



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

LUCAS FUZETO VIZONI

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM APROVEITAMENTO
HIDRELÉTRICO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA NA
BARRAGEM DO BALNEÁRIO DE RANCHARIA/SP**

DOURADOS/MS
2022

LUCAS FUZETO VIZONI

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM APROVEITAMENTO
HIDRELÉTRICO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA NA
BARRAGEM DO BALNEÁRIO DE RANCHARIA/SP**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado para a
obtenção do título de Bacharel
em Engenharia de Energia da
Faculdade de Engenharia da
Universidade Federal da
Grande Dourados.

Orientador: Prof. Dr. Fernando
Augusto Alves Mendes

DOURADOS/MS
2022

LUCAS FUZETO VIZONI

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DE
BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA NA BARRAGEM DO
BALNEÁRIO DE RANCHARIA/SP

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao curso de Engenharia de Energia na
Universidade Federal da Grande Dourados como
requisito parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia de Energia.

Aprovado em 01/11/2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Fernando Augusto Alves Mendes



Prof. Carlos Alberto Chuba Machado



Prof. Orlando Moreira Junior

RESUMO

Com a crescente necessidade de diversificação e descentralização da geração de energia no Brasil, trazendo mais segurança energética, reduzindo custo de transmissão e distribuição e reduzindo impactos ambientais, é proposto neste trabalho a determinação do potencial hidrelétrico do Ribeirão do Capivari. Para isso, a vazão do rio foi medida através do método do flutuador e comparada com os dados do posto fluviométrico situado há cerca de 30 km à jusante da barragem. Atualmente o sistema de descarga de fundo da represa encontra-se inoperante, fazendo com que a barragem seja considerada como “Categoria de Risco Alto” pela Agência Nacional de Águas (ANA). Sendo assim, considerada a atual conjuntura somada com o desafio de captação de água encontrado para instalação de uma Micro Central Hidrelétrica (μ CH), foi proposto a integração de um sifão aéreo operando em conjunto com uma μ CH. Esta última projetada para utilizar bombas que funcionam inversamente como se fossem turbinas (BFTs). A captação da água da represa é feita por um sifão e direcionada para uma câmara de carga à jusante, de onde o fluxo é direcionado para as BFTs ou para a tubulação de drenagem num eventual esvaziamento da represa. Através do método de Viana foi possível fazer a seleção de um modelo de bomba para o aproveitamento e com isso estimar a quantidade de energia que pode ser gerada em períodos de seca e cheia. Com isso, foi concluído que há viabilidade técnica e econômica para a instalação do sistema. Porém, deve-se selecionar um modelo de bomba com maior vazão para reduzir o número de BFTs, e assim, o custo de cada quilowatt-hora gerado.

Palavras-chave: BFTs. Sifão Aéreo. Método de Gumbel. Método de Viana.

ABSTRACT

With the growing need for diversification and decentralization of energy generation in Brazil, bringing more energy security, reducing transmission and distribution costs and reducing environmental impacts, it is proposed in this work to determine the hydroelectric potential of Ribeirão do Capivari. For this, the river flow was measured using the float method and compared with data from the fluviometric post located about 30 km downstream of the dam. Currently, the bottom discharge system of the dam is inoperative, causing the dam to be considered as “High Risk Category” by the National Water Agency (ANA). Therefore, considering the current conjuncture added to the challenge of capturing water found for the installation of a Micro Hydroelectric Power Plant (μ CH), it was proposed the integration of an aerial siphon operating together with a μ CH. The latter is designed to use pumps that work inversely as if they were turbines (BFTs). The collection of water from the dam is done by a siphon and directed to a loading chamber downstream, from where the flow is directed to the BFTs or to the drainage pipe in the event of an eventual emptying of the dam. Through the Viana method, it was possible to select a pump model for the use and, with this, to estimate the amount of energy that can be generated in periods of drought and flood. With this, it was concluded that there is technical and economic feasibility for the installation of the system. However, a pump model with a higher flow rate should be selected to reduce the number of BFTs, and thus the cost of each pump generated kilowatt-hour.

Keywords: BFTs. Air Siphon. Gumbel method. Viana method.

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA NA BARRAGEM DO BALNEÁRIO DE RANCHARIA/SP

Lucas Fuzeto Vizoni, lucas_vizoni@hotmail.com¹

Fernando Augusto Alves Mendes, fernandomendes@ufgd.edu.br¹

¹Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Itahum km 12 – Dourados – MS.

Resumo: Com a crescente necessidade de diversificação e descentralização da geração de energia no Brasil, trazendo mais segurança energética, reduzindo custo de transmissão e distribuição e reduzindo impactos ambientais, é proposto neste trabalho a determinação do potencial hidrelétrico do Ribeirão do Capivari. Para isso, a vazão do rio foi medida através do método do flutuador e comparada com os dados do posto fluviométrico situado há cerca de 30 km à jusante da barragem. Atualmente o sistema de descarga de fundo da represa encontra-se inoperante, fazendo com que a barragem seja considerada como “Categoria de Risco Alto” pela Agência Nacional de Águas (ANA). Sendo assim, considerada a atual conjuntura somada com o desafio de captação de água encontrado para instalação de uma Micro Central Hidrelétrica (μ CH), foi proposto a integração de um sifão aéreo operando em conjunto com uma μ CH. Esta última projetada para utilizar bombas que funcionam inversamente como se fossem turbinas (BFTs). A captação da água da represa é feita por um sifão e direcionada para uma câmara de carga à jusante, de onde o fluxo é direcionado para as BFTs ou para a tubulação de drenagem num eventual esvaziamento da represa. Através do método de Viana foi possível fazer a seleção de um modelo de bomba para o aproveitamento e com isso estimar a quantidade de energia que pode ser gerada em períodos de seca e cheia. Com isso, foi concluído que há viabilidade técnica e econômica para a instalação do sistema. Porém, deve-se selecionar um modelo de bomba com maior vazão para reduzir o número de BFTs, e assim, o custo de cada quilowatt-hora gerado.

Palavras-chave: BFTs. Sifão Aéreo. Método de Gumbel. Método de Viana.

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia tem crescido em todo o mundo visando principalmente a descarbonização das matrizes energéticas. O Brasil possui condições geográficas favoráveis para a produção de energia proveniente da geração hidrelétrica. Contudo, o país ainda depende da energia produzida por grandes usinas hidrelétricas onde a produção ocorre de forma centralizada, causando grande impacto no ecossistema local. Já as Pequenas Centrais Hidrelétricas a Fio D'Água não possuem a necessidade alagar grandes áreas e reduzem as perdas nas linhas de transmissão por estarem perto dos centros consumidores.

No Brasil, o estudo de Bombas Funcionando como Turbinas é uma das linhas de pesquisa do Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas - CERPCH, vinculado à Universidade Federal de Itajubá, e do Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos – CPH, da Universidade Federal de Minas Gerais. Os trabalhos desenvolvidos nestes laboratórios contemplam o processo de seleção da

BFT, avaliações experimentais de desempenho e propostas de micro sistemas de geração de energia elétrica. (ALVES, 2010, p. 30)

As bombas centrífugas possuem tecnologia que estão disponíveis em todo o mundo e podem ser encontradas em diversos tipos, tamanhos e capacidades. Além disso, apresentam aspectos operacionais e de manutenção relativamente simples (Chagas, 2020).

Conforme Chagas, as bombas são mais acessíveis do que as turbinas e apresentam um ótimo desempenho funcionando inversamente. Por isso, estão sendo muito utilizadas em aproveitamentos hidrelétricos como alternativa as turbinas.

O Ribeirão do Capivari um rio de pequeno porte que corta o município de Rancharia – SP onde é represado formando o Parque Balneário de Rancharia (22K 502680.28 m E 7530842.28 m S). A represa do balneário é destinada principalmente para banho, *camping*, esportes aquáticos e pesca. Assim sendo, este estudo não envolve a regularização do reservatório, uma vez que a variação do nível da represa pode acabar afetando essas atividades, assim como todo o ecossistema da represa. Portanto, para estimar quantidade de energia a ser gerada pelo aproveitamento, foi utilizada apenas a vazão do rio, sendo esta capaz de sofrer variações conforme o volume de chuvas no período.

Durante o estudo foram consultados dois órgãos públicos: a Secretaria de Agricultura e Meio Ambiente de Rancharia e o Departamento de Águas Energia Elétrica do Estado de São Paulo, responsáveis pela manutenção e fiscalização da barragem, respectivamente. Com isso, foi possível tomar conhecimento dos problemas que possui a barragem e saber quais alternativas seriam propostas para solucioná-los. Segundo informação da secretaria, o aterro está sendo estudado por empresas terceirizadas e se cogita a instalação de um sifão aéreo para escoamento da vazão ecológica da represa.

Diante desta conjuntura, o principal objetivo deste estudo é analisar a viabilidade de instalação de uma Micro Central Hidrelétrica a Fio D'Água - utilizando bombas funcionando como turbinas - integrada com um sifão aéreo (que faz o papel do descarregador de fundo) e estimar a quantidade de energia que poderá ser extraída do sistema em determinadas épocas do ano.

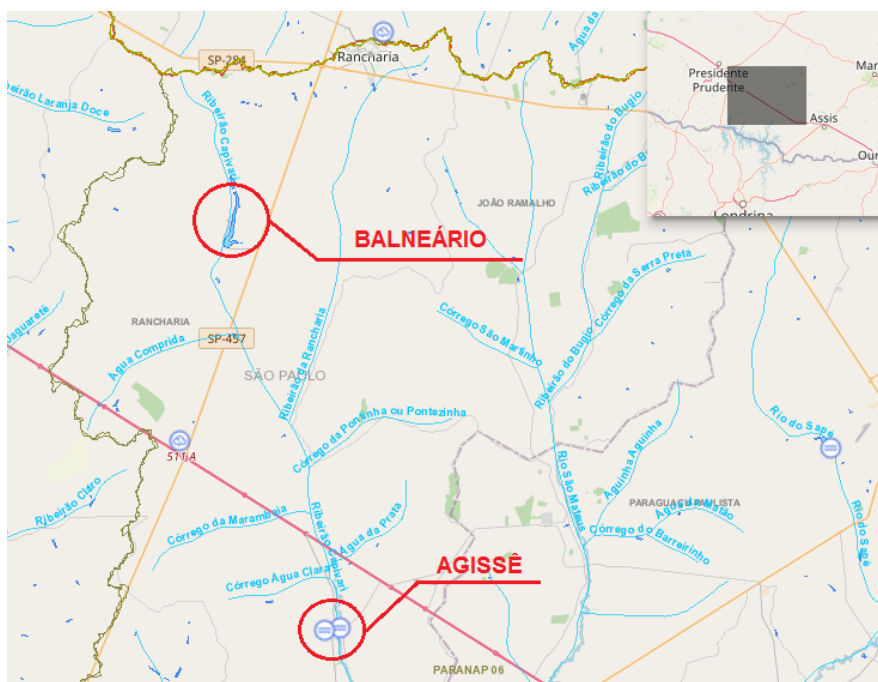
2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Caracterização do local e coleta de dados

Para o estudo, foram determinadas a vazão e a altura de queda do vertedouro e como não há posto fluviométrico no local, as vazões foram determinadas utilizando-se o método do flutuador.

As medições foram comparadas com os dados do posto fluviométrico do mesmo rio, situado a cerca de 30 km à jusante da represa, o qual pertence a mesma bacia hidrográfica, porém, com uma vazão maior por receber águas de outros córregos, vide Figura 1.

Figura 1. Mapa hidrográfico da região estudada.



Fonte: ANA, 2022.

No decorrer deste trecho, o Ribeirão do Capivari recebe seis afluentes: Água Comprida, Ribeirão da Rancharia, Córrego da Pontezinha, Córrego da Marambaia, Água da Prata e Córrego Água Clara, os quais se somam a vazão do Balneário antes de passar pelo posto fluviométrico em questão. Após isso, o rio segue em direção ao Rio São Mateus tendo como destino a represa da Usina Hidrelétrica de Capivara.

Os dados de vazão do posto fluviométrico (Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recurso Hídrico do Médio Paranapanema) de Ajicê podem ser consultados no banco de dados hidrológicos no portal do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) ou no site da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico).

2.2. Método do Flutuador

O método do flutuador consiste em determinar a velocidade de deslocamento de um objeto flutuante, medindo o tempo utilizado para o seu deslocamento num determinado trecho de rio de comprimento conhecido. É um método de fácil compreensão, com um baixo custo para instalar e pode medir qualquer vazão em caráter de pré-avaliação (SANTOS et al., 2001).

Para a medição da vazão do Balneário por meio do método do flutuador, foi escolhido um trecho de fácil acesso e sem declive, como mostrado na Figura 2, onde foi medido o comprimento, a largura, as cotas para que fosse possível obter a área molhada e também o tempo que o flutuador levou para percorrer o trajeto para calcular a sua velocidade.

Figura 2. Trecho do canal onde ocorreram as medições.



Fonte: Autores, 2021.

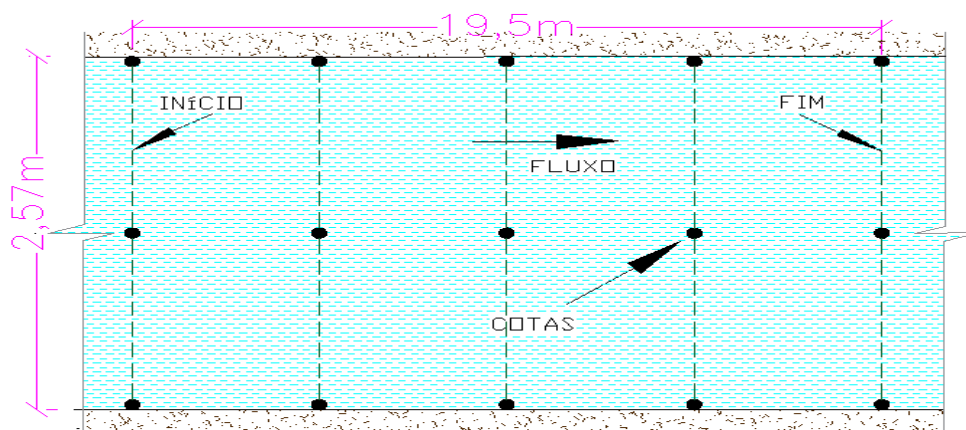
Para a determinação da velocidade (V) o flutuador (garrafa pet) foi cronometrado por quinze vezes durante o percurso. Como a velocidade do escoamento pode variar em pontos superficiais e mais profundos, Palhares et al. (2007) indicam coeficiente de correção entre 0,80 e 0,90. Neste trabalho foi utilizado o valor de 0,90, como mostra a seguinte equação:

$$V = 0,90 \left(\frac{C}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

Onde V é a velocidade média do flutuador [m/s], C o Comprimento do trajeto [m] e Δt o intervalo de tempo cronometrado [s].

O canal foi construído em formato retangular, porém seu piso sofreu algumas deformações ao longo dos anos, fazendo com que a profundidade variasse em determinados pontos. Portanto, para maior confiabilidade das medidas, o trecho foi dividido em cinco linhas que cortam o canal transversalmente, como mostrado na planta da Figura 3. Em cada linha foram definidos três pontos para medição das cotas fluviométricas.

Figura 3. Vista superior do canal no trecho de medição.

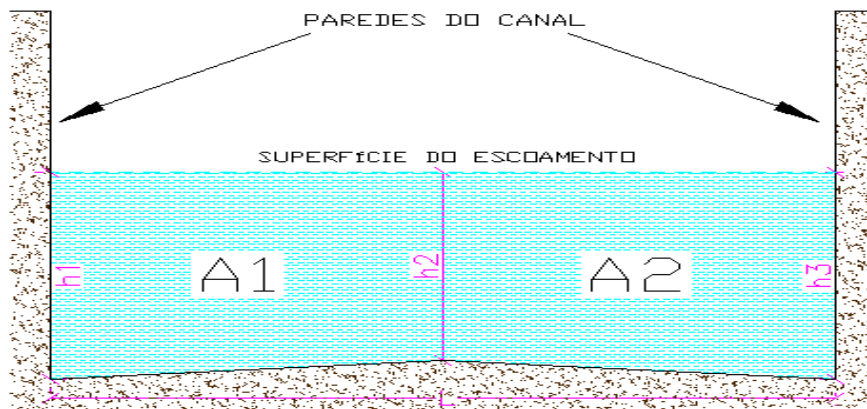


Fonte: Autores, 2022.

Já em um corte transversal do canal, como mostra a Figura 4, formam-se dois trapézios em cada linha onde as áreas são calculadas e somadas entre si. Após obter as cinco áreas das seções transversais, foi calculada a média aritmética destas a fim de se obter uma área média:

$$A = Ast_1 + Ast_2 + Ast_3 + Ast_4 + Ast_5 \quad (2)$$

Figura 4. Área da seção transversal do canal.



Fonte: Autores, 2022.

Com a área e a velocidade calculadas, foi possível calcular a vazão (Q) através da equação da continuidade:

$$Q = A.V \quad (3)$$

Onde Q é a vazão volumétrica [m^3/s], A é a área da seção transversal [m^2] e V é a velocidade média do flutuador [m/s].

2.3. Sifão aéreo

Um sifão é um tubo usado para esvaziar um reservatório, começando em um nível superior, na água represada, e seguindo a um nível inferior, no canal a jusante. Por exemplo, se o reservatório de uma represa tiver que ser esvaziado mas não houver comporta de fundo, um sifão pode ser usado (Gribbin, 2017, p.85).

O escoamento ocorre por efeito de desnível de acordo com o princípio de Bernoulli. Porém, existem perdas localizadas como nos bocais de entrada e saída, nas curvas e na válvula ventosa. Os coeficientes de atrito adotados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficiente de atrito para o cálculo de perda de carga localizada.

bocal normal entrada	curva 45° raio longo	válvula ventosa	curva 90° raio longo	bocal afogado saída
0,50	0,20	0,56	0,40	0,90

Fonte: Autores, 2022.

O Método utilizado para o cálculo foi o do Coeficiente de Perda em Função da Carga Cinética representado pela equação 4.

$$H_p = f \frac{L U^2}{D 2g} \quad (4)$$

Onde f = coeficiente de atrito (adimensional); L = Comprimento da tubulação (m); U = velocidade média do escoamento (m/s); $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; D = Diâmetro da tubulação (m); H_p = perda de carga (m).

E pelo método de Hazen-Williams foi calculada a perda de carga distribuída ao longo de toda a extensão do tubo através da equação 5.

$$\Delta h = L \frac{10,641 Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (5)$$

Onde C = coeficiente que depende da natureza do material e das condições da parede interna do tubo; Q = vazão (m^3/s); D = diâmetro (m); L = comprimento da tubulação (m).

Foi utilizado um coeficiente de $C = 100$ representando um tubo de ferro fundido com 15 anos de uso.

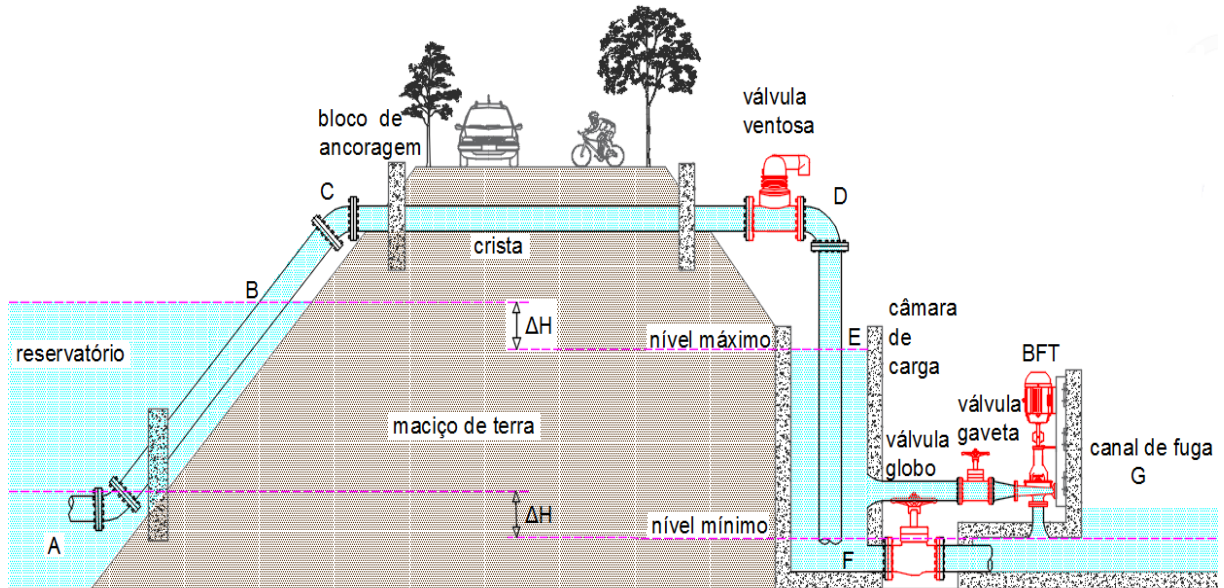
Para que o sifão entre em funcionamento é necessário escorv-lo (enchê-lo d'água). Isso pode ser feito através da válvula ventosa de tríplice função situada no ponto mais alto, onde o ar pode ser admitido ou retirado em grandes quantidades. e. evitar a formação de bolsas de ar na tubulação da crista.

Para interromper o fluxo pode ser fechada a válvula globo e a válvulas das BFTs para que o nível da câmara de carga se iguale ao nível da represa – assim o sifão se mantém carregado - ou também pode ser introduzido ar através da válvula ventosa. Uma representação do sistema completo é mostrada na Figura 5.

Foi admitido um comprimento total de 70 m para o sifão. Sendo 40 m para a tubulação de adução (AC), 20 m para a crista (CD) e 10 m para a descarga na câmara de carga (DF).

O controle de vazão poderá ser realizado pela tubulação de drenagem através da válvula globo situada no ponto mais baixo da câmara de carga, e/ou também pelo ativamento ou não de uma unidade geradora, pelo registro de gaveta situado na tubulação forçada da BFT.

Figura 5. Sistema de Sifão integrado a uma Micro Central Hidrelétrica.



Fonte: Autores, 2022.

O nível da câmara de carga deve situar-se abaixo do nível da represa e “tanto mais abaixo quanto maiores forem as perdas de carga totais” (Costa, 2006, p. 2). Portanto, quanto mais baixo for o nível na câmara de carga, maior será a vazão no sifão.

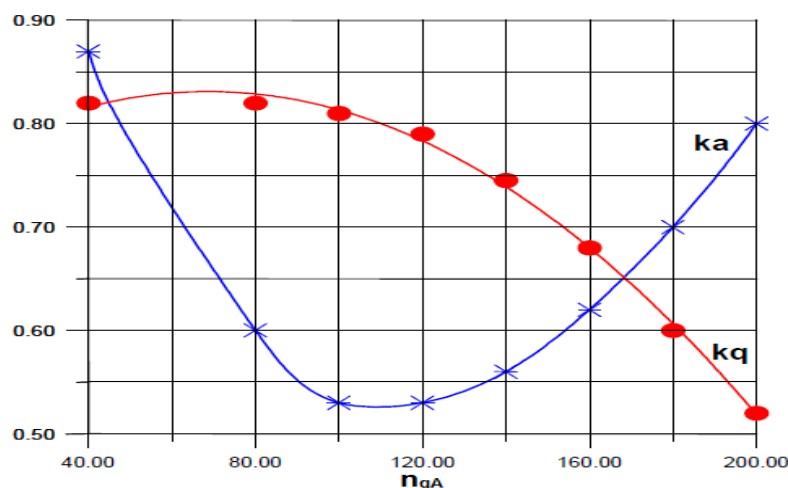
2.4. Seleção da máquina

Geralmente os catálogos de fabricantes de bombas não fornecem dados de ensaio de seu funcionamento reverso. Entretanto, o método desenvolvido por Viana para a seleção da máquina, consiste na determinação de dois coeficientes experimentais, de vazão (k_q) e de altura (k_a). Estes são determinados a partir do cálculo da rotação específica (n_{qA}), devendo obedecer ao intervalo de 40 à 200, como mostra a Figura 6. A velocidade específica é determinada através da Equação 6.

$$n_{qA} = \frac{103 \cdot n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{0,75 \cdot H_t \cdot g} \quad (6)$$

Onde n_{qA} é a rotação específica [rps], n_t a rotação nominal [rps], Q_t a vazão da turbina [m^3/s], H_t a altura de queda líquida [m] e g a aceleração da gravidade [m/s^2].

Figura 6. Coeficientes adimensionais de vazão (k_q) e altura (k_a) versus rotação específica da BFT (n_{qA}).



Fonte: Viana e Nogueira, 1990.

A partir destes coeficientes, foram calculados novos valores de altura (H_b) e vazão (Q_b) da BFT, que servirão de parâmetro na escolha de uma bomba adequada para o aproveitamento, sendo analisada sua curva característica no catálogo do fabricante.

$$H_b = ka \cdot H_t \quad (7)$$

$$Q_b = kq \cdot Q_t \quad (8)$$

3. RESULTADOS

No trecho escolhido para efetuar as medidas de vazão, foram tiradas medidas de comprimento $C = 19,50$ m, da largura $L = 2,57$ m, das cotas, dos intervalos de tempo do percurso do flutuador e a área média da seção transversal do canal. Com todos estes dados foi possível obter a vazão média do canal, como mostra a tabela 2.

Tabela 2. Cotas e áreas do evento realizado em agosto de 2020.

Cota (m)			Área (m ²)		
h1	h2	h3	área trapézio 1	área trapézio 2	área total
0,54	0,5	0,46	0,67	0,62	1,29
0,55	0,5	0,54	0,67	0,67	1,34
0,51	0,54	0,62	0,71	0,75	1,46
0,53	0,59	0,60	0,72	0,76	1,48
0,57	0,54	0,61	0,71	0,74	1,45

Fonte: Autores, 2022.

A partir desses dados e da medida de largura do canal ($L = 2,57 \text{ m}$), foi possível realizar a média aritmética das áreas totais e obter um valor para uma área média ($A = 1,40 \text{ m}^2$), que será uma das grandezas utilizadas para o cálculo da vazão.

Sendo assim, foi cronometrado por quinze vezes o tempo gasto pelo flutuador no percurso e utilizando a distância percorrida ($C = 19,50 \text{ m}$) foi possível calcular a velocidade e conseqüentemente a vazão do canal, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Tempo e velocidade do flutuador e a vazão do canal.

Tempo (s)	Velocidade (m/s)	Vazão (m^3/s)
40,7	0,48	0,61
37,35	0,52	0,66
42,04	0,46	0,59
43,9	0,44	0,56
43,72	0,45	0,56
41,2	0,47	0,60
41,34	0,47	0,60
35,21	0,55	0,70
42,56	0,46	0,58
45,44	0,43	0,54
46,71	0,42	0,53
38,52	0,51	0,64
39,81	0,49	0,62
39,83	0,49	0,62
40,08	0,49	0,61
Média		0,60

Fonte: Autores, 2022.

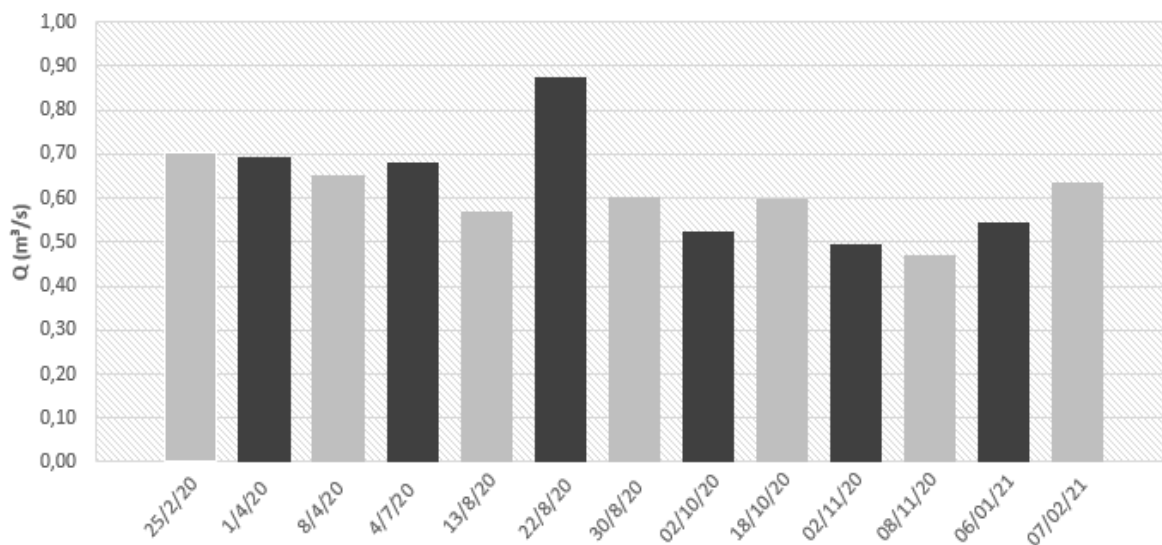
Dessa forma, pela média aritmética dos dados de vazão foi possível encontrar um valor médio para a vazão diária do evento utilizado como exemplo de $0,60 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.1. Vazão de projeto

As medições de vazão realizadas no Balneário, foram registradas por treze vezes, ocorrendo em dias aleatórios como mostra o gráfico da Figura 7. Estas medidas foram consideradas como sendo as vazões médias diárias da represa.

Como pode ser observado no gráfico da Figura 7, o valor da vazão de 22/8/2020 está acima da média das demais por conta das chuvas que ocorreram dias antes da medição. O fenômeno também pode ser observado no valor da vazão aferida no mesmo dia no posto fluviométrico de Agissê.

Figura 7. Vazões médias diárias do Balneário.



Fonte: Autores, 2022.

Posto isto, as vazões aferidas foram comparadas com as medidas correspondentes a mesma data do posto fluviométrico de Agissê, sendo possível obter um percentual médio de vazão entre os dois pontos de medição, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Percentual das vazões entre o Balneário e Agissê.

Data	Balneário (m³/s)	Agissê (m³/s)	Balneário/Agissê (%)
25/02/2020	0,70	9,02	7,80
01/04/2020	0,69	11,1	6,26
08/04/2020	0,65	11,1	5,86
04/07/2020	0,68	10,79	6,30
13/08/2020	0,57	9,29	6,12
22/08/2020	0,88	13,32	6,57
30/08/2020	0,60	10,03	5,99
02/10/2020	0,52	9,51	5,51
18/10/2020	0,60	9,81	6,08
02/11/2020	0,49	9,25	5,34
08/11/2020	0,47	8,82	5,33
06/01/2021	0,54	9,16	5,93
07/02/2021	0,64	10,65	5,97
Média (%)			6,08

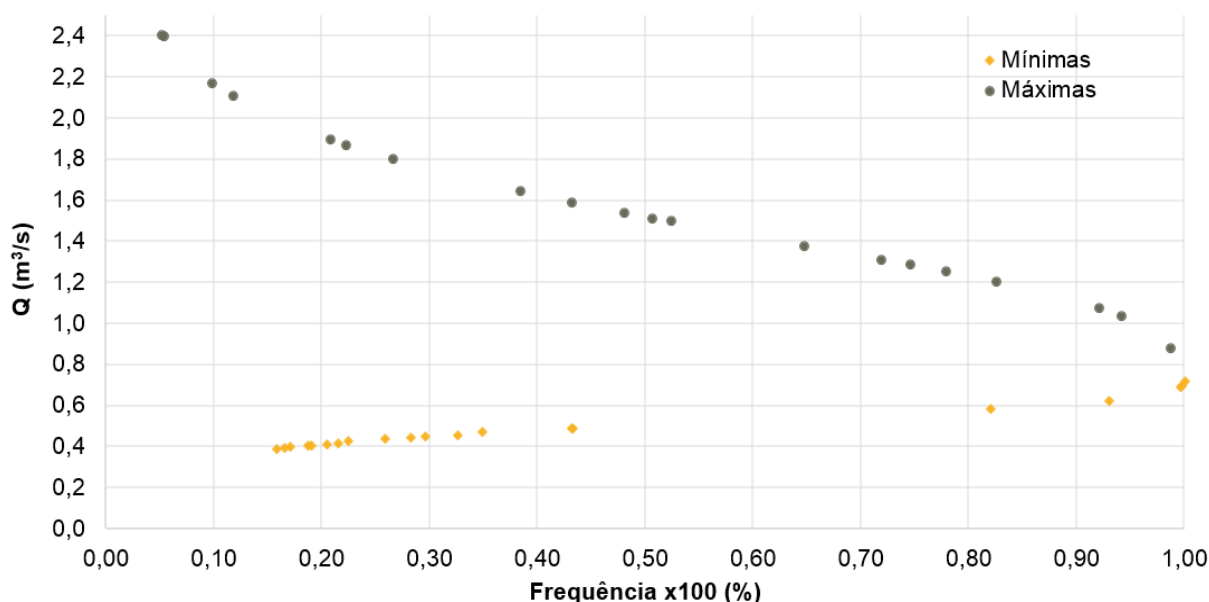
Fonte: Autores, 2022.

Desta maneira, utilizando a série histórica de vazões de Agissê por um período de 20 anos e a média aritmética do percentual obtida na Tabela 4, foram estimadas as vazões médias diárias do Balneário pelo período de 2001 a 2020. Ou seja, foi considerado que todas as vazões do Balneário correspondem a 6,08 % da vazão do posto fluviométrico de Agissê.

3.2. Distribuição de Gumbel

Uma vez estimada a série histórica, foi aplicado o método da distribuição de Gumbel, que mede a probabilidade de um evento da série ocorrer em valor igual ou maior no futuro. Os dados são apresentados no gráfico da Figura 8.

Figura 8. Gráfico da Distribuição de Gumbel do Balneário de Rancharia.



Fonte: Autores, 2022.

Tanto nos eventos extremos máximos quanto nos mínimos, percebe-se que as vazões extremas mais recorrentes estão entre 0,6 e 1,1 m³/s, com frequência maior do que 90%.

Para o cálculo de tempo de retorno, foram considerados os períodos de 10 até 500 anos, onde está associado o tamanho da obra hidráulica que, conseqüentemente, está diretamente relacionado com o risco adotado. Portanto, foram calculadas as vazões que podem vir a ocorrer com seu respectivo tempo de retorno - de 10, 50, 100 e 500 anos - como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5. Tempo de retorno das vazões extremas.

Tempo de retorno (anos)	Q (m ³ /s)	
	Mínima	Máxima
10	0,34	2,17
50	0,20	2,74
100	0,14	2,98
500	0,01	3,53

Fonte: Autores, 2022.

Para obras permanentes galgáveis (de concreto) utiliza-se um tempo de recorrência de 500 anos, com vida útil da obra de 50 anos e com risco admitido de 9,5% (Eletrobrás, 2000, p. 58). Sendo assim, uma eventual vazão mínima de 0,01 m³/s e uma máxima de 3,53 m³/s poderão acontecer ou até serem superadas no período considerado.

3.3. Cálculo do Sifão

Foram obtidas as perdas de carga distribuídas e localizadas utilizando o método de Hazen-Williams e o método do Coeficiente de Perda em Função da Carga Cinética (Tabela 6), respectivamente. Foi adotado um coeficiente de rugosidade de $C = 100$, que corresponde a tubulação de ferro fundido.

O intervalo da velocidade de escoamento foi sempre mantido dentro dos níveis aceitáveis (0,8 a 1,8 m/s) para evitar cavitação na tubulação de sucção e com isso evitar a formação de bolsões de ar na tubulação da crista.

Tabela 6. Coeficiente utilizados para o cálculo de perda de carga localizada.

bocal normal entrada	curva 45° raio longo	válvula ventosa	curva 90° raio longo	bocal afogado saída
0,50	0,20	0,56	0,40	0,90

Fonte: Autores, 2022.

Para o cálculo das perdas de carga, foi utilizada a fórmula (04) para perdas localizadas e a fórmula (05) para perdas distribuídas.

Vários diâmetros para o sifão foram testados levando em conta o intervalo de vazão de 0,6 até 1,1 m³/s, que está de acordo com as vazões extremas mais frequentes (>90%) mostradas no gráfico da Distribuição de Gumbel (Figura 8). Dois critérios foram adotados para a escolha deles, o primeiro para que a velocidade respeite o intervalo entre 0,8 e 1,8 m/s e o segundo para que a perda de carga (carga hidráulica) não ultrapasse 1 m de altura.

Desta forma, foram selecionadas as melhores combinações de dados para cada medida de diâmetro.

Tabela 7. Possíveis diâmetros para o sifão com suas respectivas vazões máximas, velocidades, perdas de carga e quantidade de BFTs supridas.

D (m)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Perda de carga (m)	Quantidade de BFTs
0,35	0,14	1,46	0,93	4,3
0,40	0,20	1,59	0,99	6,2
0,45	0,26	1,63	0,95	8,0
0,50	0,34	1,73	0,98	10,5
0,60	0,51	1,80	0,94	15,7
0,70	0,69	1,79	0,84	21,3

Fonte: Autores, 2022.

O diâmetro de 0,60 m foi selecionado de acordo com os tamanhos mais comuns fabricados, podendo operar com folga dentro do intervalo de vazões citado acima, facilitando uma eventual drenagem do reservatório, fazendo o papel do descarregador de fundo, ou para escoar uma baixa vazão num eventual período de seca.

Um exemplo de configuração para atender o intervalo de vazão em condições aceitáveis de velocidade, seria instalar 2 tubos em paralelo de 0,60 m de diâmetro cada, podendo escoar uma vazão mínima de 0,23 m³/s em cada tubo (0,46 m³/s no total) e uma vazão máxima de 0,51 m³/s em cada tubo (1,02 m³/s no total), podendo chegar a suprir até 31 BFTs, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8. Vazão mínima e máxima de cada tubo para um diâmetro de 0,60 m.

D (m)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Perda de carga (m)	Quantidade BFTs
0,60	0,23	0,81	0,20	7,1
0,60	0,51	1,80	0,94	15,7

Fonte: Autores, 2022.

Temos então que o intervalo das vazões mais frequentes (0,6 até 1,1 m³/s) está sendo contemplado pela capacidade de escoamento do sifão (0,46 até 1,02 m³/s).

3.4. Altura de queda

A altura bruta (H_{BR}) foi definida através das imagens de satélite produzidas pelo “Google Earth”, como é mostrado na Figura 9. Assim foi possível estabelecer uma altura de 6 metros para comportar o sifão e o aproveitamento hidrelétrico juntos.

Figura 9. Altura bruta (H_{BR}).



Fonte: Google Earth, 2022.

Considerando que a diferença de nível entre os dois reservatórios seja de no mínimo $H_{pc} = 1$ m, para vencer as perdas, este valor foi descontado da altura bruta $H_{BR} = 6$ m para obter a altura de queda do aproveitamento $H = 5$ m, através da equação 7.

$$H = H_{BR} - H_{PC} \quad (7)$$

3.5. Seleção da bomba

Uma pesquisa foi realizada no catálogo da fabricante IMBIL tendo como objetivo selecionar as bombas que mais se aproximavam da altura de queda disponível. Geralmente as bombas centrífugas trabalham com alturas de recalque mais altas que as bombas axiais, porém ainda existe pouco estudo envolvendo as bombas axiais funcionando como turbina. Mesmo assim, foi possível escolher um modelo ideal para as circunstâncias. Um dos critérios na escolha da bomba, foi que suportasse a maior vazão possível, levando em conta que um grande número de unidades instaladas elevaria os custos de instalação e manutenção das mesmas.

Para que o rendimento da bomba operando como turbina, seja igual àquele da bomba operando como bomba, é necessário que a diferença de nível e a vazão da BFT sejam maiores que as da BFB, para a mesma rotação (VIANA, 1987). Estes aumentos são necessários para se compensar as perdas internas da máquina, devido a inversão do fluxo. O efeito disso é o aumento da potência de eixo quando a bomba

estiver trabalhando como turbina, por tanto, deve-se verificar a tensão a que o material do eixo vai ser submetido (Xavier, 2019, p. 30).

A vazão da bomba foi determinada analisando o ponto de maior rendimento na sua curva característica. Foram testados vários modelos de bombas do mesmo fabricante até encontrar o modelo ideal para atender à altura de queda desejada. Na tabela 9 são mostradas suas principais características.

Tabela 9. Especificação da bomba.

Fonte: IMBIL, 2022.

<i>Marca</i>	<i>IMBIL</i>
<i>Modelo</i>	<i>ITAP 100-160</i>
<i>Diâmetro recalque (mm)</i>	<i>100</i>
<i>Diâmetro do rotor (mm)</i>	<i>160</i>
<i>Flange de sucção (mm)</i>	<i>125</i>
<i>Rotação (RPM)</i>	<i>1120</i>

3.6. Rotação específica

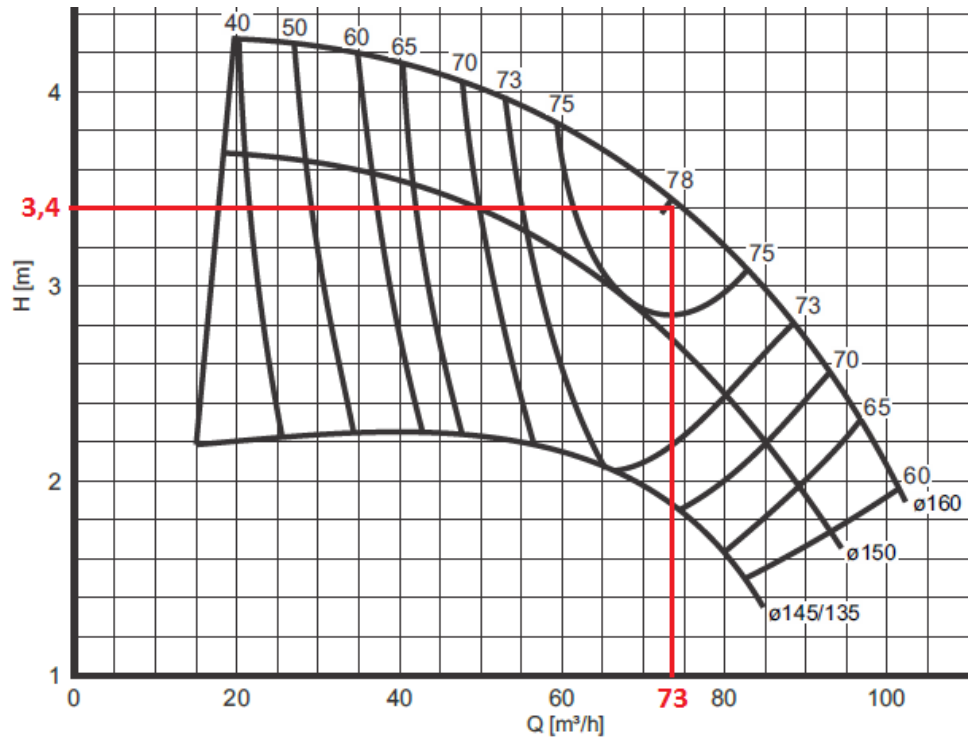
Para o modelo mostrado na tabela 9, foram testados alguns valores de vazão na equação da rotação específica de Viana e o valor de $Q_{BFT} = 0,0324 \text{ m}^3/\text{s}$ foi o que apresentou o melhor desempenho para o modelo.

Tendo isto, foi calculada a rotação específica ($n_{qA} = 174$) através da equação 6, e extraídos os valores correspondentes aos coeficientes de altura e de vazão do gráfico da Figura 6, de 0,67 e 0,63 respectivamente. Então, através da equação 7 e 8, foram encontrados os valores hipotéticos de vazão e altura para seleção da máquina através de sua curva característica. Portanto, temos $Q_B = 0,0204 \text{ m}^3/\text{s}$ (que corresponde a $73 \text{ m}^3/\text{h}$) e $H_b = 3,4 \text{ m}$. Levando estes valores na curva da bomba (Figura 10), atinge-se o ponto de rendimento máximo para o modelo (78%).

Quanto as perdas de carga nos órgãos de adução das BFTs, os valores obtidos nos cálculos se mostraram insignificantes pelo fato das máquinas estarem posicionadas próximas da tomada d'água e pelo registro de gaveta apresentar baixo coeficiente de perda. Outra contribuição para a redução das perdas é o tamanho do

diâmetro considerado na tubulação forçada, de 150 mm com uma redução concêntrica para 100 mm no flange de recalque da bomba.

Figura 10. Curva característica da bomba ITAP 100-160.



Fonte: Catálogo IMBIL, 2022.

3.7. Seleção do alternador síncrono

Os geradores devem trabalhar com rotações síncronas constantes. Como a vazão e altura da BFT são maiores do que quando elas funcionam como bombas (BFB), certamente a rotação nominal também será maior do que a especificada no catálogo do fabricante. Portanto, o número de polos foi calculado com base na rotação máxima da maioria dos alternadores síncronos disponíveis no mercado (1800 RPM) e com a frequência da rede elétrica local (60 Hz). Utilizando estes valores na Equação 08 obtém-se o número de 4 polos. Na Equação 08 N_s é a rotação da bomba em rps, f a frequência da rede e p o número de polos.

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (8)$$

Com base nos parâmetros de potência elétrica, rotação e número de polos, foi selecionado o seguinte alternador:

Tabela 10. Alternador Toyama TA8.0CT2.

<i>Potência Máxima</i>	8 kVA
<i>Rotação Máxima</i>	1800 rpm
<i>Número de pólos</i>	4
<i>Tensão</i>	Trifásica 220 V/127 V
<i>Frequência</i>	60Hz

Fonte: Catálogo Toyama, 2022.

3.8. Potência hidráulica da BFT (P_H)

A BFT deve operar com vazão e queda superiores aos valores nominais da bomba (com a mesma rotação), para se obter o mesmo rendimento (Viana, 2012). Portanto, considerando a curva característica da BFB, onde seu rendimento (η_t) é de 78%, o mesmo valor foi considerado para a BFT. Com isso, foi determinada a potência hidráulica da bomba selecionada de 1264,4 W, calculada através da Equação 9:

$$P_H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (9)$$

3.9. Potência elétrica da BFT (P_{el})

Conhecendo o rendimento do gerador η_g (80%) e o rendimento do acoplamento η_{ac} , que poderá ser 100% se for direto (sem transmissão de velocidade por engrenagens) e a potência hidráulica P_H , obteve-se a potência elétrica P_{el} de 1011,5 W através da Equação 10:

$$P_{el} = P_H \cdot \eta_g \cdot \eta_{ac} \quad (10)$$

3.10. Quantidade de energia (kWh)

Levando em conta um fator de capacidade de 60% para eventuais manutenções ou outros fatores que possam levar a interrupção do funcionamento, a quantidade de energia estimada que poderá ser gerada por cada unidade geradora em um período diário é de 14,6 kWh/dia. Dessa forma, foi calculada a quantidade de energia mínima e máxima que a central poderá produzir, mostrada na Tabela 11.

Tabela 11. Capacidade de geração da Micro Central Hidrelétrica.

	Q (m ³ /s)	Quantidade de BFTs	kWh/dia	kWh/mês	kWh/ano
Mínima	0,46	14	204	6.117	73.404
Máxima	1,02	31	452	13.546	162.552

Fonte: Autores, 2022.

De acordo com a Tabela 11, uma vazão mínima de 0,46 m³/s poderá suprir até 14 BFTs podendo gerar anualmente 73.404 kWh, enquanto uma vazão máxima de 1,02 m³/s poderá suprir até 31 BFTs gerando 162.552 kWh/ano.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo Murilo (RUBIK, 2021, p. 58 e 59) uma turbina Foster ZD760-LM-40=10°) acoplada a um gerador Foster SF-18-6/368 custaria no ano de 2021, aproximadamente R\$ 66.000,00 e geraria em torno de 88.646,4 kWh por ano. Portanto, este conjunto turbina-gerador produziria cada Quilowatt-hora por um valor de R\$ 0,74.

Enquanto, uma bomba IMBIL ITAP 100-160 custaria R\$ 7.061,00 (cotado em 11/11/2022 em FLOWVAL INDUSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS) acoplada com um Alternador Toyama TA8.OCT2 no valor de R\$ 3.413,53 (cotado em 10/11/2022 em Madeira Madeira) resultando num total de R\$ 10.474,53 produziria 5.244 kWh por ano, a um valor para cada quilowatt-hora de R\$ 2,00.

Pode-se observar que, apesar do custo de manutenção da turbina ser mais elevado se comparado com a bomba, o preço por kWh gerado da BFT é quase vezes maior comparado ao preço por kWh gerado da turbina. Isso porque a vazão da BFT (0,0324 m³/s) é 21 vezes menor que a vazão da turbina (0,69 m³/s). Portanto, seria necessário 17 BFTs para suprir o mesmo escoamento de um conjunto turbina-gerador, o que quase triplicaria o custo em relação as turbinas.

Geralmente, as bombas centrífugas disponíveis no mercado apresentam uma vazão pequena e uma grande altura de recalque em relação ao problema do trabalho. Sendo que os modelos com grande vazão e baixa altura são características das bombas axiais. Porém, os estudos com este tipo de bomba funcionando com turbina ainda são escassos no Brasil.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que, através das circunstâncias em que se encontra o Balneário de Rancharia, pode-se afirmar que a instalação de um sifão aéreo solucionará o

problema do descarregador de fundo, sendo mais simples do que realizar obras no núcleo da barragem. Além disso, sua integração com uma Micro Central Hidrelétrica poderá garantir um retorno do investimento com a energia gerada. Contudo, deve-se considerar a possibilidade de projetar outros modelos de bomba, a fim de diminuir os custos por kWh gerado e diminuir o tempo de retorno do investimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. (2022). *Banco de Dados Hidrológicos*. Agência Nacional das Águas (ANA). <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica: DAEE, 2022. <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>

VIANA, A.N.C; **Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas**. Dissertação de Mestrado. EFEI. Itajubá/MG. Dez./1987. 95 pp.

VIANA, A.N.C.; Nogueira, F. J. H.; **Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas**. Trabalho de pesquisa. Departamento de Mecânica. EFEI. Itajubá/MG. Março/1990.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **BOMBAS DE FLUXO OPERANDO COMO TURBINAS – PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO**. Itajubá: Curso de Engenharia Hídrica – Universidade Federal de Itajubá – Unifei, 6 p.

PALHARES, J. C. P. et al. Medição da Vazão em Rios pelo Método do Flutuador. Comunicado técnico. Concórdia: Embrapa, 7 p. 2007.

SOUZA JUNIOR, Prof. Dr. Oswaldo Honorato de. **UTILIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS ATUANDO EM CONJUNTO EM CENTRAIS DE GERAÇÃO HIDRÁULICAS - CGHS**. Itajubá: Pch Notícias & Shp News, 76, (1), Jan-Mar/2018, da Pág.20-23, 2018. 4 p.

DIAS JUNIOR, Renato Swerts Carneiro. **Integração de Microcentrais Hidrelétricas Utilizando Bombas Funcionando como Turbina e Gerador de Indução**. Itajubá: The 10Th Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission - Clagtee 2013, 2013. 9 p.

ALVES, Danilo Derick Silva. **Contribuições Para o Estudo e a Aplicação de Bombas Funcionando Como Turbinas na Geração Descentralizada**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ALVES, Danilo Derick Silva. **Micro Central Hidroelétrica com BFT: Energia Renovável para o Abastecimento Rural**. Belo Horizonte: The 8 Th Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission - Clagtee 2009, 2009. 6 p.

CHAGAS, Andrey Guedes. **Estudo de Viabilidade Técnica e Financeira da Implantação de Sistemas de Geração de Energia Elétrica Distribuída em**

Tubulações de Água no Setor de Mineração. 2020. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

RUBIK, Murilo. **AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE MICROGERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM UMA PROPRIEDADE RURAL.** 2021. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

XAVIER, Lucas Eduardo Freitas. **BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA: uma alternativa de geração de energia para o sistema de abastecimento de água em Teófilo Otoni (MG).** 2019. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Hídrica, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, 2019.

BEZERRA, Jade Cristynne Franco. **MEDIÇÃO DE VAZÃO EM UM CANAL FLUVIAL UTILIZANDO O MÉTODO DO FLUTUADOR.** Capitão Poço: Cointer, 2017.

FLOWVAL INDUSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS, Rua José Claudio Sanches, 280 - California - Belo Horizonte-MG - CEP: 30855-445. <https://www.flowval.com.br/>.

MadeiraMadeira Comércio Eletrônico S/A. – **CNPJ** 10.490.181/0001-35 - **CEP** 80020-320. **Sede administrativa:** Rua Marechal Deodoro, nº 717 – Curitiba. <https://www.madeiramadeira.com.br/>.