assim não havendo acionamento da turbina. Nestas condições, não poderia haver produção de energia elétrica.

Dito isso, como o foco deste estudo é o aproveitamento da energia hidráulica do fluido para a geração de energia elétrica, foram considerados apenas os resultados obtidos nos ensaios com os cenários ímpares (C1, C3, C5, C7 e C9).

De modo a facilitar o entendimento, segue gráficos apenas com os cenários que serviram de base para os próximos passos.

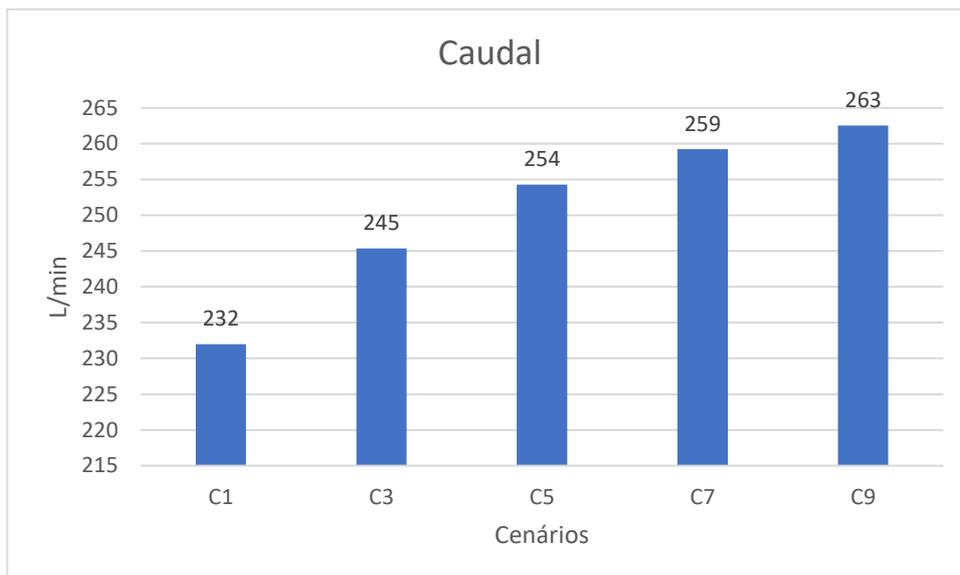


Figura 5.6 Leituras feitas pelo caudalímetro nos cenários ímpares

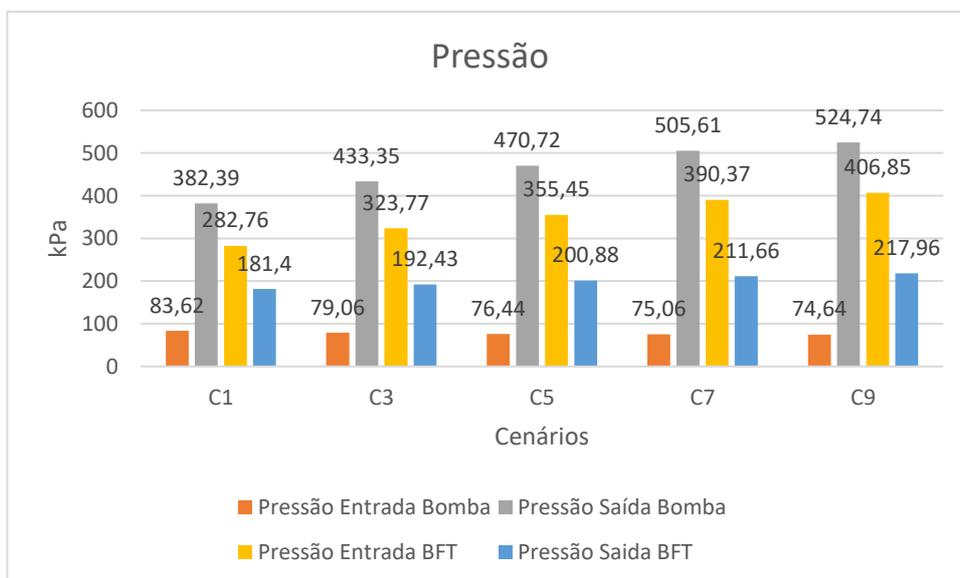


Figura 5.7 Leituras obtidas através dos transdutores de pressão nos cenários ímpares

5.1.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um dos pontos mais importantes para a geração de energia elétrica, é conhecer qual é a potência disponível no gerador. Este dado permite fazer uma previsão de quanta energia elétrica será gerada, além de auxiliar na determinação do rendimento da máquina utilizada pra geração de energia, caso seja desconhecido.

De posse dos dados fornecidos pela Figura 5.6 e pela Figura 5.7, é possível uma análise dos resultados a fim de descobrir qual a gama de caudal e pressão que estão disponível e possibilitam a geração de energia.

Sendo assim, o primeiro passo foi calcular a altura manométrica da BFT em cada cenário apresentado. Para isso, recorreu-se a Equação de Bernoulli (Equação (2.2)), e isolou-se o H_T .

$$H_T = \frac{(p_3 - p_4)}{\rho g} + \frac{(v_3^2 - v_4^2)}{2g} + (z_3 - z_4) - \Delta H_{34}$$

Algumas considerações foram feitas. São elas: o ponto 3 representa os dados na entrada da BFT; o ponto 4 representa o ponto na saída da BFT; a perda de carga entre estes pontos foi considerada nula, uma vez que existe apenas a BFT entre eles; o termo que representa a energia cinética é nulo, já que as velocidades são iguais, uma vez que o caudal e a área da secção do tubo em ambos pontos analisados são os mesmos; as medidas de z_3 e z_4 foram medidas no local da instalação e são, respectivamente, 0,48m e 0,28m.

$$H_T = \frac{(p_3 - p_4)}{\rho g} + (z_3 - z_4)$$

O próximo passo foi o cálculo da potência da BFT. Para isso, foi necessário recorrer a Equação (2.3).

$$Pot_T = \rho g H_T Q$$

A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos após aplicação das equações apresentadas anteriormente em cada cenário.

Tabela 5.1 Resultados da análise das leituras

	Q [$\times 10^{-3}$] (m^3/s)	H_T (m)	Pot_T (W)
C1	3,867	10,53	39,95
C3	4,09	13,59	54,51
C5	4,24	15,96	66,34
C7	4,32	18,42	78,06
C9	4,37	19,45	83,51

Conforme visto na Tabela 5.1, o fluido entrega a BFT uma gama de potência que varia de 39,95 W até 83,51 W, sendo o primeiro proveniente do cenário C1 e o último do cenário C9.

Portanto, pode-se concluir que a BFT gera energia, dada as devidas proporções, em uma gama de pressão que varia de 282,76 kPa até 406,85 kPa e uma gama de caudal que varia de 232 L/min a 263 L/min.

Com isso, é possível concluir que, mesmo com todas as atualizações, a BFT ainda possui potência suficiente para a geração de energia elétrica dentro dos parâmetros e gamas testadas.

Quanto a gama de valores encontrados, é importante pontuar a falta do autotransformador ligado a BFT e as consequências por não o ter. Conforme dito, o autotransformador ligado a BFT, seria o responsável por fornecer energia a BFT acionando o motor. Com energia elétrica no motor, quando a velocidade de sincronismo fosse ultrapassada, o motor passaria a se comportar como gerador, ou seja, passa a receber energia do sistema. Sendo assim, visto que gerador elétrico do grupo não está ligado, não há produção elétrica e esta energia absorvida corresponde apenas a perdas no grupo. Mas verifica-se que dentro dos parâmetros e gamas testadas, o grupo retira energia ao circuito hidráulico, e seria possível retirar ainda mais para conversão elétrica.

Outro ponto a ser pensado, é em relação a válvula de abertura do *by-pass*. Essa necessitaria de ser uma válvula com controle de abertura. Assim, pode-se definir uma porcentagem do caudal que é direcionado ao *by-pass* tendo um controle maior tanto do caudal, quanto da geração de energia elétrica pela BFT. Com isso, seria possível analisar de forma mais clara se haveria produção de energia mesmo com o *by-pass* aberto.

5.1.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações computacionais servem de suporte para previsões de comportamento do fluido com diferentes atualizações do sistema e diferentes cenários de atuação. Sendo assim, o objetivo foi de obter um modelo computacional que reproduzisse os resultados obtidos nos ensaios experimentais e que poderia servir de suporte para futuros estudos no sistema.

Conforme dito, o software utilizado foi o EPANET. Neste software é possível elaborar um modelo de uma rede de distribuição de água completo. Ou seja, é possível adicionar todos os equipamentos, como bombas, válvulas, conexões além da tubulação, reservatório. Além disso, o EPANET permite que todas as variáveis dos equipamentos sejam alteradas para que seja o mais parecido com a realidade. Com isso, o EPANET permite, de modo automatizado, simular o comportamento hidráulico e de qualidade da água de um sistema de distribuição que pode estar sujeito a diversas condições operacionais, durante um determinado período de funcionamento.

Antes da elaboração do modelo, vale apontar outra dificuldade encontrada durante os testes: a velocidade de rotação da bomba e da BFT. Ambas velocidades de rotação não são conhecidas. Seria necessário um tacômetro para medir a velocidade de rotação da bomba e outro pra a BFT. O desconhecimento destas variáveis teve consequências importantes na elaboração do modelo computacional.

Quando a bomba, ou a BFT, trabalham em uma velocidade de rotação diferente da que está presente no catálogo do equipamento, esta apresenta um comportamento diferente, nomeadamente, sua curva de operação muda. Para estimar esta mudança é conhecer a velocidade de rotação do catálogo e a nova velocidade de rotação. Como neste caso, as velocidades de rotação não são conhecidas, é não foi possível elaborar as novas curvas de operação e assim prever o comportamento da bomba e da BFT.

Tendo em vista estes pontos, a elaboração do modelo computacional precisou ser adaptada apenas para um ensaio escolhido para que os resultados apresentados por este sejam os mais fiéis possível com os encontrados nos ensaios. É impossível calibrar um modelo apenas para todos os ensaios sem conhecimento das velocidades de rotação da bomba e da BFT. O

cenário escolhido foi o cenário C9 por este estar regulado para a bomba receber 100% da tensão proveniente da rede.

Para elaboração da simulação, foi descrito todo o sistema no software seguindo as seguintes etapas. O primeiro equipamento selecionado foi o reservatório e descrito sua capacidade (Figura 5.8(a)). Por se tratar de um reservatório de pequena capacidade, foi escolhido o ícone de reservatório de nível variável. Após a escolha do reservatório, foram postos os nós. Cada nó representa uma conexão do sistema e, a exemplo do reservatório, estas conexões também foram associadas as perdas de carga de acordo com o tipo de cada uma (Figura 5.8(b)). As válvulas selecionas são válvulas de bloqueio que podem ser configuradas como normalmente abertas ou normalmente fechadas (Figura 5.8(c)). A seguir foi selecionada a bomba e a BFT. Para representar a BFT foi utilizada uma válvula GPV. Esta válvula tem um comportamento genérico, portanto, é possível associar a ela a curva característica da BFT. Por fim foram adicionadas as tubulações especificando o diâmetro, comprimento e rugosidade das mesmas (Figura 5.8(d)).

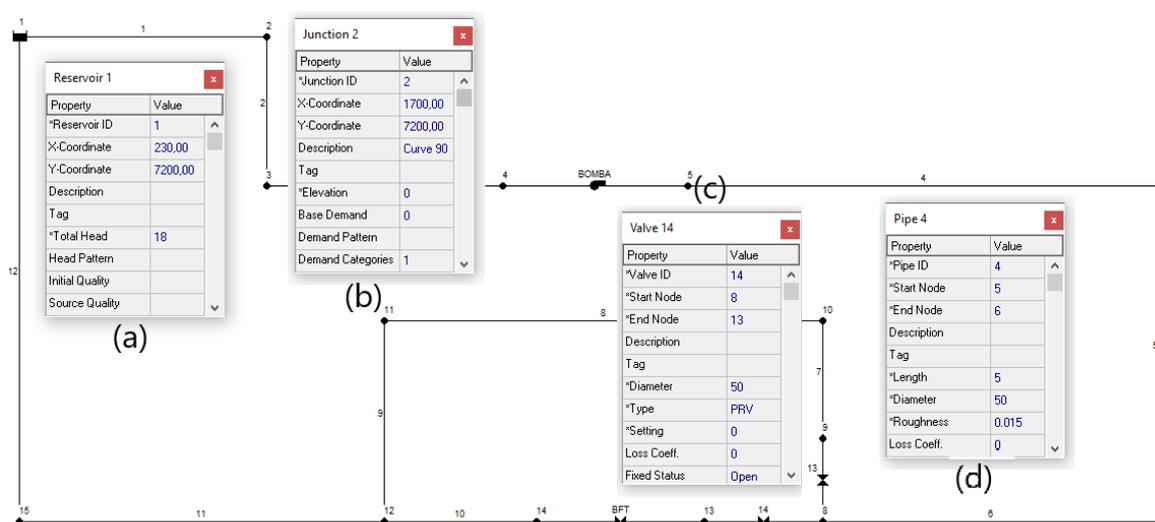


Figura 5.8 (a) Configuração do reservatório, (b) Configuração da conexão 2, (c) configuração da válvula 14, (d) configuração da tubulação 4

Depois do sistema implementado, foi necessário configurar as curvas da bomba e da BFT.

Conforme explicado anteriormente, pelo desconhecimento da velocidade de rotação da bomba e da BFT nos cenários, foi necessário fazer uma adaptação das curvas. Para a curva da BFT foram retirados 6 pontos da curva original da BFT apresentada na Figura 3.1 e foram implementadas no EPANET forçando o mesmo a gerar uma curva para os demais pontos. Sendo assim, assumiu-se que a BFT opera com uma velocidade de rotação igual a de catálogo. Esta foi uma consideração necessária pois era a única curva que foi fornecida. A curva gerada no EPANET pode ser vista na Figura 5.9.

Em contrapartida, para a bomba, foi estimado uma curva de outra forma. O EPANET é capaz de gerar uma curva genérica de bomba apenas com 1 ponto de operação fornecido. Portanto, foi implementado no programa os valores de pressão e caudal encontrados em ensaio na saída da bomba, 524,74 kPa e 263 L/min, respeitando as unidades que o EPANET trabalha. Estes valores geraram uma curva genérica para os demais pontos. Tal curva foi implementada na bomba. A Figura 5.10 mostra como essa curva se comporta.

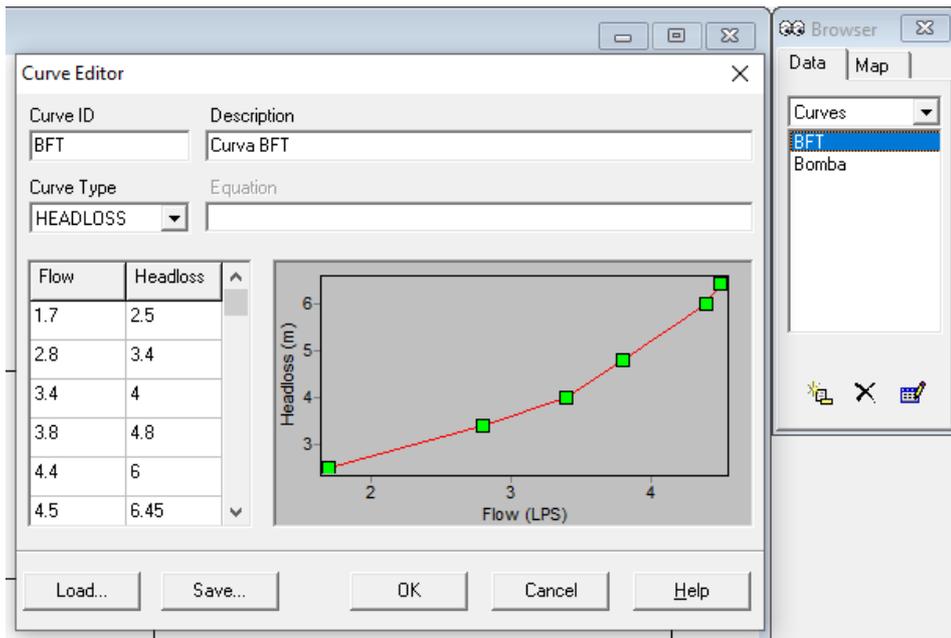


Figura 5.9 Curva da BFT implementada

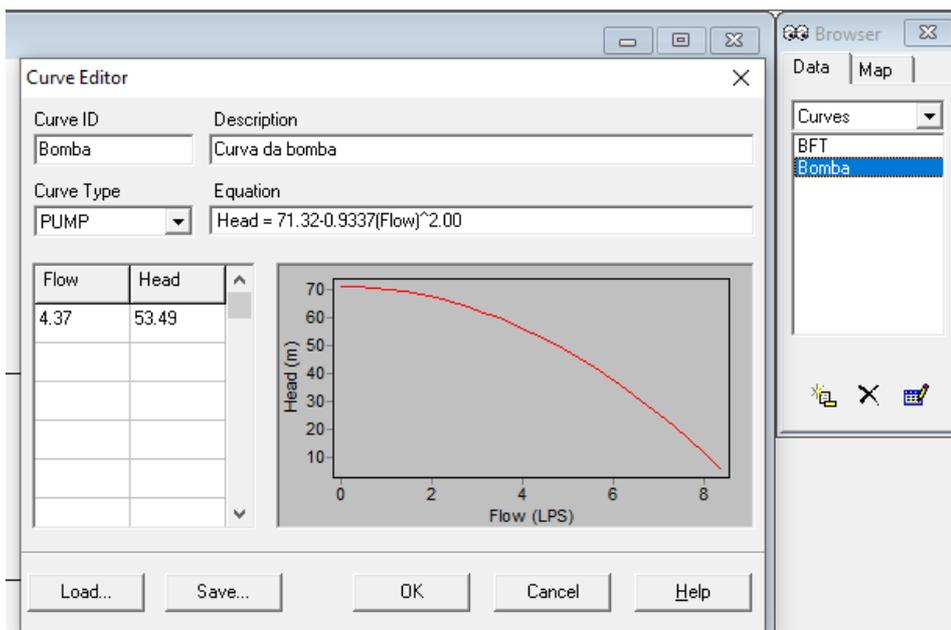


Figura 5.10 Curva genérica da bomba

Após todas as aproximações feitas, e o modelo implementado, foi efetuado um teste no programa para observar os resultados obtidos. Segue na Figura 5.11 uma visão geral do sistema simulado para o cenário C9.

Para uma melhor interpretação dos dados, vale informar que o caudal (Flow) está descrito ao longo das linhas, que representam as tubulações, e as pressões (Pressure) são lidas em cada nó apresentado no sistema. A paleta de cores e as legendas ajudam nesta leitura dos dados.

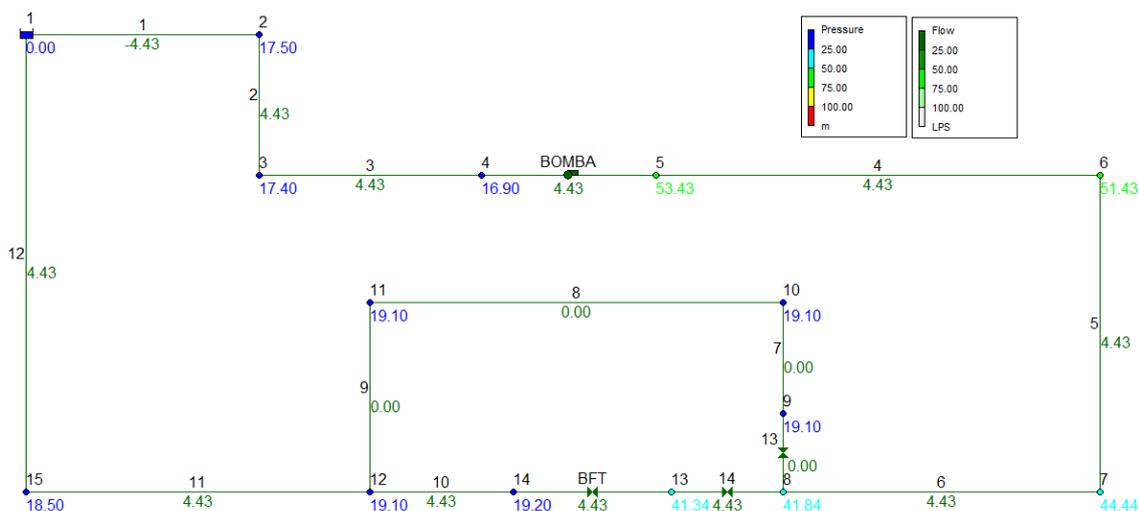


Figura 5.11 Simulação Cenário C9

Pode-se observar que os valores que eram conhecidos pelos ensaios experimentais, se mantiveram bastante semelhantes no modelo computacional. É preciso considerar algumas aproximações em relação aos valores encontrados na simulação e nos ensaios, além de ser preciso adequar as unidades (se necessário, recorrer ao ANEXO IV).

A simulação se torna interessante para o estudo pela possibilidade de observar como a perda de carga se comporta ao longo do trajeto e ao passar por cada conexão. Com isso pode-se substituir trechos do sistema por outros itens desde que se mantenham a mesma perda de carga, sem alteração do comportamento da BFT. Um exemplo seria a substituição do tubo flexível enrolado (representado pela tubulação 5) por uma válvula que gerasse a mesma perda de carga do trecho.

Vale, mais uma vez, ressaltar que o modelo foi forçado a representar os dados obtidos e este não serve para os demais cenários. Para tal, era necessário conhecer as velocidades de rotação reais e gerar as curvas corretas, tanto para a bomba quanto para a BFT. Além disso, a aproximação da BFT com uma válvula genérica GPV também fornecer valores que podem desviar da realidade.

6

CONCLUSÃO

Com o presente estudo foi possível concluir que a instalação tem capacidade de medir a perda de energia hídrica na turbina, que caso o grupo tivesse ligação elétrica, poderia produzir energia elétrica. Essa produção poderia ser medida, graças as modificações realizadas no sistema.

A implementação de novas tubulações e conexões garantiu que o sistema ficasse, visivelmente, mais agradável e didático, além de aproximar a instalação aos casos reais. A sensorização do sistema com a utilização de sensores que fornecem sinais digitais e em tempo real sem a interferência humana na leitura dos dados, permite uma maior confiabilidade nos dados obtidos, uma maior a possibilidade de automatização do sistema com dados fornecidos automaticamente de forma digital, além de ser possível ampliar o sistema de monitoramento adaptando novos sensores no Arduino instalado. A sensorização do sistema ainda foi de fundamental importância na realização dos ensaios que comprovaram a possibilidade de geração de energia elétrica.

A coleta de dados nos ensaios após a implementação de todos os sensores de pressão e do sensor de caudal geraram resultados interessantes para o estudo. Foi constatado que a BFT retirou energia hídrica ao circuito hidráulico somente quando o *By-pass* esteve fechado. Isso deu-se numa gama de caudal que variou de 232 L/min a 263 L/min e uma gama de pressão de entrada na BFT que variou de 282,76 kPa a 406,85 kPa. Esta gama de resultado gerou uma potência hidráulica disponível para a BFT de 39,95 W a 83,51 W.

Outra conclusão importante foi a influência negativa que tiveram nos resultados a falta de ligação do gerador do grupo à rede ou a uma carga, e a inexistência de uma válvula com controle de abertura para o *by-pass*. Com a presença de uma ligação elétrica ao gerador existiria a possibilidade de gerar energia elétrica. Já a válvula influenciaria no controle maior do caudal que seria direcionado para o *by-pass*.

Por fim, foi elaborado uma simulação do cenário C9 para que fosse observado as dificuldades e vantagens de obter um modelo computacional do sistema. A primeira constatação foi que o desconhecimento da velocidade de rotação da bomba e da BFT, obrigou com que as curvas aplicadas a bomba e a BFT fossem adaptadas e com algumas considerações que podem divergir da realidade, como considerar a velocidade de rotação da BFT a mesma do catálogo. Estas aproximações interferem nos resultados obtidos pelo simulador e podem levar o utilizador a erros, além de impossibilitar a criação de um modelo que sirva para todos os cenários ensaiados. Entretanto, após as devidas adaptações, foi possível representar o cenário em questão e obter resultados parecidos com o que foram obtidos nos ensaios. Este modelo pode servir de ferramenta para os próximos estudos, como na substituição de trechos da instalação mantendo a mesma perda de carga.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, recomenda-se o dimensionamento e instalação de um circuito eléctrico de adaptação do gerador acoplado à BFT à rede eléctrica, de forma a poder-se produzir energia eléctrica e injetá-la na rede.

Recomenda-se ainda a instalação de um sensor de caudal no *by-pass*, pois seria uma mais valia ao sistema. Dessa forma, é possível a identificação da percentagem do caudal que segue em cada caminho. Além da válvula de abertura controlada na entrada do *by-pass*.

Recomenda-se também medir a velocidade de rotação da bomba e da BFT e adaptar a coleta destes dados no Arduino implementado no sistema. Estes dados, como visto, são fundamentais na previsão de geração de energia e no controle do sistema. Sem a velocidade de rotação da bomba e da BFT não é possível gerar as curvas de operação necessárias para implementar no modelo computacional em EPANET.

É necessário ainda realizar um estudo de viabilidade energética e econômica da implementação da BFT. Ou seja, uma análise de rendimento e de energia gerada pela BFT e uma análise financeira desta energia.

O próximo passo na instalação é a automatização do mesmo. A implementação de um sistema de controle automático, permitiria a geração de energia de forma mais eficiente e controlada. Dessa forma, todo o sistema estaria monitorado e o caudal poderia ser direcionado ao caminho que melhor atenderia as necessidades da instalação em cada instante de tempo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Binama, M., Su, W., Li, X., Li, F., Wei, X., & An, S. (2017). Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes : A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(April), 148–179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.071>
- Bogdanovic-Jovanovic, J. B., Milenkovic, D. R., Svrkota, D. M., Bogdanovic, B., & Spasic, Z. T. (2014). Pumps used as turbines: Power recovery, energy efficiency, CFD analysis. *Thermal Science*, 18(3), 1029–1040. <https://doi.org/10.2298/TSCI1403029B>
- Brunetti, F. (2008). *Mecânica dos Fluidos I*. (E. Pessotti, Ed.) (2ª). São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Carravetta, A., Fecarotta, O., & Ramos, H. M. (2018). A new low-cost installation scheme of PATs for pico-hydropower to recover energy in residential areas. *Renewable Energy*, 125, 1003–1014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.132>
- Carravetta, Armando, del Giudice, G., Fecarotta, O., & Ramos, H. M. (2013). PAT design strategy for energy recovery in water distribution networks by electrical regulation. *Energies*, 6(1), 411–424. <https://doi.org/10.3390/en6010411>
- Chapallaz, J., Eichenberg, P., & Fisher, G. (1992). Manual on pumps used as turbines. *MHPG. Gate*. Eschborn: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE.
- Derick, D., & Alves, S. (2010). *Contribuições Para o Estudo e a Aplicação de Bombas Funcionando Como Turbinas na Geração Descentralizada*. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.
- Fecarotta, O., Aric, C., Riccardo, C., & Helena, M. (2014). Hydropower Potential in Water Distribution Networks : Pressure Control by PATs. <https://doi.org/10.1007/s11269-014->

- Garay, P. N. (1990). Using Pumps as Hydroturbines. *Hydro Review*, 52–61. Retrieved from <https://www.hydroreview.com/wp-content/uploads/content/dam/hydroworld/downloads/Q&Aturbine6.pdf>
- Junior, E. A. (2014). *Estratégia de Conversor para Interligação de Sistemas de Geração Eólica à Rede Elétrica*. UFRN.
- Lima, G. M., Brentan, B. M., & Jr, E. L. (2018). Optimal design of water supply networks using an energy recovery approach. *Renewable Energy*, 117, 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.080>
- Medeiros, D. D. M. (2004). *A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica*. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA.
- Nakayama, Y., & Boucher, R. (1999). *Introduction to Fluid Mechanics*. (L. Gooster, Ed.) (1st ed.). Woburn, MA, USA.
- Ramos, H., Covas, D., & Araújo, L. (2004). Válvulas redutoras de pressão e produção de energia. *7º Congresso Da Água*, 1–14.
- Ricardo, M. (2007). *ESTUDO DE GRUPOS MOTO-BOMBA OPERANDO COMO GRUPOS GERADORES EM MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS*. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ.
- Sebastião, A. F. F. (2017). *A platform for assessment of energy recovery technologies by pressure reduction in water distribution networks*. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Telci, I., & Aral, M. (2018). Optimal Energy Recovery from Water Distribution Systems Using Smart Operation Scheduling. *Water*, 10(10), 1464. <https://doi.org/10.3390/w10101464>
- Viana, A. N. C., & Nogueira, F. J. H. (2002). BOMBAS DE FLUXO OPERANDO COMO TURBINAS - PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO. Retrieved from http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100033&lng=en&nrm=iso



DATA SHEET DA BFT

Curva de funcionamento

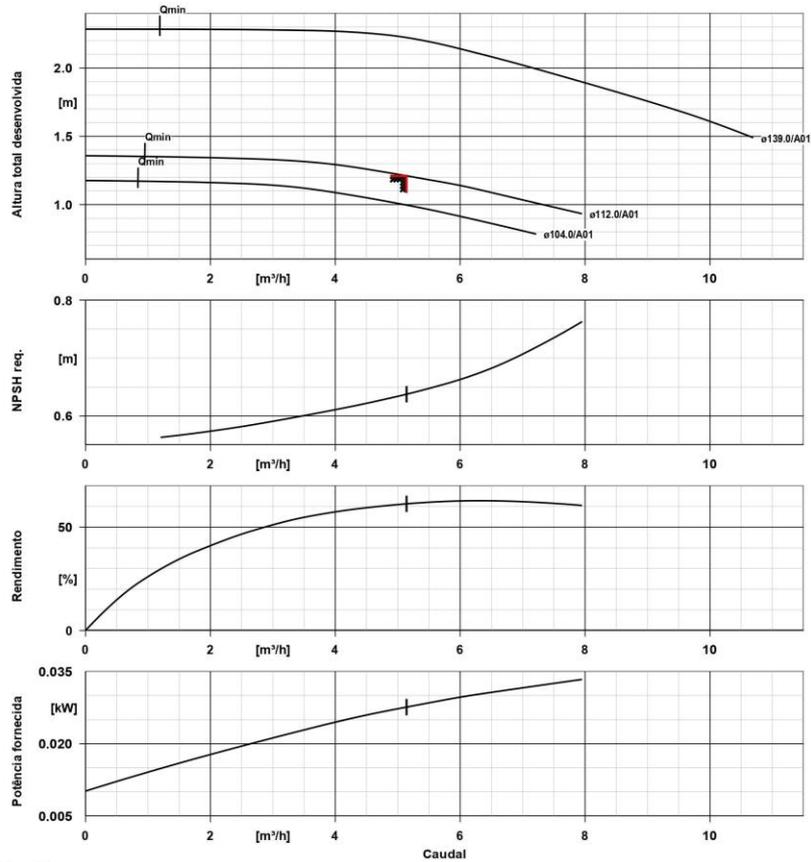


Nº da posição do cliente:
 Encomenda datada:
 Doc no.: Proposta rápida
 Quantidade: 1

Numero: ES 5736981
 Nº da pos.:100
 Data:
 Página: 3 / 6

ETN 050-032-125 GGSAA11GD200056B
 Bomba centrífuga de baixa pressão Etanorm

Versão nº:



Dados da curva

Velocidade de rotação	842 rpm	Rendimento	61,3 %
Densidade do fluido	998 kg/m^3	MEI (Coeficiente de eficiência mínima)	= 0,70
Viscosidade	1,00 mm^2/s	Potência absorvida	0,03 kW
Gama de Caudal	5,14 m^3/h	NPSH requerido	0,64 m
Caudal pretendido	5,14 m^3/h	Número da curva	K1311.456/21
Altura total desenvolvida	1,21 m	Diâmetro efectivo do impulsor	112,0 mm
Altura manométrica pretendida	1,21 m		

Curva de velocidade



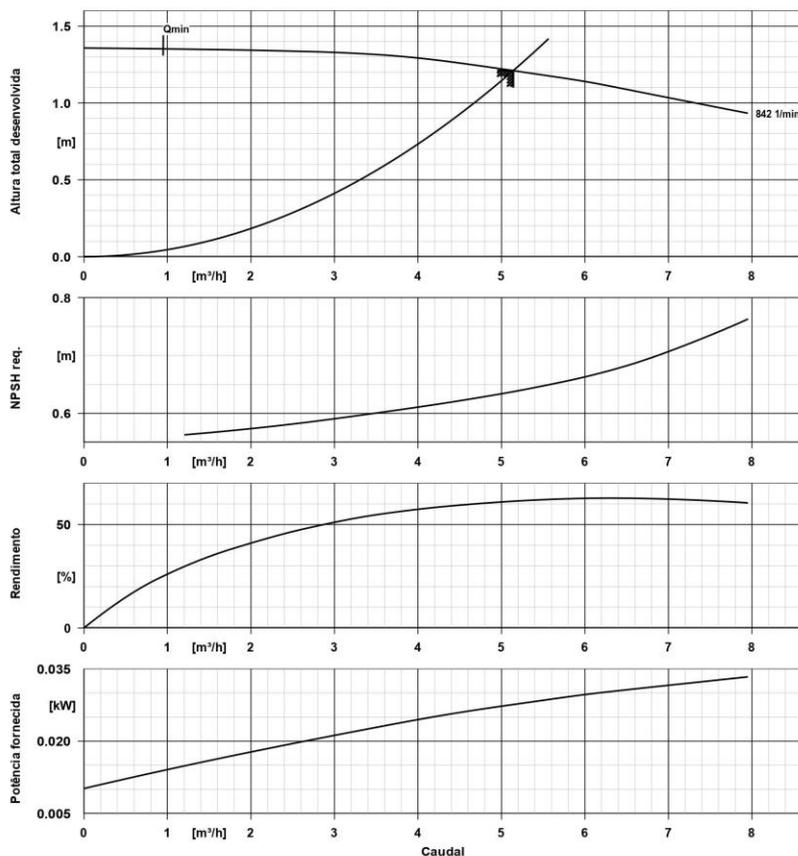
N° da posição do cliente:
 Encomenda datada:
 Doc no.: Proposta rápida
 Quantidade: 1

Numero: ES 5736981
 N° da pos.:100
 Data:
 Página: 4 / 6

ETN 050-032-125 GGSAA11GD200056B

Versão n°:

Bomba centrífuga de baixa pressão Etanorm



Dados da curva

Densidade do fluido	998 kg/m^3	Altura total desenvolvida	1,21 m
Viscosidade	1,00 mm^2/s	Altura manométrica pretendida	1,21 m
Gama de Caudal	5,14 m^3/h	MEI (Coeficiente de eficiência mínima)	= 0,70
Caudal pretendido	5,14 m^3/h	Diâmetro efectivo do impulsor	112,0 mm

Atravancamentos

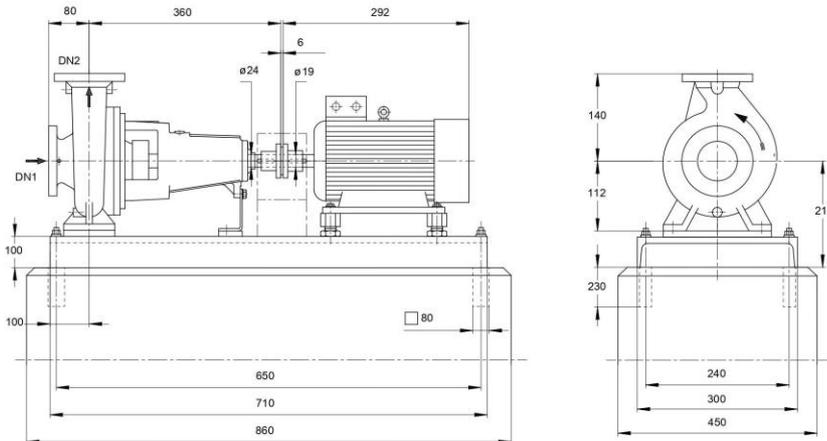


N° da posição do cliente:
 Encomenda datada:
 Doc no.: Proposta rápida
 Quantidade: 1

Numero: ES 5736981
 N° da pos.:100
 Data:
 Página: 5 / 6

ETN 050-032-125 GGSAA11GD200056B
 Bomba centrífuga de baixa pressão Etanorm

Versão n°:



Desenho não está à escala

Dimensões em mm

Motor

Fabricante do motor Siemens
 Tamanho do motor 080M
 Potência do motor 0,55 kW
 Número de pólos 6
 Velocidade de rotação 995 rpm
 Posição da caixa de terminais 0° (topo)

Visto de frente para o bocal de aspiração

Base

Design viga-U/ placa dobrada
 Tamanho 13A
 Material Aço ST
 Chassi com drenagem de fugas (8B) Rp1, Sem
 Chumadouras M16x250 (necessário, não incluído no material fornecido)

Ligações

Tamanho nominal da aspiração DN1 DN 50 / EN1092-2
 Dimensão nominal da descarga DN2 DN 32 / EN1092-2
 Pressão nominal na aspiração PN 16
 Pressão de descarga PN 16

Acoplamento

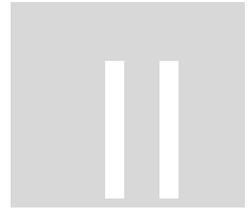
Fabricante do acoplamento Flender
 Tipo de acoplamento Eupex N
 Tamanho do acoplamento 68
 Espaçador 0,0 mm

Peso Líquido

Bomba 30 kg
 Base 33 kg
 Acoplamento 1 kg
 Protecção do acoplamento 2 kg
 Motor 12 kg
 Total 78 kg

Ligue as tubagens sem tensões ou esforços!

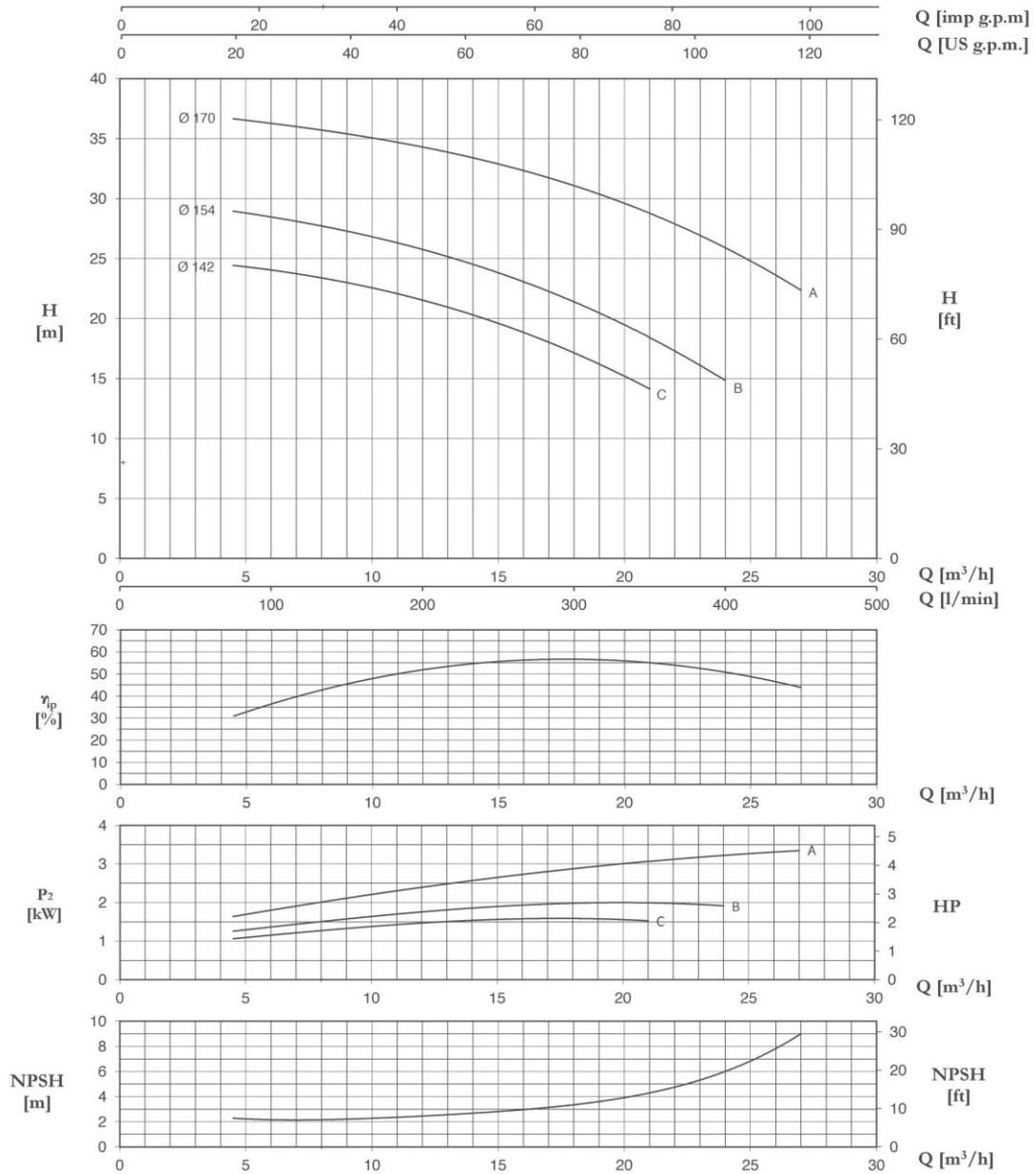
Para ligações auxiliares ver desenho anexo



DATA SHEET DA BOMBA

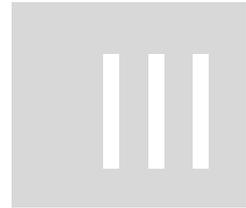
CM EN 733 ~ 2900 r.p.m.

32-160



TYPE	P2		P1 (kW)	Q (m³/h - l/min)												
				A	3~											
					0	4,5	6	7,5	9	12	15	18	21	24	27	
3~			3~	0	75	100	125	150	200	250	300	350	400	450		
			3x400 V 50 Hz	H (m)												
32-160 C (*)	2	1,5	2,3	4	24,7	24,4	24,1	23,6	23,0	21,5	19,6	17,2	14,1	-	-	
32-160 B (*)	3	2,2	2,9	5,2	29,0	-	28,5	28,0	27,3	25,7	23,8	21,4	18,5	14,8	-	
32-160 A	4	3	4,1	7,1	36,8	-	36,4	36,0	35,4	34,2	32,8	31,1	28,8	26,0	22,3	

(*) Disponibile nella versione monofase / Single phase available / Bajo pedido tambien en monofase / Disponible en monofasé



CÓDIGO ARDUINO

```
float P1=0, P2=0, P3=0, P4=0, V3=0;
float Calculo_Fluxo; //Variável para o cálculo do valor de caudal
int Contagem_Total = 0; //Variável para a contagem de pulsos;
void setup() {
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(A6, INPUT);
  pinMode(A7, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  fluxo();
  pressao();
  delay(1000);
}
void pressao(){
  P1 = map(analogRead(A0),0,1023,-200,1800); //Calcula a pressão em kPa
```

```

P2 = map(analogRead(A1),0,1023,-200,1800); //Calcula a pressão em kPa
P3 = map(analogRead(A6),0,1023,-200,1800); //Calcula a pressão em kPa
P4 = map(analogRead(A7),0,1023,-200,1800); //Calcula a pressão em kPa
Serial.print(" Pressao Entrada Bomba: ");
Serial.print(P1, 1);    Serial.println(" KPa");    //Imprime os valores no monitor
Serial.print(" Pressao Saida Bomba: ");
Serial.print(P2, 1);    Serial.println(" KPa");    //Imprime os valores no monitor
Serial.print(" Pressao Entrada BFT: ");
Serial.print(P3, 1);    Serial.println(" KPa");    //Imprime os valores no monitor
Serial.print(" Pressao Saida BFT: ");
Serial.print(P4, 1);    Serial.println(" KPa");    //Imprime os valores no monitor
Serial.println( );
}
void fluxo(){
    Contagem_Total = (pulseIn(2, HIGH) + pulseIn(2, LOW)); //Contagem do tempo de
    duração de cada pulso em nível Alto e nível baixo.
    Calculo_Fluxo = 1000000/Contagem_Total;                //Contagem de número de
    pulsos por segundo (1Seg = 1000000µSeg).
    Calculo_Fluxo = (Calculo_Fluxo * 5);                    //Multiplicação de (Num. Total
    de pulsos/Seg)x(Pulse Characteristics),
    if (Calculo_Fluxo < 0){
        Calculo_Fluxo = 0;
    }
    else{
        Calculo_Fluxo = Calculo_Fluxo;
    }
    Serial.print(" Caudal: ");
    Serial.print(Calculo_Fluxo);                          //Imprime os valores no monitor
    Serial.println(" L/min");
}

```



TABELAS DE CONVERSÃO

- PRESSÃO

Tabela de conversão para unidades de pressão						
	Pa	bar	atm*	at**	mH ₂ O	mmHg
1 Pa = 1 N/m ²	1	10 ⁻⁵	9.87 · 10 ⁻⁴	1.02 · 10 ⁻⁵	1.02 · 10 ⁻⁴	750 · 10 ⁻⁵
1 bar	10 ⁵	1	0.987	1.02	10.2	750
1 atm	1.013 · 10 ⁵	1.013	1	1.033	10.33	760
1 at = 1 kp/cm ³	0.981 · 10 ⁵	0.981	0.968	1	10	736
1 m H ₂ O	0.981 · 10 ⁴	0.0981	0.0968	0.1	1	73.6

* Atmosfera física ** Atmosfera técnica

- CAUDAL

Tabela de conversão para unidades de caudal						
	L/s	L/min	M ³ /hr	ft ³ /min	ft ³ /hr	gal/min
L/s	1	60	3,6	2,119093	127,1197	15,85037
L/min	0,016666	1	0,06	0,035317	2,118577	0,264162
M ³ /hr	0,277778	16,6667	1	0,588637	35,31102	4,40288
ft ³ /min	0,4719	28,31513	1,69884	1	60	7,479791
ft ³ /hr	0,007867	0,472015	0,02832	0,01667	1	0,124689
gal/min	0,06309	3,785551	0,227124	0,133694	8,019983	1