



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena - EEL

JEAN CARLOS MESIANO DO LAGO

Estudo da viabilidade técnico-econômica na instalação de um inversor de  
frequência no motor de uma bomba centrífuga

Lorena

2019

JEAN CARLOS MESIANO DO LAGO

Estudo da viabilidade técnico-econômica na instalação de um inversor de  
frequência no motor de uma bomba centrífuga

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
á Escola de Engenharia de Lorena da  
Universidade de São Paulo como requisito  
parcial para conclusão da Graduação do  
curso de Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Eliane Corrêa  
Pedrozo.

Versão Original

Lorena

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lago, Jean Carlos Mesiano do  
Estudo da viabilidade técnico-econômica na  
instalação de um inversor de frequência no motor de  
uma bomba centrífuga / Jean Carlos Mesiano do Lago;  
orientadora Eliane Corrêa Pedrozo. - Lorena, 2019.  
59 p.

Monografia apresentada como requisito parcial  
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia  
Química - Escola de Engenharia de Lorena da  
Universidade de São Paulo. 2019

1. Bomba superdimensionada. 2. Bomba centrífuga.  
3. Inversor de frequência. 4. Controle de vazão. 5.  
Danos mecânicos. I. Título. II. Pedrozo, Eliane  
Corrêa, orient.

## RESUMO

LAGO, J. C. M. **Estudo da viabilidade técnico-econômica na instalação de um inversor de frequência no motor de uma bomba centrífuga.** 2019. 50 p. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

A implementação de um inversor de frequência fornece a capacidade de controlar a velocidade de rotação do rotor de uma bomba e consequentemente sua vazão. Em uma estação de tratamento de efluente situada na cidade de Paulínia, existe uma bomba superdimensionada para seu circuito de bombeamento, são necessárias duas válvulas de bloqueio quase que totalmente fechadas para se manter a vazão desejada do processo, porém existe uma grande perda energética neste processo além da bomba sofrer grandes danos mecânicos devido ao modo de operação. Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo do ganho econômico na instalação de um inversor de frequência no motor da bomba superdimensionada. O método utilizado para realizar a análise foi o de modelagem. Neste método foram utilizadas técnicas matemáticas para descrever o processo de bombeamento do efluente por meio do software Microsoft Excel. Os resultados evidenciam que com a implementação do inversor de frequência na bomba centrífuga em estudo, aumentou o rendimento de trabalho da bomba e reduziu o consumo de energia em 467 MWh correspondente a uma redução no consumo energético inicial de aproximadamente 90%. Com a redução no consumo de energia o valor investido no projeto do inversor de frequência foi pago no período de 9 meses.

Palavras-chave: Bomba superdimensionada. Bomba centrífuga. Inversor de frequência. Controle de vazão. Danos mecânicos.

## ABSTRACT

LAGO, J. C. M. – **Economic technical feasibility study in the installation of a frequency inverter in the motor of a centrifugal pump.** 2019. 50 p. Monography (graduation work in chemical engineering) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

The implementation of a frequency inverter provides the ability to control the rotor speed of a pump and therefore its flow. At an effluent treatment plant located in the city of Paulinia, there is an oversized pump for your pumping circuit. It takes two shutoff valves almost fully closed to maintain the desired process flow however there is a large energy loss in this process and the pump suffers major mechanical damage due to the operating mode. This Project present a proposal to carry out a study of the economic and technical feasibility of installing a frequency inverter in the oversized pump motor. The method used to perform the analysis was the modeling. In this method, mathematical techniques were used to describe the effluent pumping process using Microsoft Excel software. The results show that the implementation of the frequency inverter in the centrifugal pump under study will increase the pump performance reducing mechanical damage and reduced energy consumption by 467 MWh corresponding to a reduction in initial energy consumption of approximately 90%. Energy consumption will be reduced so that the amount invested in the frequency inverter will already be paid within 9 months.

Keywords: Oversized pump. Centrifugal pump. Frequency inverter. Control flow rate. Mechanical damage.

## **Lista de Ilustrações**

Figura 1 - Conjunto Motor e bomba centrífuga .....	10
Figura 2 - Balanço de energia entre dois pontos do fluído.....	16
Figura 3 - Relação entre curva original da bomba e curva do sistema .....	18
Figura 4 - Fluxograma de processo da estação de tratamento de efluente .....	20
Figura 5 – Foto da placa da bomba .....	21
Figura 6 - visão lateral e superior com informações para construção da curva de sistema.....	29

## Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Curva Original da bomba.....	23
Gráfico 2 - Curva de potência original da bomba.....	25
Gráfico 3 - Curva de rendimento.....	26
Gráfico 4 – histograma vazão de efluente.....	27
Gráfico 5 – Curva do sistema.....	32
Gráfico 6 - Bomba centrifuga operando com 520 rpm e vazão de 106 m <sup>3</sup> /h.....	33
Gráfico 7 - Consumo energético com 520 rpm e vazão de 106 m <sup>3</sup> /h.....	34
Gráfico 8 - Bomba centrifuga operando com 570 rpm e vazão de 118 m <sup>3</sup> /h.....	35
Gráfico 9 - Consumo energético com 570 rpm e vazão de 118 m <sup>3</sup> /h.....	36
Gráfico 10 - Bomba centrifuga operando com 630 rpm e vazão de 127 m <sup>3</sup> /h.....	37
Gráfico 11 - Consumo energético com 630 rpm e vazão de 127 m <sup>3</sup> /h.....	38
Gráfico 12 - Bomba centrifuga operando com 660 rpm e vazão de 135 m <sup>3</sup> /h.....	39
Gráfico 13 - Consumo energético com 660 rpm e vazão de 135 m <sup>3</sup> /h.....	40
Gráfico 14 - Bomba centrifuga operando com 700 rpm e vazão de 144 m <sup>3</sup> /h.....	41
Gráfico 15 - Consumo energético com 700 rpm e vazão de 144 m <sup>3</sup> /h.....	42
Gráfico 16 - Bomba centrifuga operando com 750 rpm e vazão de 154 m <sup>3</sup> /h.....	43
Gráfico 17 - Consumo energético com 750 rpm e vazão de 154 m <sup>3</sup> /h.....	44
Gráfico 18 - Bomba centrifuga operando com 800 rpm e vazão de 164 m <sup>3</sup> /h.....	45
Gráfico 19 - Consumo energético com 800 rpm e vazão de 164 m <sup>3</sup> /h.....	46
Gráfico 20 - Bomba centrifuga operando com 870 rpm e vazão de 175 m <sup>3</sup> /h.....	47
Gráfico 21 - Consumo energético com 870 rpm e vazão de 175 m <sup>3</sup> /h.....	48
Gráfico 22 - Bomba centrifuga operando com 910 rpm e vazão de 184 m <sup>3</sup> /h.....	49
Gráfico 23 - Consumo energético com 910 rpm e vazão de 184 m <sup>3</sup> /h.....	50

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Dados correspondentes de pressão da curva original da bomba.....	22
Tabela 2 - Dados correspondentes de potência da curva original da bomba.....	24
Tabela 3 - rendimento da bomba original.....	25
Tabela 4 - Resultado do filtro do histórico de vazão.....	27
Tabela 5 - Nível médio do primeiro tanque de equalização.....	28
Tabela 6 - Nível médio do segundo tanque de equalização.....	28
Tabela 7 – Coeficiente de perda de carga localizada na sucção e recalque.....	30
Tabela 8 – coeficiente de rugosidade para cálculo da perda de carga continua...	30
Tabela 9 – Resultado altura manométrica.....	31
Tabela 10 – Análise econômica com vazão de 106 m <sup>3</sup> /h.....	51
Tabela 11 – Análise econômica com vazão de 118 m <sup>3</sup> /h.....	51
Tabela 12 – Análise econômica com vazão de 127 m <sup>3</sup> /h.....	52
Tabela 13 – Análise econômica com vazão de 135 m <sup>3</sup> /h.....	52
Tabela 14 – Análise econômica com vazão de 144 m <sup>3</sup> /h.....	53
Tabela 15 – Análise econômica com vazão de 154 m <sup>3</sup> /h.....	53
Tabela 16 – Análise econômica com vazão de 164 m <sup>3</sup> /h.....	54
Tabela 17 – Análise econômica com vazão de 175 m <sup>3</sup> /h.....	54
Tabela 18 – Análise econômica com vazão de 184 m <sup>3</sup> /h.....	55
Tabela 19 – Análise econômica ponderada.....	56
Tabela 20 – Resultado final Análise econômica.....	56

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	10
1.1	Objetivo geral.....	11
1.2	Objetivos específicos.....	11
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	12
2.1	Bombas de fluxo.....	12
2.2	Bomba centrifuga.....	12
2.3	Bombas de rotação variável.....	13
2.4	Teorema de Bernoulli e curva de sistema.....	15
<b>3</b>	<b>MÉTODOS.....</b>	19
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	20
4.1	Resultados.....	20
4.2	Dicussão.....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	58
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	59

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria química, o processo de bombeamento de fluído está presente em praticamente todas as plantas químicas que operam por 24 horas diárias. Devido ao elevado tempo de operação, o motor de uma bomba elétrica tem um alto consumo de energia elétrica, podendo ser o maior gasto operacional dependendo da potência do motor.

A vazão de operação no processo de bombeamento de efluente orgânico em uma estação de tratamento de efluente na cidade de Paulínia é controlada através de válvulas de bloqueio na descarga da bomba. Contudo neste cenário existe uma grande perda energética neste processo quando uma bomba está superdimensionada, por meio da instalação de um inversor de frequência, é possível atingir a vazão de operação com a abertura total das válvulas de bloqueio e a alteração na rotação do rotor da bomba para patamares menores dos originais. Com essa mudança no processo de bombeamento, a perda de carga que era gerada pela válvula parcialmente fechada, não será mais exigida pelo sistema, com isso o consumo de energia elétrica diário será menor tendo uma grande redução de custo operacional. Essa bomba centrífuga também possui um histórico de manutenção devido aos grandes danos mecânicos durante seu período de operação.

A Figura 1 exemplifica um conjunto de motor e bomba centrífuga em operação.

Figura 1 - Conjunto Motor e bomba centrífuga



Fonte: (BIRCK, 2015)

## **1.1 Objetivo Geral**

Realizar um estudo da viabilidade técnico-econômica na implementação de um inversor de frequência em uma bomba centrifuga na estação de tratamento de efluentes em Paulínia/SP.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Investigar se irá proporcionar uma redução no consumo de energia elétrica significativa.
- Realizar uma avaliação econômica do custo operacional antes e depois com a implementação do inversor de frequência.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Bombas de fluxo

A bomba de fluxo é uma máquina denominada geradora de energia, no qual o líquido escoa continuamente. A energia mecânica fornecida no eixo da bomba por um motor elétrico é transformada em energia cinética e posteriormente parte dessa energia é convertida em energia de pressão. Esse transporte de energia ocorre por meio do rotor da bomba, em consequência da sua rotação através de suas pás ele converte a energia cinética em energia de pressão (VIANA, 2012).

### 2.2 Bomba centrifuga

Bombas centrifugas são as mais utilizadas nas indústrias químicas para transporte de líquidos, elas são utilizadas em processos como alimentação na caldeira, condensador, retorno de condensado entre outros processos. Elas podem ser dos mais variados tamanhos com capacidades de 2 a 3 gal./min até 100000 gal./min. Estas bombas apresentam muitas vantagens como o baixo custo, vazão uniforme, ocupam um pequeno espaço, manutenção barata, baixa emissão de ruído além da possibilidade de usar motor elétrico ou a turbina (GREEN; SOUTHARD, 2018).

## 2.3 Bombas de rotação variável

Bombas de rotação variável são bombas com um inversor de frequência instalado no seu motor. O inversor de frequência fornece a capacidade de regular a rotação no eixo do motor para patamares maiores ou menores dos originais. Esta alteração fornece a possibilidade da bomba se adequar de forma mais eficiente às condições exigidas pelo sistema gerando um ganho energético por operar em pressões próximas das mínimas necessárias. Também fornece a possibilidade de um melhor controle em uma situação de anormalidade, como rompimento da tubulação ou situação de incêndio (GREEN; SOUTHARD, 2018).

A operação da bomba em rotações diferentes das originais alteram suas curvas características e consequentemente seu desempenho. Estas alterações podem ser quantificadas por meio das equações de relação de semelhança. Porém estas equações partem da premissa que a eficiência da bomba se mantém constante, ou seja, todas as características adimensionais da bomba se mantêm constante (COUTINHO; SOARES, 2019). As equações 1,2 e 3 representam as relações de semelhança na qual somente a rotação é alterada:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (3)$$

No qual:

Q: vazão da bomba ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

H: altura manométrica da bomba (m);

P: Potência da bomba (CV);

N: velocidade de rotação da bomba (rpm);

1 e 2: duas velocidades distintas de rotação;

Para se determinar o novo rendimento com a alteração da rotação, Sârbu e Borza (2013) desenvolveram a equação 4 na qual oferece uma boa proximidade do rendimento real de uma bomba para quando a rotação é reduzida até 70% da sua rotação nominal (SIMPSON & MARCHI, 2013).

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^{0.1} \quad (4)$$

No qual:

$\eta$ : eficiência;

N: velocidade de rotação da bomba (rpm);

Para maior proximidade na eficiência em vazões com rotação menores que 70% da nominal, no qual a equação 4 não consegue prever com muita exatidão o novo rendimento, Costa, Castro e Costa (2018) desenvolveram a equação 5 com maior proximidade que a equação de Sârbu e Borza (2013) por meio de 150 testes experimentais.

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^{0.002Qo} \quad (5)$$

No qual:

$\eta$ : eficiência;

N: velocidade de rotação da bomba (rpm);

Qo: vazão na nova rotação;

A potência de uma bomba é determinada pela taxa de consumo de energia para se transportar um determinado volume de líquido. Em virtude das perdas de carga por meio de naturezas construtiva e fluidodinâmica das bombas, a potência fornecida do motor para o eixo da bomba, denominada como potência do eixo, tem um determinado rendimento. O rendimento para cálculo da potência em bombas centrífugas é derivado do rendimento da bomba ou rendimento mecânico (CREMASCO, 2018). Através da equação 6 é possível calcular a potência do eixo da bomba em função do rendimento da bomba.

$$P = \frac{\gamma Q H_{\text{man}}}{75nb} \quad (6)$$

No qual:

P: potência do motor (CV);

$\gamma$ : peso específico do líquido (kgf/cm<sup>2</sup>);

Q: vazão (m<sup>3</sup>/s);

H<sub>man</sub>: Altura manométrica (m);

nb: Rendimento da bomba;

## 2.4 Teorema de Bernoulli e curva de sistema

O teorema de Bernoulli é uma equação na qual expressa à lei de conservação de energia para o fluxo de fluidos em uma determinada tubulação. Por meio da equação 7 é possível calcular a energia em um determinado ponto da tubulação (Crane, 2018).

$$Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H \quad (7)$$

No qual:

Z: altura (m);

P: pressão (Pa);

$\rho$ : densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>);

g: gravidade (m/s<sup>2</sup>);

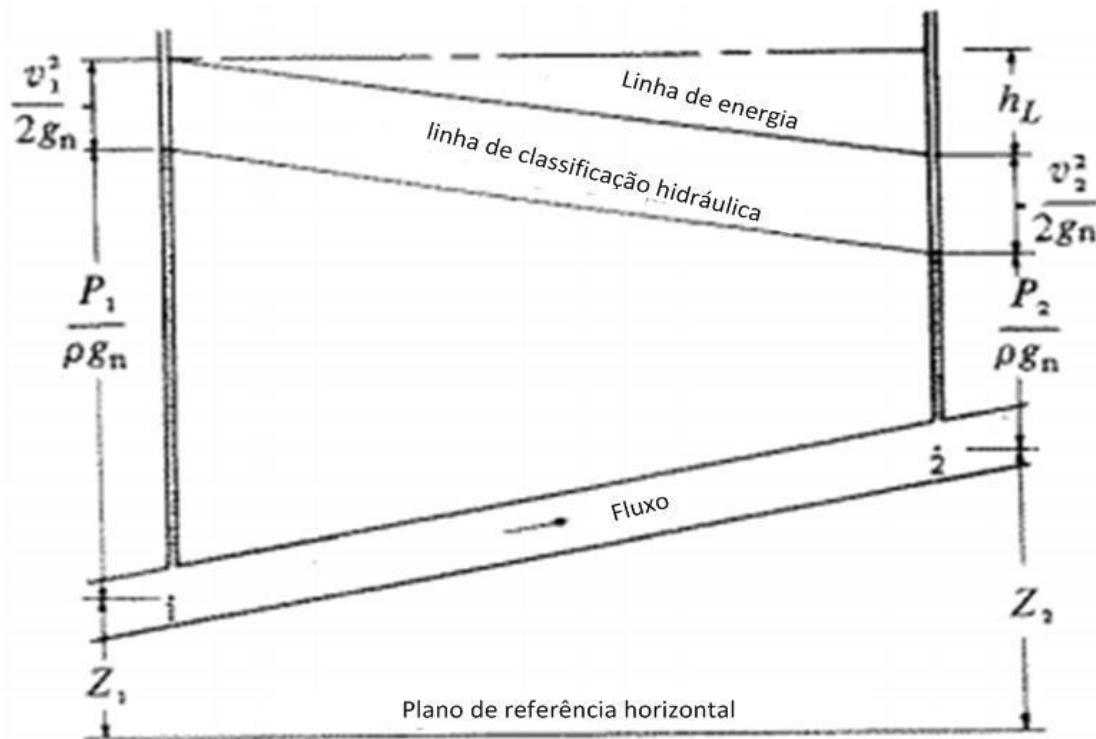
v: velocidade de escoamento do fluido (m/s);

H: pressão no ponto da tubulação (m);

Por meio da equação 7 é possível realizar o balanço energético representado na figura 2 entre dois pontos do fluxo do fluido. No qual parte da energia será perdida devido a perda de carga que é representada na equação 8 como  $hL$ .

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v^2_1}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v^2_2}{2g} + hL \quad (8)$$

Figura 2 - Balanço de energia entre dois pontos do fluído



Fonte: Adaptado de Crane (2018)

A perda de carga em um sistema de bombeamento é resultante de fatores como rugosidade da tubulação, o diâmetro da tubulação, a densidade do fluido, viscosidade do fluido, trocas de direção, encontro com a descarga de outro fluido, obstruções ao longo do processo de bombeamento como válvulas,

filtros, medidores e outros tipos de acessórios. Todos estes fatores vão gerar um coeficiente de resistência  $K$  que será diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de escoamento para cálculo da perda de carga no processo de bombeamento conforme a equação 9 (Crane, 2018).

$$hL = K \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

Para o cálculo da perda de carga dinâmica ao longo do escoamento, esse fator  $K$  será em função da razão da largura e diâmetro da tubulação. Multiplicado pelo fator de Darcy conforme a equação 10 (ASKER; COBAN; TURGUT, 2014).

$$K = f \frac{L}{D} \quad (10)$$

Para o cálculo do fator de Darcy, se tem a correlação de Churchill nas equações 12,13 e 14, que é válida para todos os valores de Reynolds calculado pela equação 11 independente do tipo de escoamento (ASKER; COBAN; TURGUT, 2014).

$$Re = \frac{VD}{\gamma} \quad (11)$$

$$A = \left[ 0.8687 \ln \left( \frac{1}{\frac{0.883(\ln Re)^{1.282}}{Re^{1.007}} + 0.27 \frac{\epsilon}{D} + \frac{110\epsilon}{ReD}} \right) \right]^{16} \quad (12)$$

$$B = \left( \frac{13269}{Re} \right)^{16} \quad (13)$$

$$f = \left[ \left( \frac{64}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-3/2} \right] \quad (14)$$

No qual:

$V$ : velocidade de escoamento do fluído;

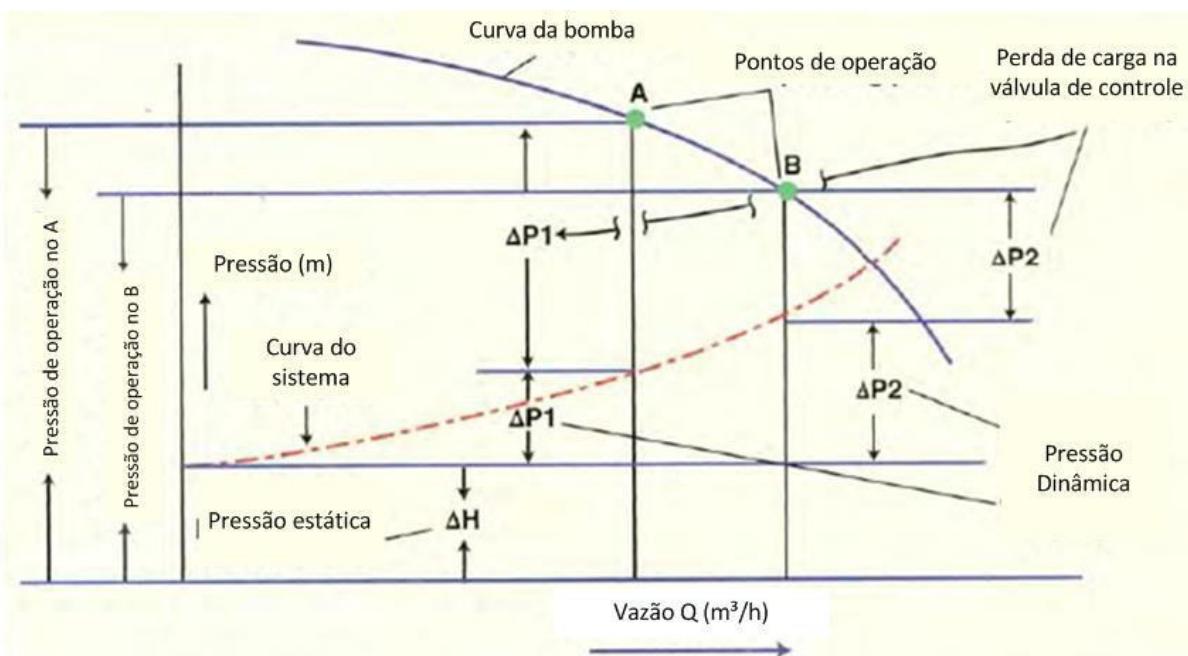
$D$ : Diametro da tubulação;

$\gamma$ : Viscosidade cinemática;

$\epsilon$ : Rugosidade da tubulação;

Com isso é possível desenvolver a curva do sistema do processo de bombeamento de um fluido, que é a pressão necessária (energia fornecida pela bomba) para deslocar um determinado fluido em uma vazão específica. O cruzamento da curva de sistema com a curva da bomba fornecida pelo fabricante é possível identificar a vazão que a bomba irá fornecer naquele processo. É recomendado que a bomba opere em um desvio de 30% do seu ponto de eficiência máxima para diminuir o desgaste mecânico no processo de bombeamento como representado na figura 3 (RAZA, 2013).

Figura 3 - Relação entre curva original da bomba e curva do sistema



Fonte: Adaptado de RAZA (2013)

### 3 MÉTODOS

Para desenvolvimento deste projeto, foi utilizado o método de pesquisa de modelagem, no qual foram empregadas técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou parte de um sistema produtivo.

Em uma estação de tratamento de efluentes na cidade de Paulínia, onde foi realizado o levantamento para a modelagem do problema, existe uma bomba superdimensionada. No processo de bombeamento do efluente orgânico do tanque de equalização até a Calha Parshall, existem duas válvulas quase que totalmente fechadas para se manter a vazão desejada de processo, ou seja, existe uma grande perda energética neste processo.

Neste cenário foi desenvolvida no software Microsoft Excel a curva de sistema do processo de bombeamento deste efluente orgânico, com as válvulas totalmente aberta, no qual foi possível analisar qual a rotação ideal da bomba instalada no local. Para isso foi utilizado à curva original da bomba fornecida pelo fabricante em uma determinada rotação e por meio das relações de semelhança corrigida pela equação de Sárbu foi ajustada a rotação ideal com a curva de sistema.

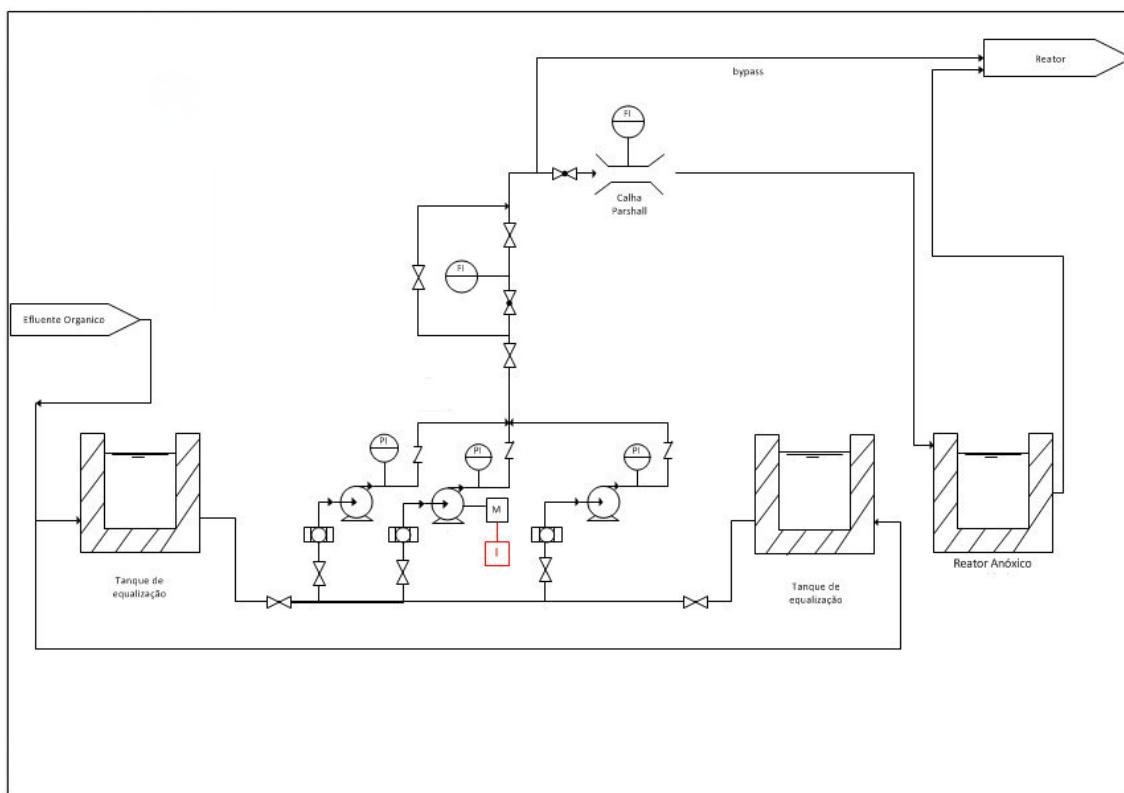
Também foi realizado um fluxograma de processo para melhor entendimento do processo, coleta de dados da vazão típica de processo no período de 1 ano na estação de tratamento de efluente por meio de um histórico de dados, histórico do nível do tanque de equalização com dados coletados no período de 1 ano, análise do risco da instalação de um inversor de frequência nos danos mecânicos a bomba e foi feita uma análise do ganho econômico com cálculo do retorno financeiro do projeto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados

Para maior detalhamento do projeto, foi desenvolvido um fluxograma de processo do sistema de bombeamento de efluente orgânico da estação de tratamento de efluente representado na figura 4, no qual está especificado em vermelho onde será instalado o inversor.

Figura 4- Fluxograma de processo da estação de tratamento de efluente



Fonte: Autoria própria

Para análise do comportamento das bombas centrifugas em rotações menores com o uso do inversor de frequência, foi desenvolvida a curva original da bomba que é da marca IMBIL, Diâmetro do rotor 410 mm, 1750 rpm, modelo INI 125-400 no software Microsoft Excel Worksheet. A indicação dessas informações foi obtida na própria bomba com sua placa de identificação representada na figura 5 e nos catálogos da empresa IMBIL. A tabela 1 representa informações da altura manométrica e o gráfico 1 a representação dos dados conforme os dados do fabricante.

Figura 5 – Foto da placa da bomba



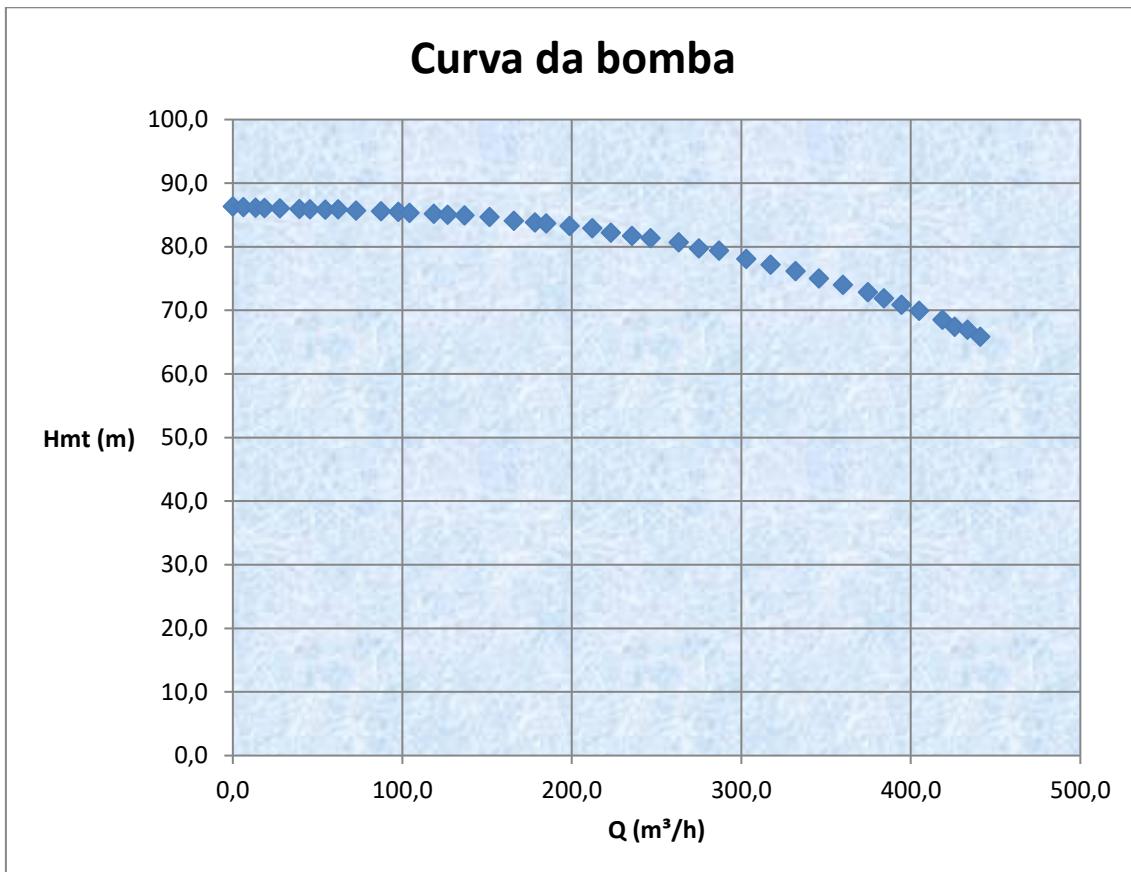
Fonte: Autoria Própria

Tabela 1 - Dados correspondentes de altura manométrica da curva original da bomba

Bomba modelo INI 125-400	
D (mm) =	410
RPM =	1750
Q(m <sup>3</sup> /h)	Hmt (m)
0,0	86,3
6,2	86,2
13,4	86,1
18,6	86,1
27,7	86,0
39,2	85,9
45,4	85,9
54,5	85,8
62,1	85,9
72,6	85,7
87,5	85,6
97,5	85,5
104,2	85,3
118,5	85,2
126,6	85,0
136,7	84,9
151,5	84,7
165,8	84,1
178,2	83,8
184,8	83,6
198,7	83,3
212,0	82,9
223,0	82,2
235,3	81,7
246,3	81,4
263,0	80,7
274,8	79,7
286,8	79,4
302,9	78,1
317,2	77,2
331,9	76,2
345,6	75,0
359,9	74,0
374,6	72,9
384,1	71,9
394,5	70,9
404,9	69,9
418,6	68,5
425,7	67,4
433,3	67,0
440,9	65,9

Fonte: Autoria própria

Gráfico 1 – Curva Original da bomba



Fonte: Autoria própria

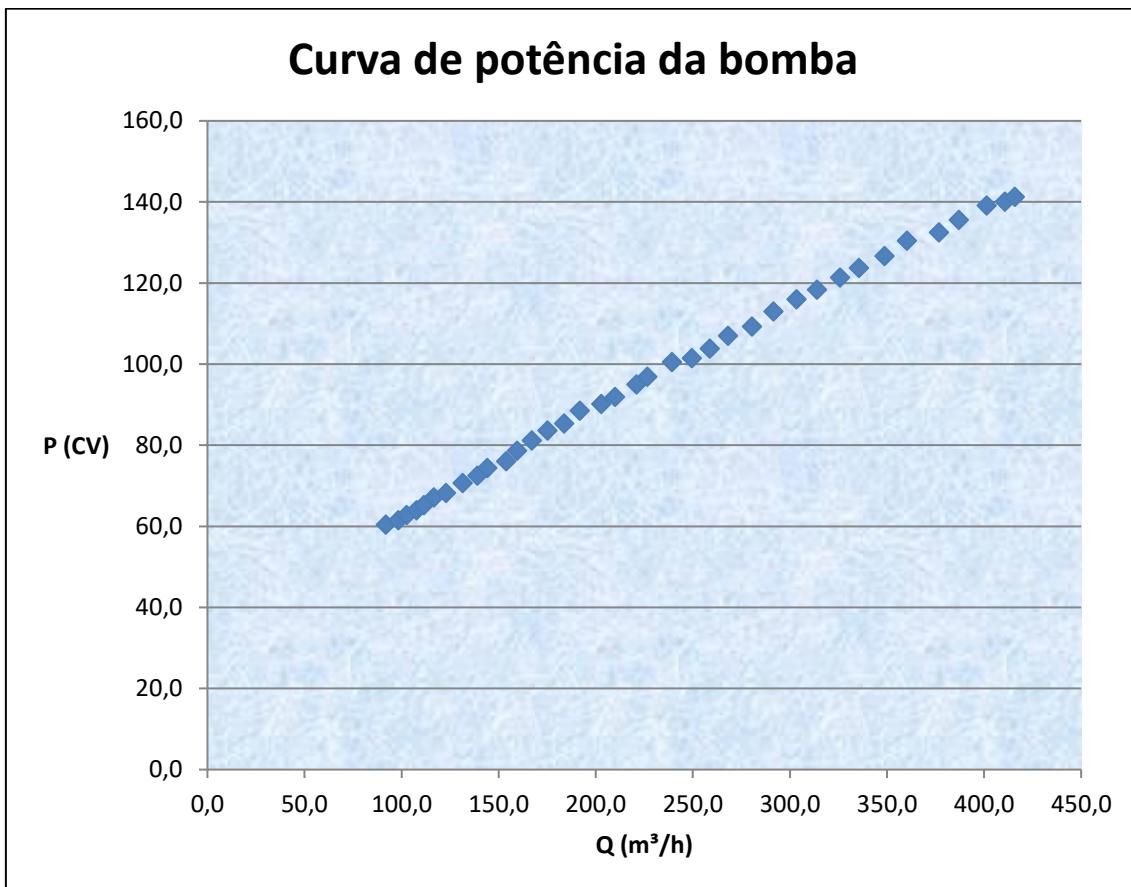
No catálogo da IMBIL também foram fornecidas a potência consumida no eixo da bomba e o rendimento da bomba representadas nas tabelas 2 e 3 e nos gráficos 2 e 3.

Tabela 2 - Dados correspondentes de potência da curva original da bomba

Bomba modelo INI 125-400	
D (mm) =	410
RPM =	1750
Q (m <sup>3</sup> /h)	P (CV)
91,9	60,4
98,2	61,5
102,5	62,7
107,6	63,9
111,4	65,2
116,5	67,1
122,9	68,2
131,4	70,6
139,0	72,4
144,1	74,3
153,9	76,0
159,4	78,6
167,0	81,1
175,1	83,6
183,6	85,3
191,7	88,5
202,7	90,1
209,9	91,9
221,0	94,9
226,5	96,8
239,2	100,5
249,4	101,4
258,7	103,8
268,1	107,0
280,4	109,2
291,4	113,0
303,3	116,0
313,9	118,3
325,8	121,3
335,6	123,7
348,7	126,6
360,2	130,4
376,7	132,4
386,9	135,5
401,3	139,1
410,6	140,1
415,7	141,2

Fonte: Autoria própria

Gráfico 2 - Curva de potência original da bomba



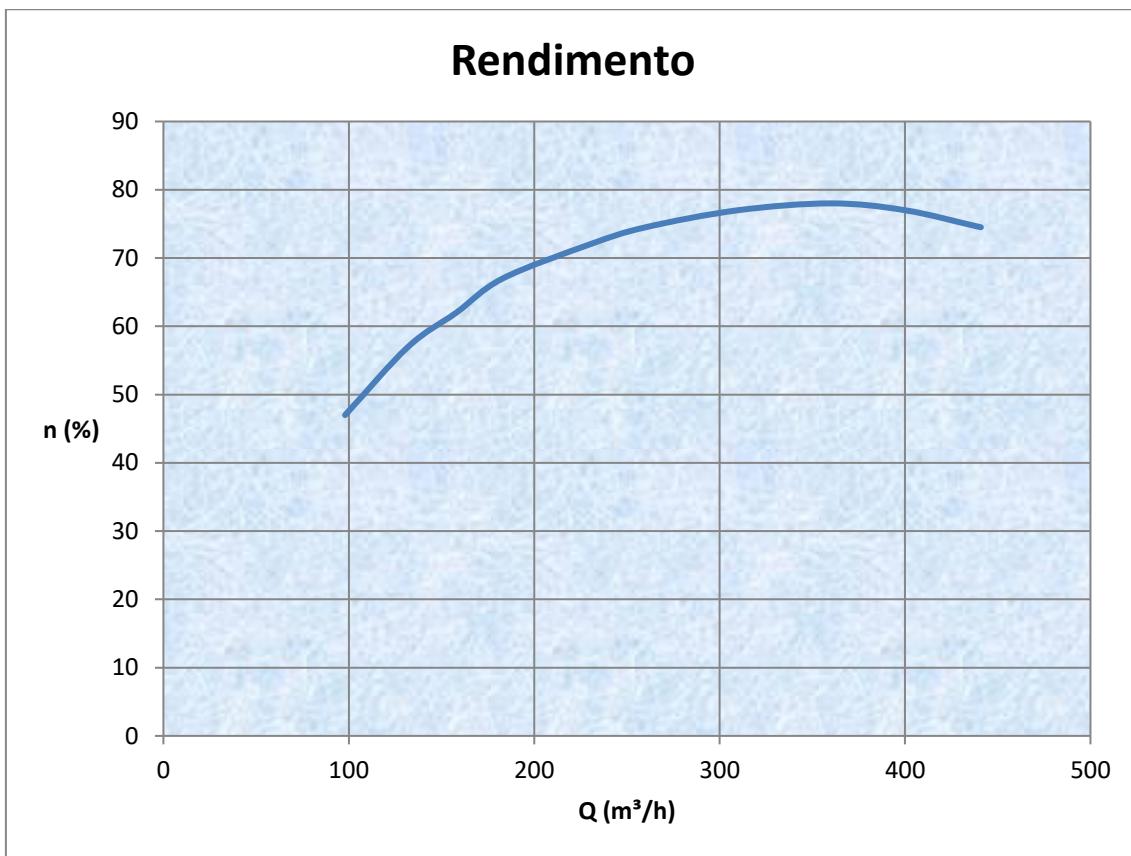
Fonte: Autoria própria

Tabela 3 - rendimento da bomba original

Q (m³/h)	n (%)
98	47
132	57
158	62
183	67
230	72
260	74,5
310	77
360	78
400	77
460	74,5

Fonte: Autoria própria

Gráfico 3 - Curva de rendimento



Fonte: Autoria própria

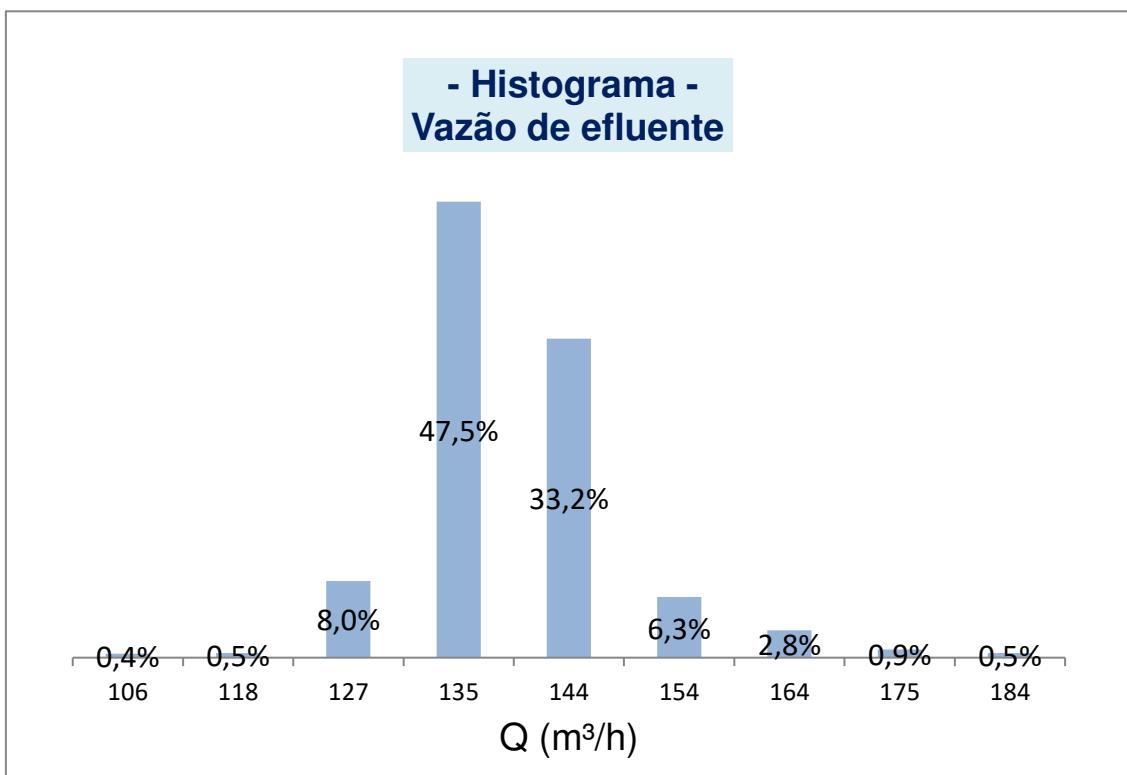
Para determinar a vazão de operação das bombas centrifugas, foi realizado um levantamento do histórico da vazão de operação representado na tabela 4 e gráfico 4. Por meio do histórico de vazão entre maio de 2018 e maio de 2019, com dados coletados de 30 em 30 minutos. Por meio dessa base de dados foi realizado um filtro no software Microsoft Excel destes dados em intervalos de 10 m<sup>3</sup>/h. Estes dados foram coletados por um medidor magnético presente na descarga das bombas centrifugas. Foram obtidos os seguintes resultados a partir desta análise:

Tabela 4 - Resultado de dados filtrados do histórico de vazão entre maio de 2018 e maio 2019

Resultado análise de vazão	
Q média (m <sup>3</sup> /h)	Porcentual do tempo de operação (%)
106	0,4
118	0,5
127	8,0
135	47,5
144	33,2
154	6,3
164	2,8
175	0,9
184	0,5
<b>média ponderada Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>140</b>

Fonte: Autoria própria

Gráfico 4 – histograma vazão de efluente



Fonte: Autoria própria

Para se determinar o Nível dos tanques de equalização no qual o efluente orgânico é succionado pelas bombas centrifugas, também foi realizado um levantamento do histórico do nível do tanque entre maio de 2018 e maio de 2019. Os resultados desta análise dos dados filtrados estão representados em intervalos de 0,5 m na tabela 5 e 6. Um dos tanques teve nível constante pois não estava em operação.

Tabela 5 - Nível médio do primeiro tanque de equalização

<b>Resultado análise de nível</b>	
Nível (m)	Porcentual do tempo de operação
1,28	1,3%
1,83	7,7%
2,30	24,8%
2,77	35,1%
3,24	31,1%
Média ponderada Nível (m)	2,70

Fonte: Autoria própria

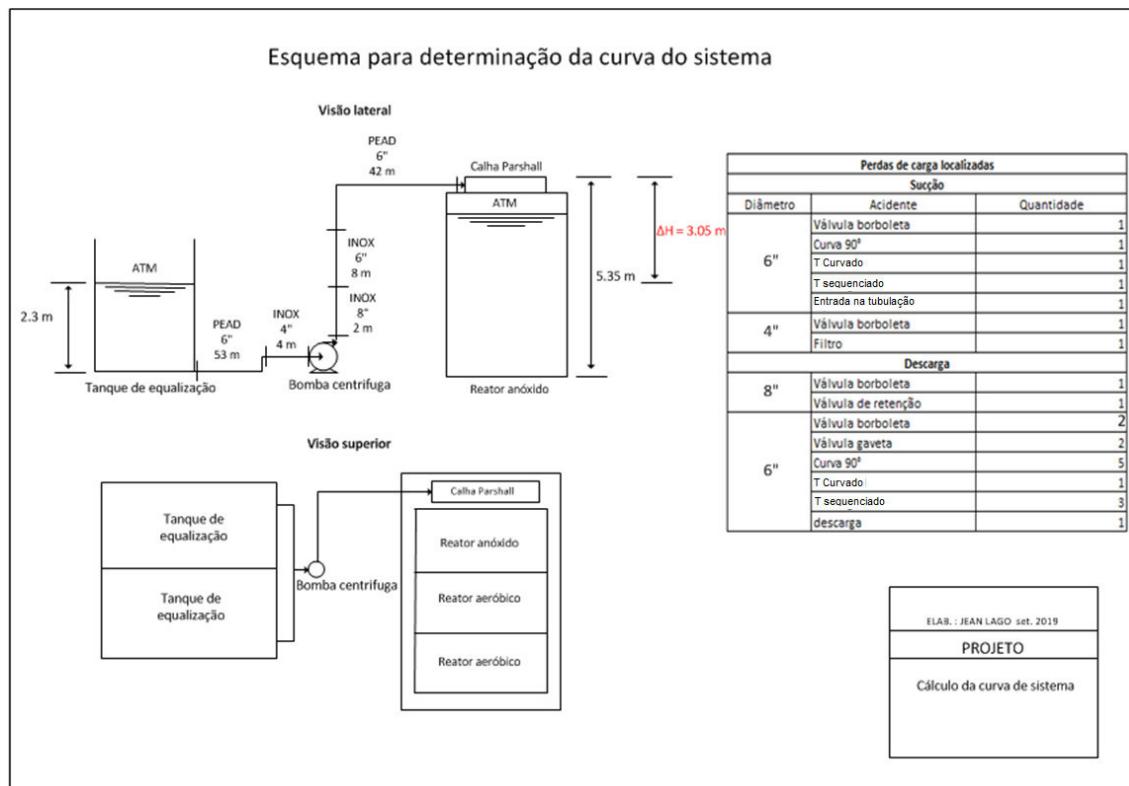
Tabela 6 - Nível médio do segundo tanque de equalização

<b>Resultado análise de nível</b>	
Nível (m)	Porcentual do tempo de operação
3.446	100%

Fonte: Autoria própria

Partindo das premissas que o efluente orgânico tem viscosidade e densidade igual ao da água e o nível do tanque trabalha com 2,30 m. Este valor de nível representa as condições mais extremas em 90% do tempo do processo de bombeamento do efluente orgânico, maior pressão necessária para se bombear o efluente. Com isso, foi desenvolvida a curva de sistema da instalação com as válvulas abertas, modo de operação com o inversor de frequência a ser instalado. A representação das informações necessárias para construção da curva do sistema está representada na figura 6.

Figura 6 - visão lateral e superior com informações para construção da curva de sistema



Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na figura 6, para se determinar a perda de carga localizada e continua no circuito foram retirados os coeficientes de perda de carga segundo Crane (2018) e de manuais dos fabricantes de alguns equipamentos como no caso do filtro cesto. Estes valores estão representados na tabela 7 e 8.

Tabela 7 – Coeficiente de perda de carga localizada na sucção e recalque

Perdas de carga localizadas					
Cicuito	Acidente	Quantidade	K Crane	total	
Sucção (6")	Válvula borboleta	1	0,675	0,675	
	Curva 90°	1	0,45	0,45	
	T curvado	1	0,9	0,9	
	T sequenciado	1	0,3	0,3	
Sucção (4")	Válvula borboleta	1	0,765	0,765	
	Filtro cesto	1	1,06	1,06	
Recalque (8")	Válvula de retenção	1	0,85	0,85	
	Válvula borboleta	2	0,675	1,35	
	Válvula gaveta	2	0,12	0,24	
	Curva 90°	5	0,45	2,25	
	T curvado	1	0,9	0,9	
	T sequenciado	3	0,3	0,9	

Fonte: Crane (2018).

Tabela 8 – coeficiente de rugosidade para cálculo da perda de carga continua

Perdas de carga continua	
Rugosidade PEAD (mm)	0,06
Rugosidade Inox (mm)	0,02

Fonte: Crane (2018).

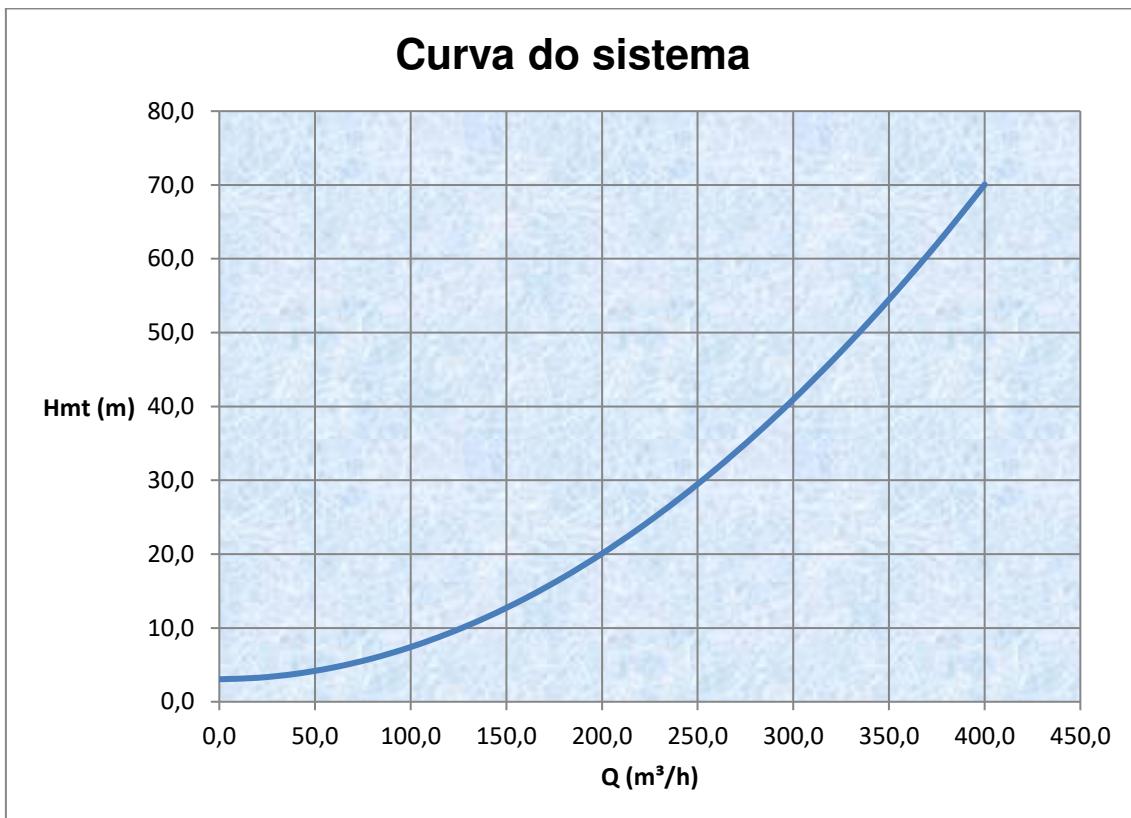
Por meio do conjunto de informação e as correlações de Churchill, equações 9,10,11,12,13 e 14 (página 18) foi construída a curva do sistema do processo de bombeamento do tanque de equalização até a Calha Parshall representada na tabela 9 e gráfico 5.

Tabela 9 – Resultado altura manométrica

<b>Altura manométrica</b>				
<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q (L/s)</b>	<b>Perda de cargas totais (m)</b>	<b>Altura geométrica (m)</b>	<b>Altura manométrica</b>
0,0	0,0	0,0	3,1	3,1
20,0	5,6	0,2	3,1	3,2
40,0	11,1	0,7	3,1	3,8
60,0	16,7	1,6	3,1	4,7
80,0	22,2	2,8	3,1	5,9
100,0	27,8	4,4	3,1	7,4
120,0	33,3	6,2	3,1	9,3
140,0	38,9	8,4	3,1	11,5
160,0	44,4	11,0	3,1	14,0
180,0	50,0	13,8	3,1	16,9
200,0	55,6	17,0	3,1	20,1
220,0	61,1	20,5	3,1	23,6
240,0	66,7	24,4	3,1	27,4
260,0	72,2	28,6	3,1	31,6
280,0	77,8	33,1	3,1	36,1
300,0	83,3	37,9	3,1	41,0
320,0	88,9	43,1	3,1	46,1
340,0	94,4	48,6	3,1	51,6
360,0	100,0	54,4	3,1	57,4
380,0	105,6	60,5	3,1	63,6
400,0	111,1	67,0	3,1	70,1

Fonte: Autoria própria

Gráfico 5 – Curva do sistema do processo de bombeamento do tanque de equalização até a Calha Parshall

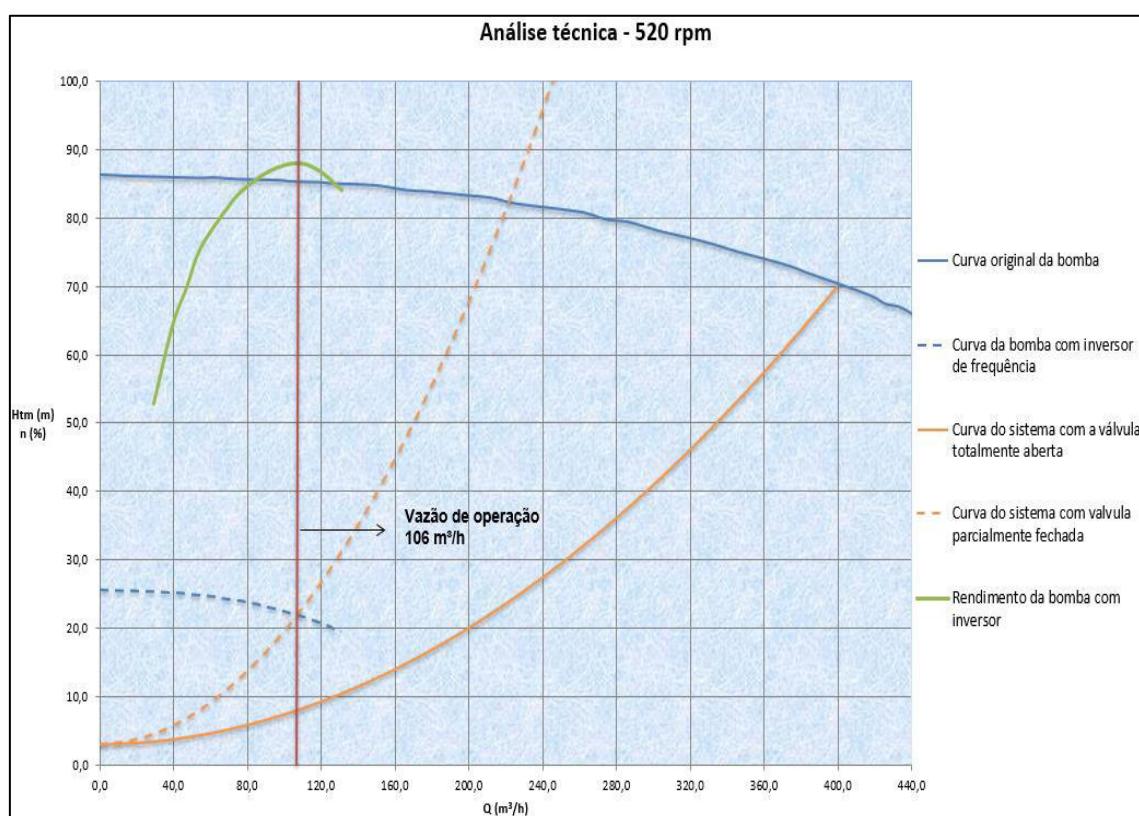


Fonte: Autoria própria

Com a curva do sistema e a curva original da bomba, foi feito uma análise técnica e energética em diferentes rotações calculadas pelas equações de relações de semelhança (equação 1,2,3 e 4). Essas equações foram utilizadas para determinar a rotação necessária para se atingir as vazões do processo de acordo com o histórico de operação (tabela 4 na página 28) com a válvula totalmente aberta ou parcialmente fechada. Porque se a bomba trabalhar na sua vazão máxima, existe o risco de causar danos mecânicos na bomba ao longo do seu tempo de operação, para mitigar esse risco é recomendável operar a bomba o mais próximo possível do seu ponto de rendimento máximo.

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 520 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $106 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 3,8 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Devido a esta restrição a bomba vai trabalhar na vazão desejada do processo economizando energia e no seu rendimento máximo minimizando quaisquer danos mecânicos conforme representado no gráfico 6.

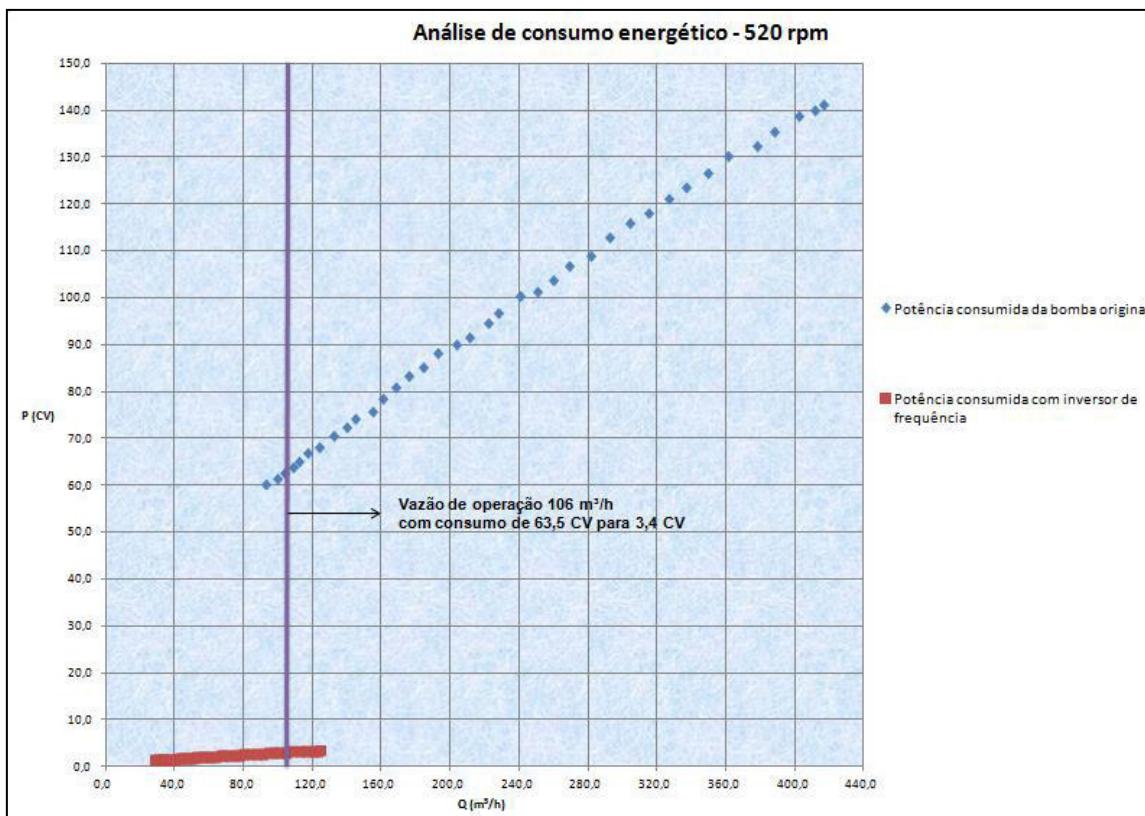
Gráfico 6 - Bomba centrífuga operando com 520 rpm e vazão de  $106 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 520 rpm e na vazão de 106 m<sup>3</sup>/h o consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 63,5 CV para 3,4 CV conforme representado no gráfico 7.

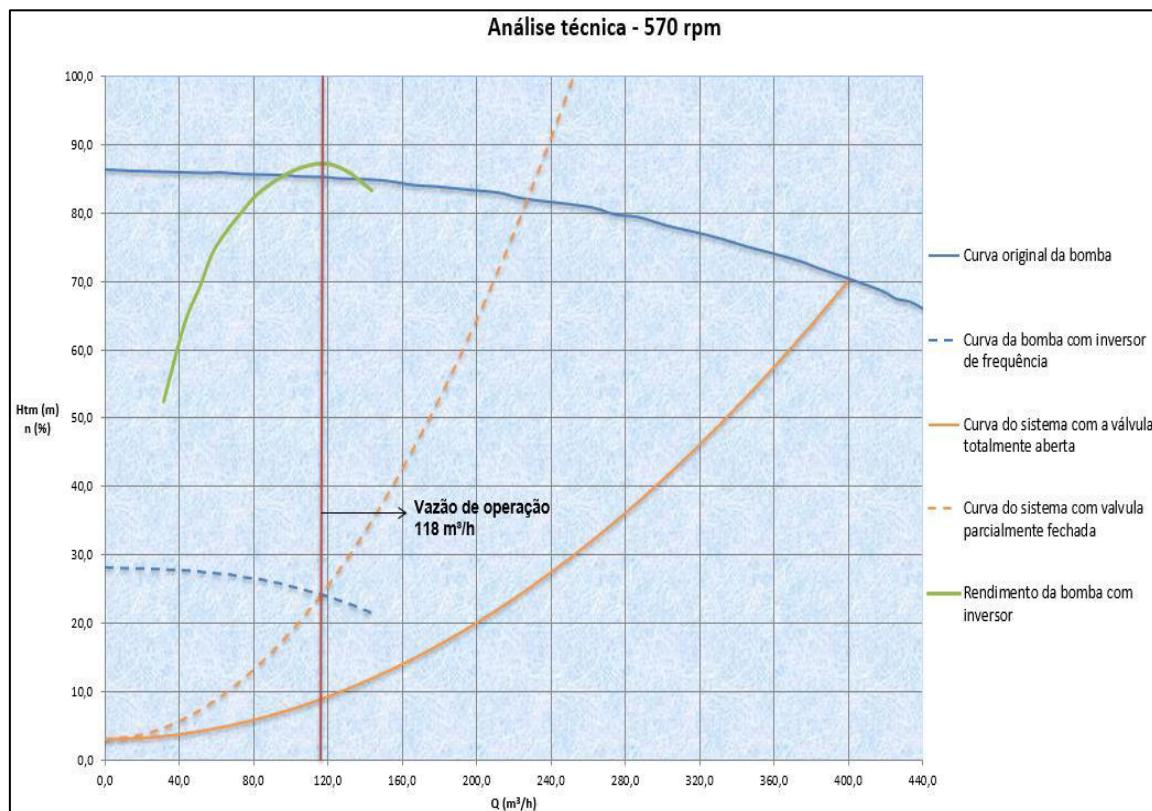
Gráfico 7 - Consumo energético com 520 rpm e vazão de 106 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 570 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $118 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 3,6 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Atingindo a vazão desejada no rendimento máximo conforme representado no gráfico 8.

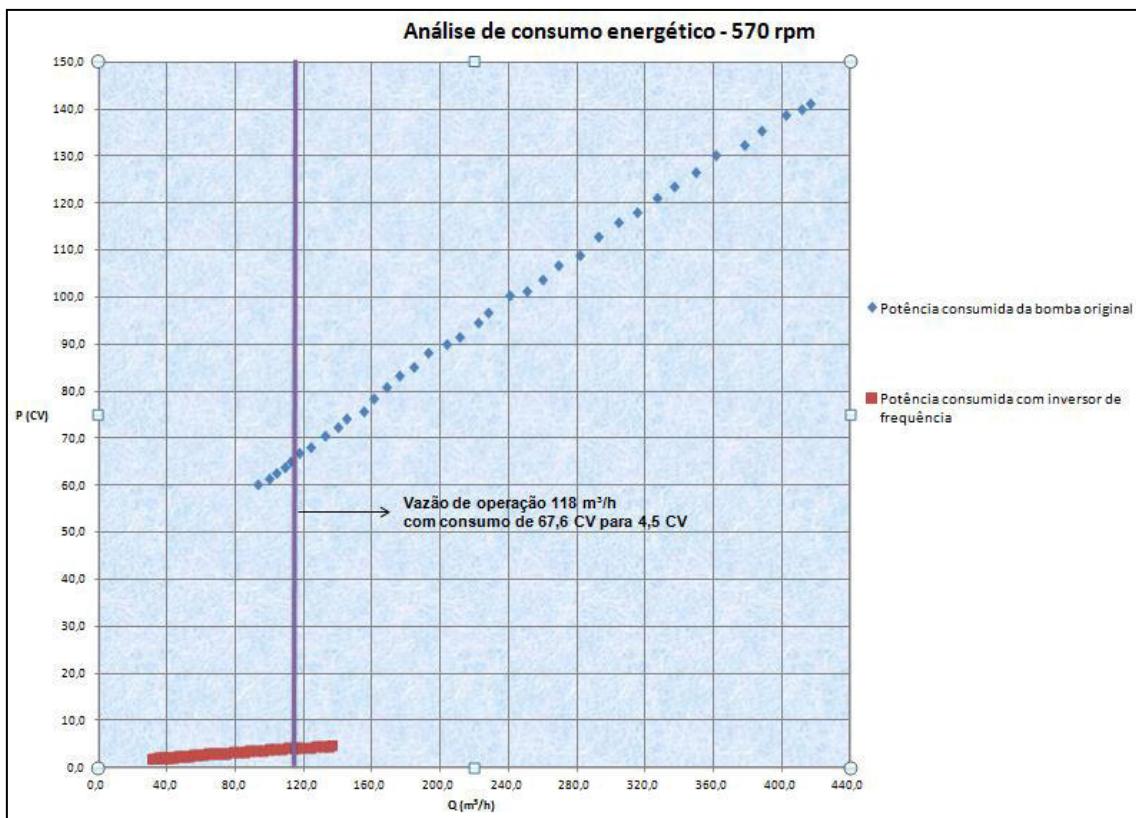
Gráfico 8 - Bomba centrífuga operando com 570 rpm e vazão de  $118 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 570 rpm e na vazão de 118 m<sup>3</sup>/h. O consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 67,6 CV para 4,5 CV conforme representado no gráfico 9.

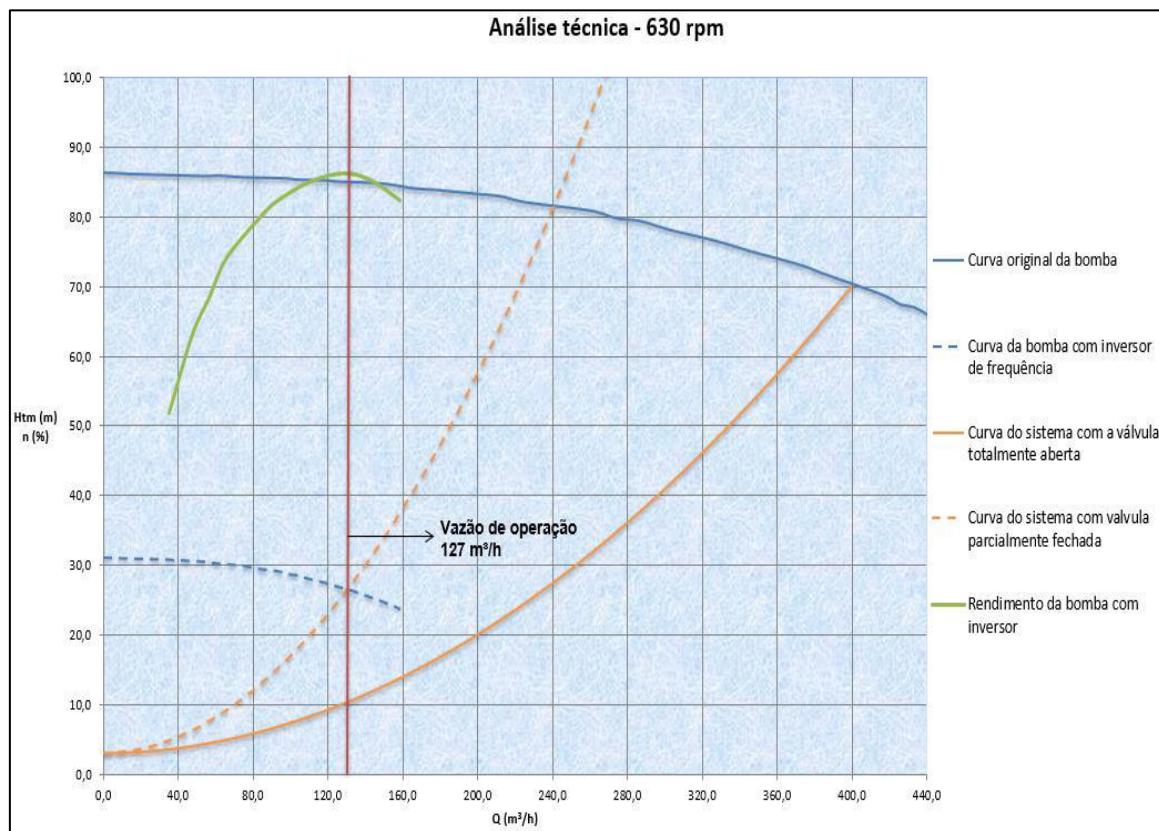
Gráfico 9 - Consumo energético com 570 rpm e vazão de 118 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 630 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $127 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 3,2 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Atingindo a vazão desejada no rendimento máximo conforme representado no gráfico 10.

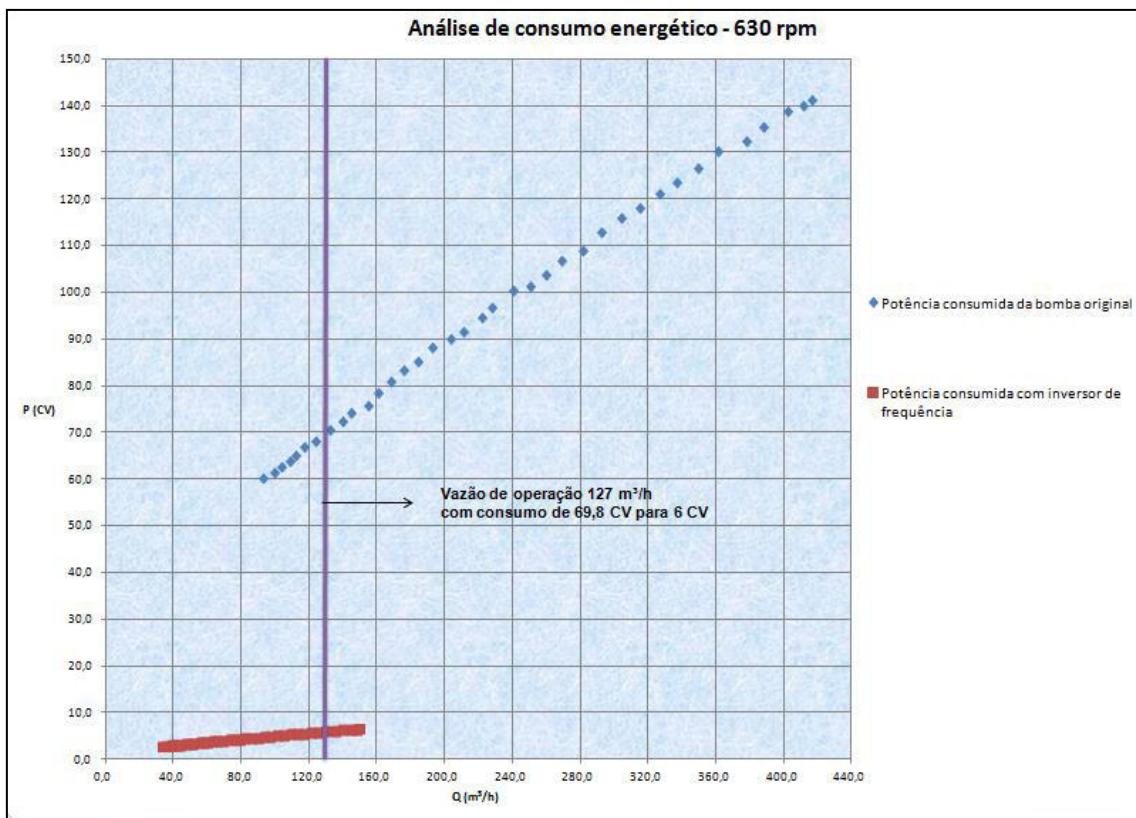
Gráfico 10 - Bomba centrífuga operando com 630 rpm e vazão de  $127 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 630 rpm e na vazão de 127 m<sup>3</sup>/h. O consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 69,8 CV para 6 CV conforme representado no gráfico 11.

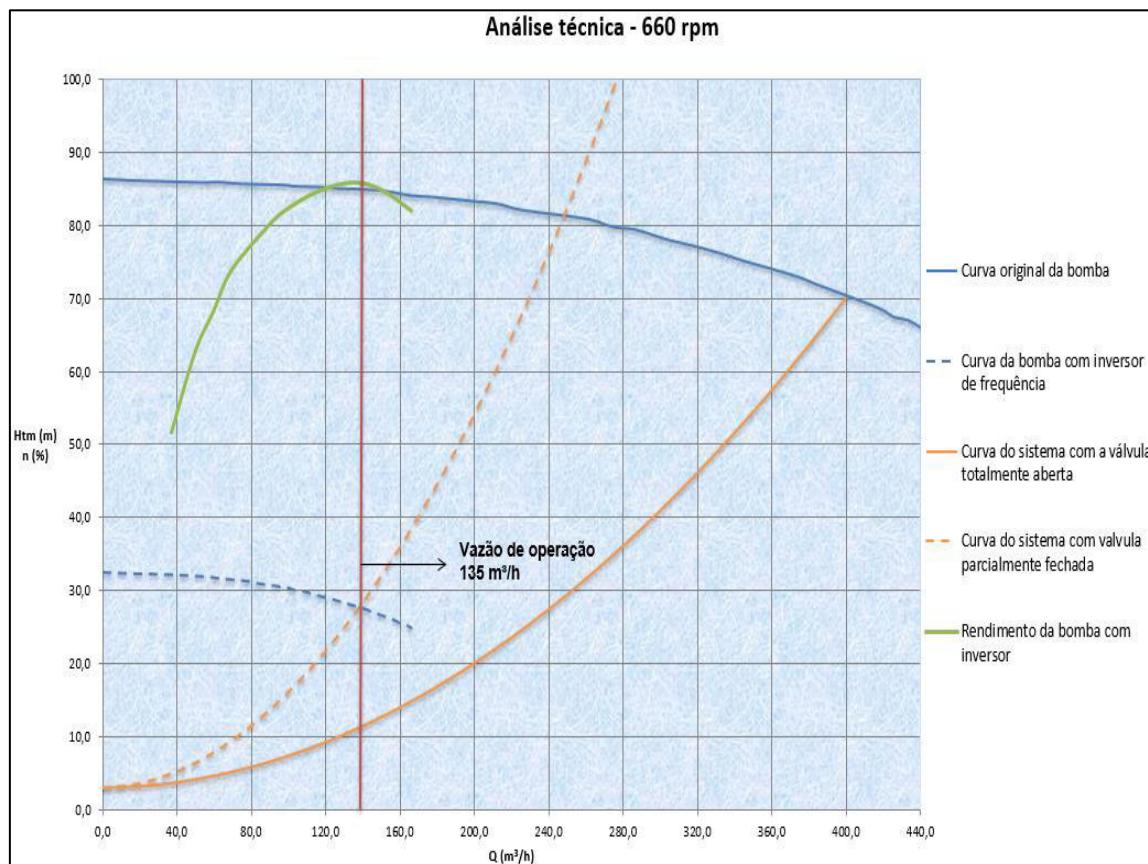
Gráfico 11 - Consumo energético com 630 rpm e vazão de 127 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 660 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $135 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 3 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Atingindo a vazão desejada no rendimento máximo conforme representado no gráfico 12.

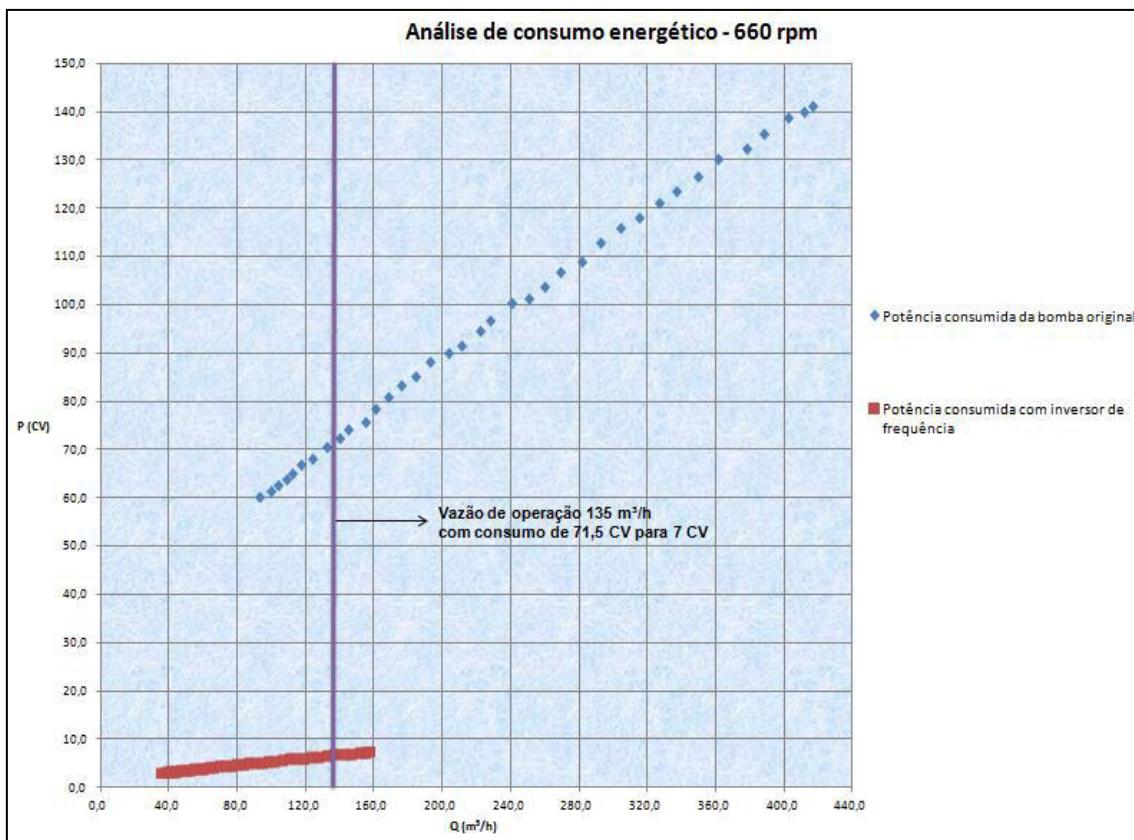
Gráfico 12 - Bomba centrífuga operando com 660 rpm e vazão de  $135 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 660 rpm e na vazão de 135 m<sup>3</sup>/h. O consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 71,5 CV para 7 CV conforme representado no gráfico 13.

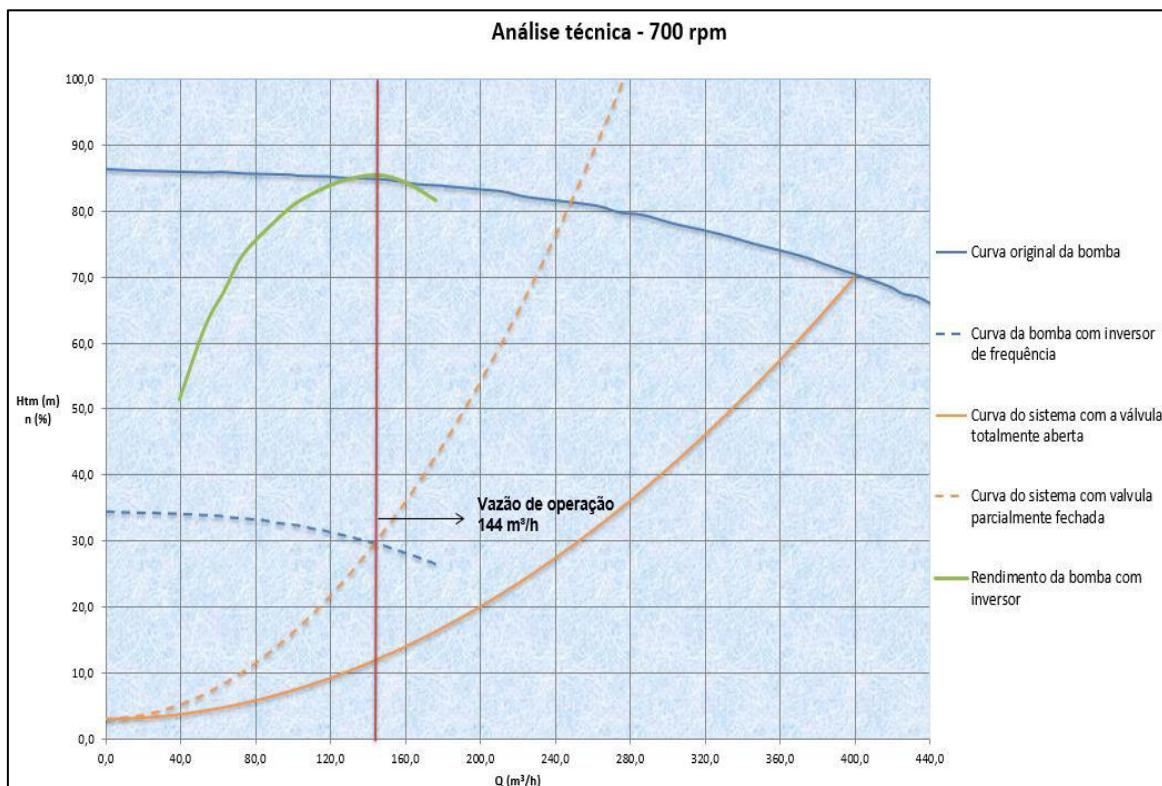
Gráfico 13 - Consumo energético com 660 rpm e vazão de 135 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 700 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $144 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 3 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Atingindo a vazão desejada no rendimento máximo conforme representado no gráfico 14.

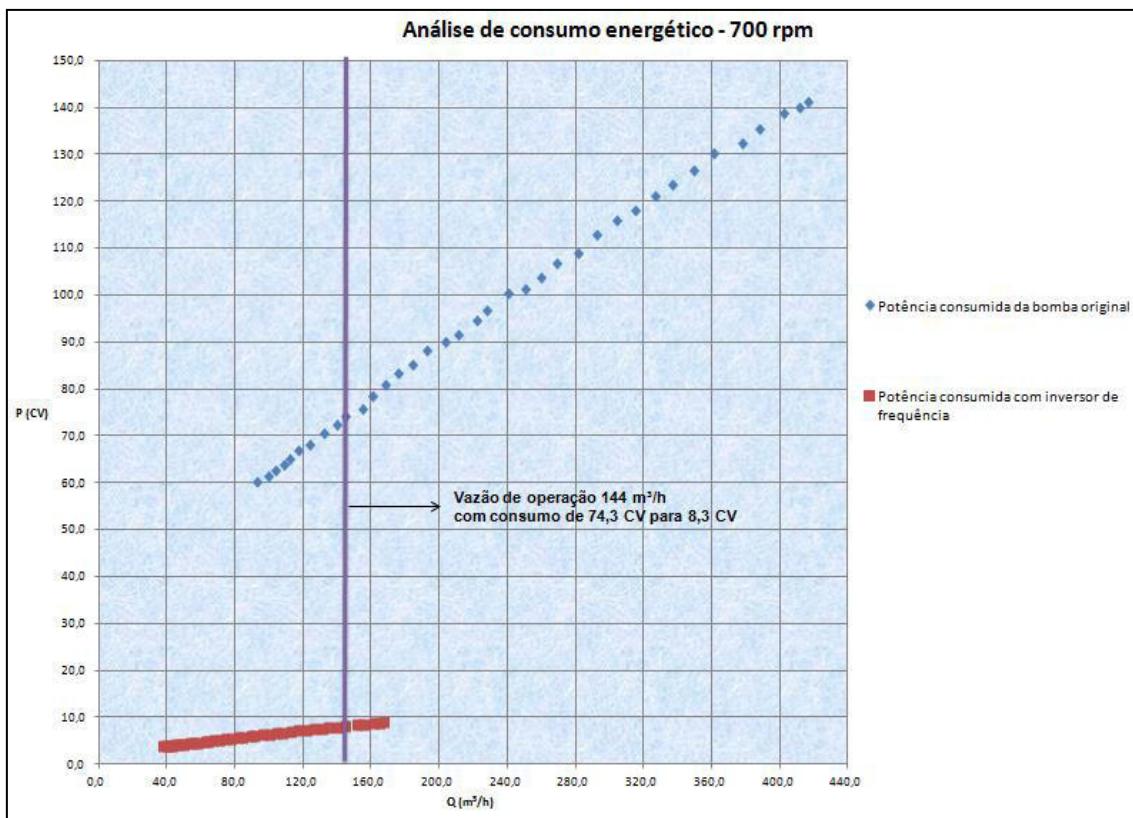
Gráfico 14 - Bomba centrífuga operando com 700 rpm e vazão de  $144 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 700 rpm e na vazão de 144 m<sup>3</sup>/h. O consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 74,3 CV para 8,3 CV conforme representado no gráfico 15.

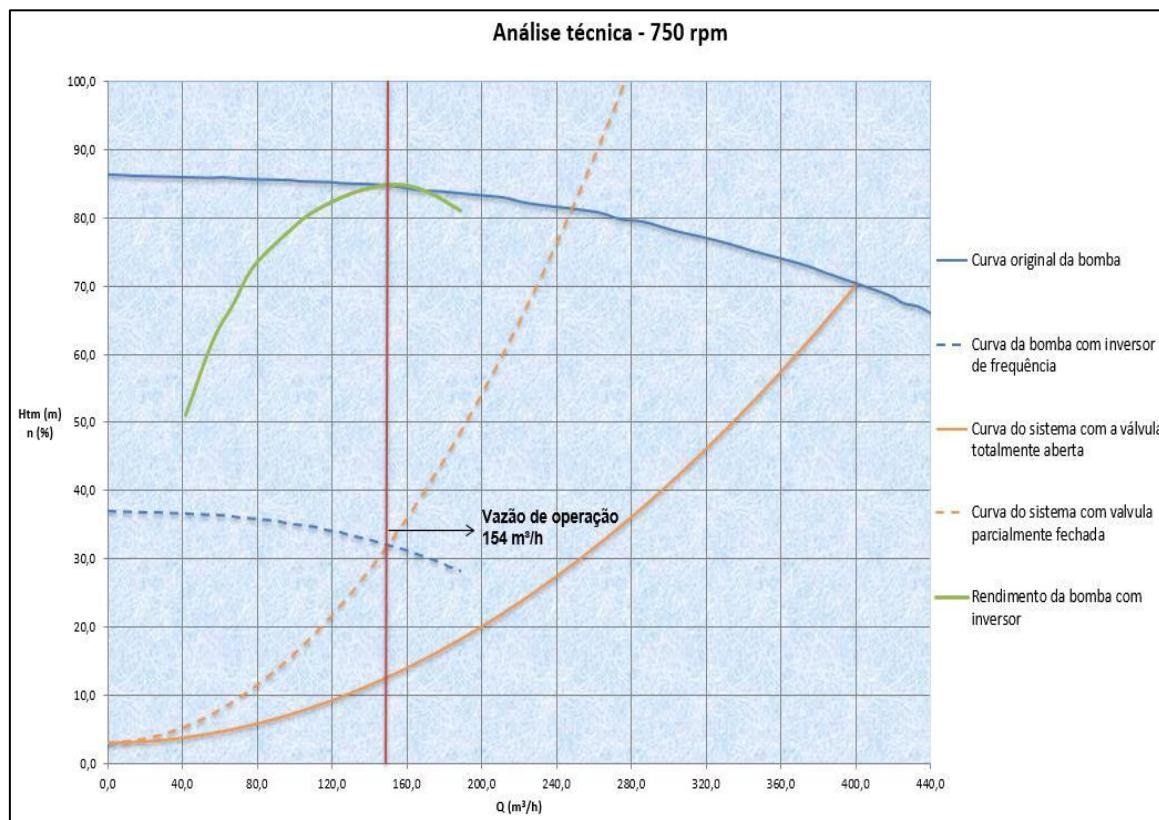
Gráfico 15 - Consumo energético com 700 rpm e vazão de 144 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 750 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $154 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 3 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Atingindo a vazão desejada no rendimento máximo conforme representado no gráfico 16.

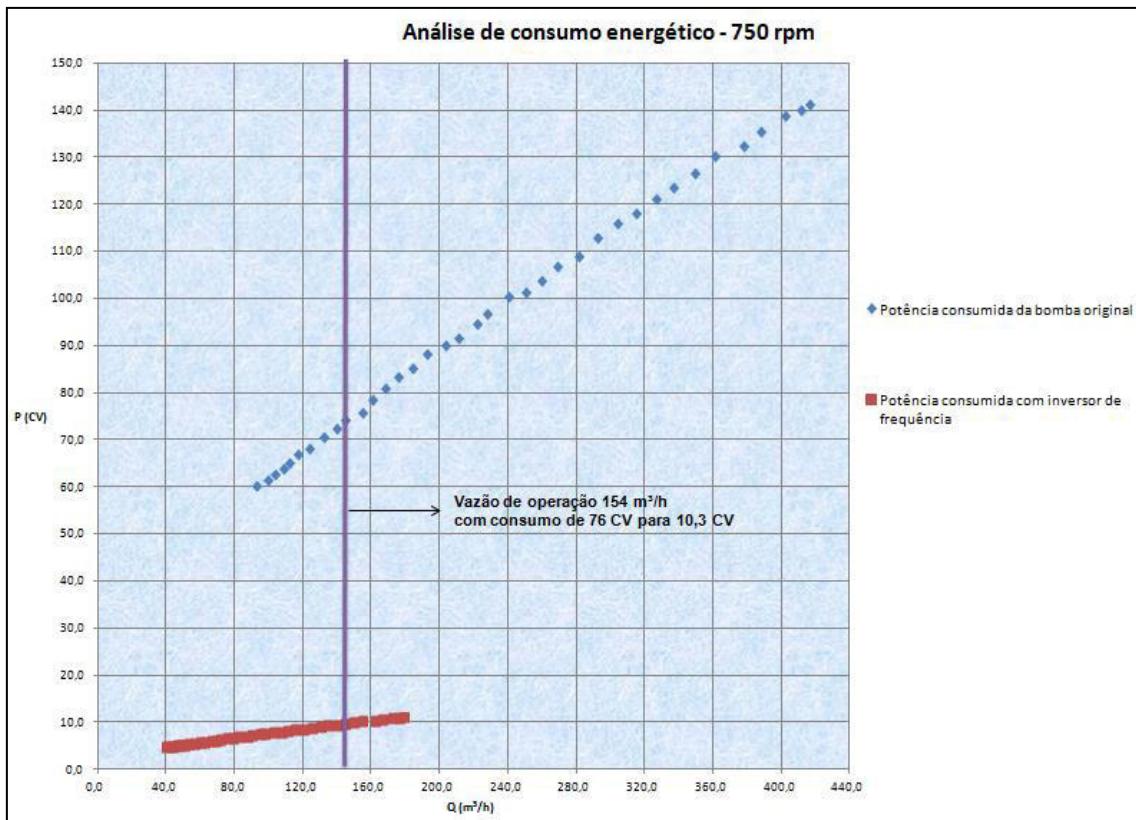
Gráfico 16 - Bomba centrífuga operando com 750 rpm e vazão de  $154 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 750 rpm e na vazão de 154 m<sup>3</sup>/h. O consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 76 CV para 10,3 CV conforme representado no gráfico 17.

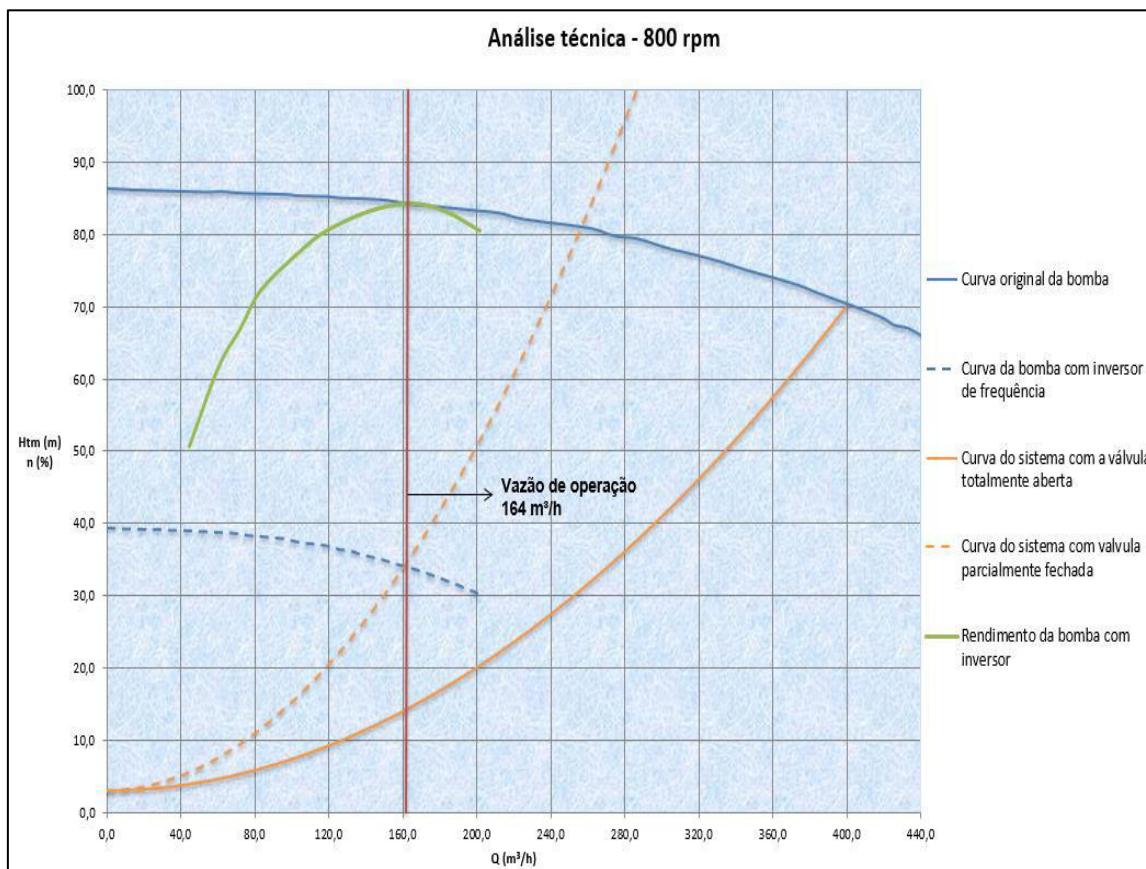
Gráfico 17 - Consumo energético com 750 rpm e vazão de 154 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 800 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $164 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 2,8 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Atingindo a vazão desejada no rendimento máximo conforme representado no gráfico 18.

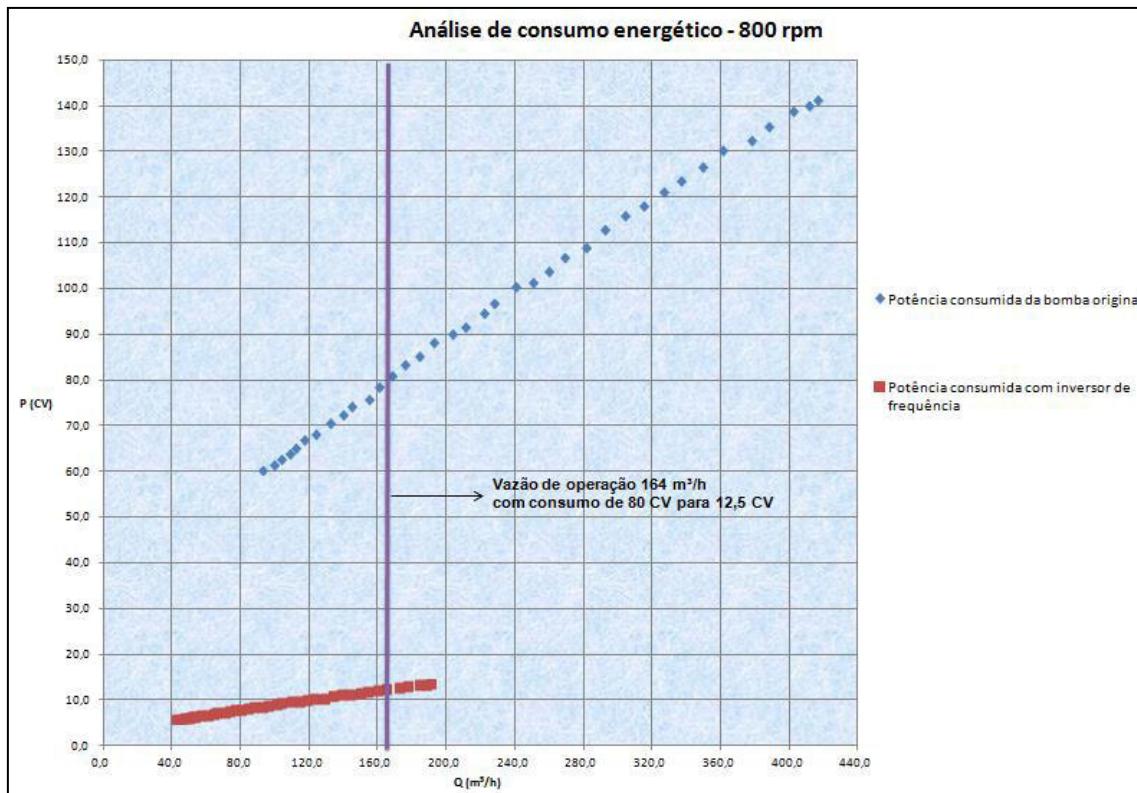
Gráfico 18 - Bomba centrífuga operando com 800 rpm e vazão de  $164 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 800 rpm e na vazão de 164 m<sup>3</sup>/h. O consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 80 CV para 12,5 CV conforme representado no gráfico 19.

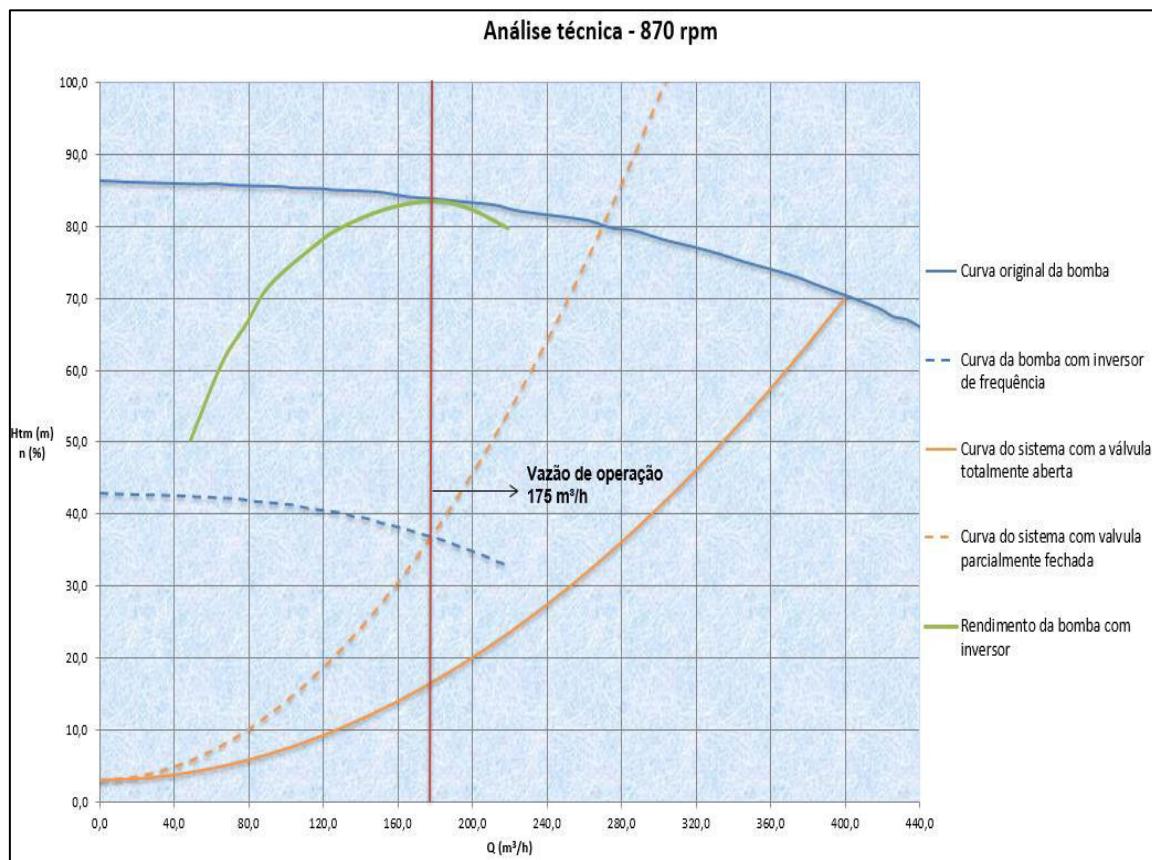
Gráfico 19 - Consumo energético com 800 rpm e vazão de 164 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 870 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $175 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 2,5 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Atingindo a vazão desejada no rendimento máximo conforme representado no gráfico 20.

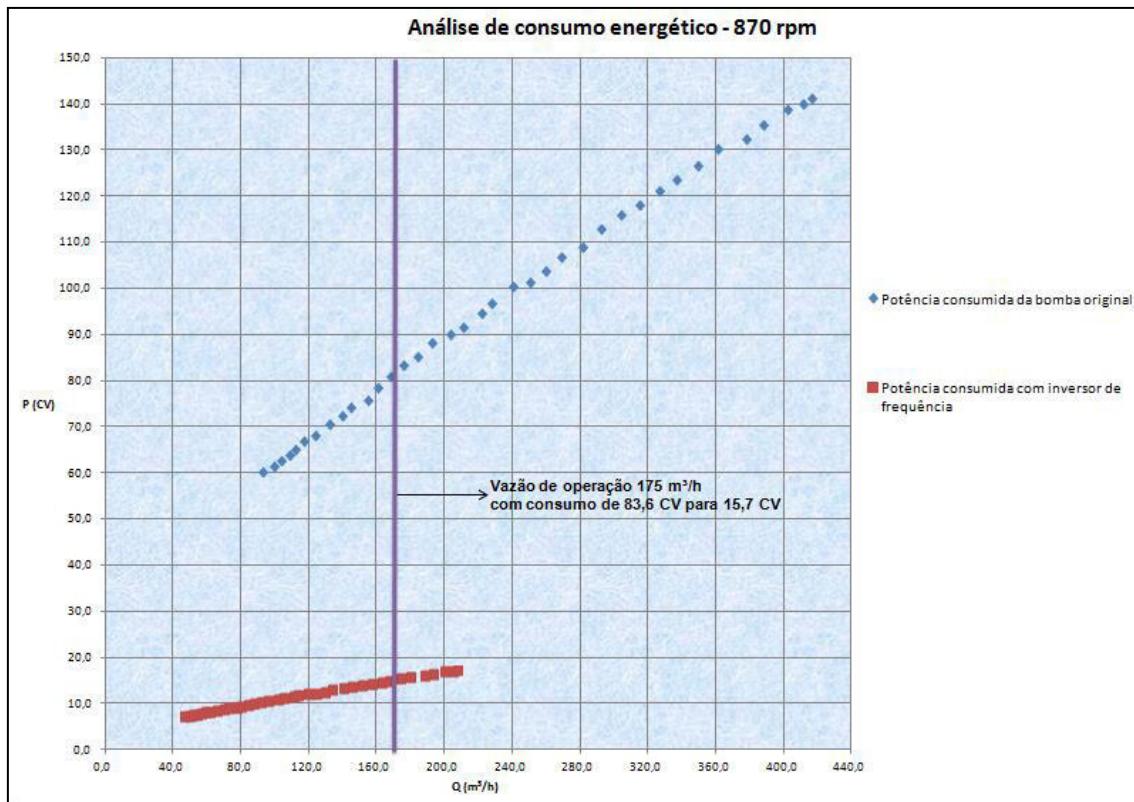
Gráfico 20 - Bomba centrífuga operando com 870 rpm e vazão de  $175 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 870 rpm e na vazão de 175 m<sup>3</sup>/h. O consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 83,6 CV para 15,7 CV conforme representado no gráfico 21.

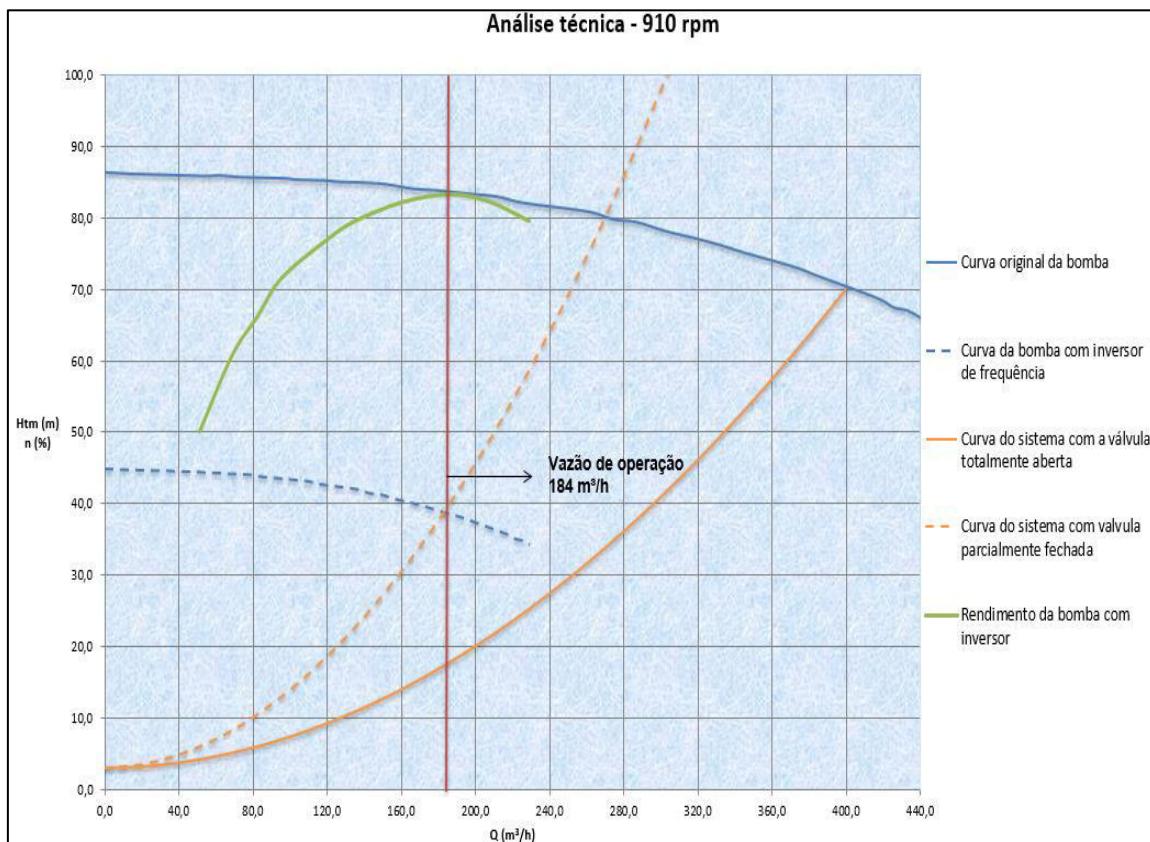
Gráfico 21 - Consumo energético com 870 rpm e vazão de 175 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 910 rpm atingiu a vazão desejada do processo de  $184 \text{ m}^3/\text{h}$ . Com uma restrição na válvula de descarga da bomba gerou uma perda de carga dinâmica de 2,5 vezes maior do que trabalhar com a válvula totalmente aberta. Atingindo a vazão desejada no rendimento máximo conforme representado no gráfico 22.

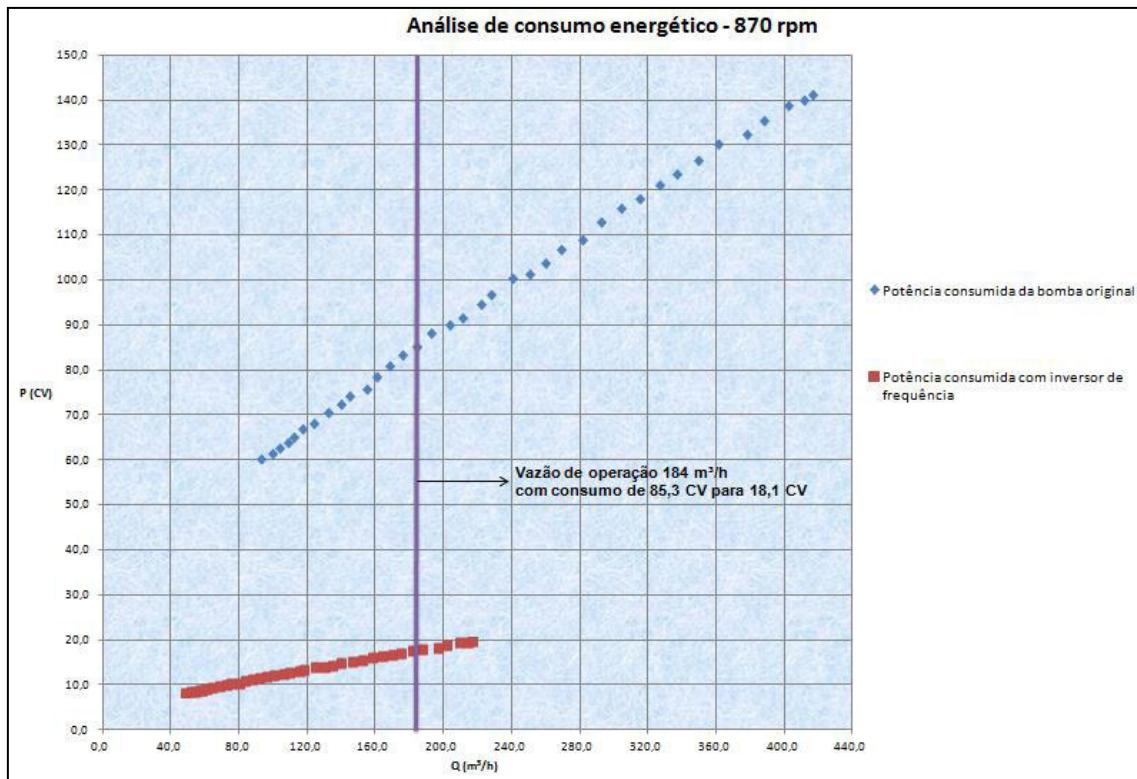
Gráfico 22 - Bomba centrífuga operando com 910 rpm e vazão de  $184 \text{ m}^3/\text{h}$



Fonte: Autoria própria

Com a bomba centrífuga trabalhando na rotação de 910 rpm e na vazão de 184 m<sup>3</sup>/h. O consumo energético pelo eixo da bomba foi reduzido de 85,3 CV para 18,1 CV conforme representado no gráfico 23.

Gráfico 23 - Consumo energético com 910 rpm e vazão de 184 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autoria própria

Com isso, foi realizada uma análise econômica partindo das premissas que o preço da energia elétrica é de 280 R\$/MWh, pois é um valor aproximado do SPOT no mercado de energia elétrica do ano de 2019. O rendimento do motor adotado para os cálculos é de 92%, valor obtido no catálogo fornecido pelo fabricante do motor de 125 CV da marca WEG. O preço do equipamento e instalação adotados foi de R\$ 90.000,00, baseado no preço do inversor de frequência de alta qualidade por volta de R\$ 50.000,00 no mercado. O tempo considerado de operação da bomba foi de 24 horas por dia ao longo do ano, devido ao histórico do ano passado ela ter operado 24 horas e a projeção é que ela continue operando por esse período.

Quando o processo operar na vazão de 106 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 120 mil reais conforme representado na tabela 10.

Tabela 10 – Análise econômica com vazão de 106 m<sup>3</sup>/h

Análise de custo 106 m <sup>3</sup> /h (520 RPM)					
Normal			Com inversor		
P (CV)	63,50	P (CV)			3,4
P(kW)	46,7	P(kW)			2,50
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)			92%
Potência consumida (kW)	51,9	Potência consumida (kW)			2,72
E (MWh)	454,6	E (MWh)			23,8
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)			280
Custo (R\$/ano)	R\$ 127.284	Custo (R\$/ano)	R\$		6.667
Ganho					
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)		R\$			120.617
Custo de equipamento e instalação (R\$)		R\$			90.000
Payback (anos)					0,7
Payback(meses)					9,0

Fonte: Autoria própria

Quando o processo operar na vazão de 118 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 127 mil reais conforme representado na tabela 11.

Tabela 11 – Análise econômica com vazão de 118 m<sup>3</sup>/h

Análise de custo 118 m <sup>3</sup> /h (570 RPM)					
Normal			Com inversor		
P (CV)	67,60	P (CV)			4,50
P(kW)	49,7	P(kW)			3,31
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)			92%
Potência consumida (kW)	55,2	Potência consumida (kW)			3,60
E (MWh)	483,9	E (MWh)			31,5
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)			280
Custo (R\$/ano)	R\$ 135.503	Custo (R\$/ano)	R\$		8.824
Ganho					
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)		R\$			126.679
Custo de equipamento e instalação (R\$)		R\$			90.000
Payback (anos)					0,7
Payback(meses)					8,5

Fonte: Autoria própria

Quando o processo operar na vazão de 127 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 128 mil reais conforme representado na tabela 12.

Tabela 12 – Análise econômica com vazão de 127 m<sup>3</sup>/h

<b>Análise de custo 127 m<sup>3</sup>/h (630 RPM)</b>				
Normal		Com inversor		
P (CV)	69,80	P (CV)		6,00
P(kW)	51,3	P(kW)		4,41
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)		92%
Potência consumida (kW)	57,0	Potência consumida (kW)		4,80
E (MWh)	499,7	E (MWh)		42,0
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)		280
Custo (R\$/ano)	R\$ 139.913	Custo (R\$/ano)	R\$ 11.765	
<b>Ganho</b>				
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)		R\$	128.147	
Custo de equipamento e instalação (R\$)		R\$	90.000	
Payback (anos)			0,7	
Payback(meses)			8,4	

Fonte: Autoria própria

Quando o processo operar na vazão de 135 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 129 mil reais conforme representado na tabela 13.

Tabela 13 – Análise econômica com vazão de 135 m<sup>3</sup>/h

<b>Análise de custo 135 m<sup>3</sup>/h (660 RPM)</b>				
Normal		Com inversor		
P (CV)	71,50	P (CV)		7
P(kW)	52,6	P(kW)		5,15
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)		92%
Potência consumida (kW)	58,4	Potência consumida (kW)		5,60
E (MWh)	511,9	E (MWh)		49,0
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)		280
Custo (R\$/ano)	R\$ 143.320	Custo (R\$/ano)	R\$ 13.726	
<b>Ganho</b>				
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)		R\$	129.594	
Custo de equipamento e instalação (R\$)		R\$	90.000	
Payback (anos)			0,7	
Payback(meses)			8,3	

Fonte: Autoria própria

Quando o processo operar na vazão de 144 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 133 mil reais conforme representado na tabela 14.

Tabela 14 – Análise econômica com vazão de 144 m<sup>3</sup>/h

<b>Análise de custo 144 m<sup>3</sup>/h (700 RPM)</b>				
<b>Normal</b>		<b>Com inversor</b>		
P (CV)	74,30	P (CV)		8,3
P(kW)	54,6	P(kW)		6,10
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)		92%
Potência consumida (kW)	60,7	Potência consumida (kW)		6,64
E (MWh)	531,9	E (MWh)		58,1
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)		280
Custo (R\$/ano)	R\$ 148.933	Custo (R\$/ano)	R\$ 16.276	
<b>Ganho</b>				
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)		R\$ 132.657		
Custo de equipamento e instalação (R\$)		R\$ 90.000		
Payback (anos)				0,7
Payback(meses)				8,1

Fonte: Autoria própria

Quando o processo operar na vazão de 154 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 132 mil reais conforme representado na tabela 15.

Tabela 15 – Análise econômica com vazão de 154 m<sup>3</sup>/h

<b>Análise de custo 154 m<sup>3</sup>/h (750 RPM)</b>				
<b>Normal</b>		<b>Com inversor</b>		
P (CV)	76,00	P (CV)		10,3
P(kW)	55,9	P(kW)		7,58
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)		92%
Potência consumida (kW)	62,1	Potência consumida (kW)		8,23
E (MWh)	544,1	E (MWh)		72,1
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)		280
Custo (R\$/ano)	R\$ 152.340	Custo (R\$/ano)	R\$ 20.197	
<b>Ganho</b>				
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)		R\$ 132.143		
Custo de equipamento e instalação (R\$)		R\$ 90.000		
Payback (anos)				0,7
Payback(meses)				8,2

Fonte: Autoria própria

Quando o processo operar na vazão de 164 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 136 mil reais conforme representado na tabela 16.

Tabela 16 – Análise econômica com vazão de 164 m<sup>3</sup>/h

<b>Análise de custo 164 m<sup>3</sup>/h (800 RPM)</b>				
Normal		Com inversor		
P (CV)	80,00	P (CV)		12,50
P(kW)	58,8	P(kW)		9,19
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)		92%
Potência consumida (kW)	65,4	Potência consumida (kW)		9,99
E (MWh)	572,7	E (MWh)		87,5
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)		280
Custo (R\$/ano)	R\$ 160.358	Custo (R\$/ano)	R\$	24.511
<b>Ganho</b>				
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)		R\$	135.847	
Custo de equipamento e instalação (R\$)		R\$	90.000	
Payback (anos)			0,7	
Payback(meses)			8,0	

Fonte: Autoria própria

Quando o processo operar na vazão de 175 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 137 mil reais conforme representado na tabela 17.

Tabela 17 – Análise econômica com vazão de 175 m<sup>3</sup>/h

<b>Análise de custo 175 m<sup>3</sup>/h (870 RPM)</b>				
Normal		Com inversor		
P (CV)	83,60	P (CV)		15,70
P(kW)	61,5	P(kW)		11,55
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)		92%
Potência consumida (kW)	68,3	Potência consumida (kW)		12,55
E (MWh)	598,5	E (MWh)		110,0
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)		280
Custo (R\$/ano)	R\$ 167.574	Custo (R\$/ano)	R\$	30.786
<b>Ganho</b>				
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)		R\$	136.788	
Custo de equipamento e instalação (R\$)		R\$	90.000	
Payback (anos)			0,7	
Payback(meses)			7,9	

Fonte: Autoria própria

Quando o processo operar na vazão de 184 m<sup>3</sup>/h a redução do custo operacional em um ano foi de 135 mil reais conforme representado na tabela 18.

Tabela 18 – Análise econômica com vazão de 184 m<sup>3</sup>/h

<b>Análise de custo 184 m<sup>3</sup>/h (910 RPM)</b>			
Normal	Com inversor		
P (CV)	85,30	P (CV)	18,1
P(kW)	62,7	P(kW)	13,31
Rendimento do motor (%)	92%	Rendimento do motor (%)	92%
Potência consumida (kW)	69,7	Potência consumida (kW)	14,47
E (MWh)	610,7	E (MWh)	126,8
Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280	Valor EE 2019 (R\$/MWh)	280
Custo (R\$/ano)	R\$ 170.982	Custo (R\$/ano)	R\$ 35.492
Ganho			
Redução de custo operacional ano (R\$/ano)	R\$	135.490	
Custo de equipamento e instalação (R\$)	R\$	90.000	
Payback (anos)		0,7	
Payback(meses)		8,0	

Fonte: Autoria própria

Por meio dos dados da análise econômica em todas as vazões de operação, foi realizada uma análise da redução do custo operacional ponderada de acordo com o período de operação em cada vazão conforme representado na tabela 19.

Tabela 19 – Análise econômica ponderada 2019.

Análise econômica ponderada					
Q média (m <sup>3</sup> /h)	Porcentual do tempo de operação (%)		Redução custo operacional anual por faixa de vazão		Redução de custo operacional ponderado
106	0,4	R\$	120.617	R\$	492
118	0,5	R\$	126.679	R\$	604
127	8,0	R\$	128.147	R\$	10.233
135	47,5	R\$	129.594	R\$	61.505
144	33,2	R\$	132.657	R\$	44.023
154	6,3	R\$	132.143	R\$	8.317
164	2,8	R\$	135.847	R\$	3.861
175	0,9	R\$	136.788	R\$	1.168
184	0,5	R\$	135.490	R\$	658

Fonte: Autoria própria

Com isso a redução de custo operacional do projeto foi de aproximadamente 131 mil reais, como o custo do projeto é de 90 mil reais o payback simples do projeto será de 8,3 meses conforme representado na tabela 20.

Tabela 20 – Resultado final Análise econômica

Média ponderada Q (m <sup>3</sup> /h)	140
Redução de custo operacional anual	R\$ 130.865
Custo de equipamento e instalação	R\$ 90.000
Payback anos	0,69
Payback meses	8,3

Fonte: Autoria própria

## 4.2 Discussão

Com as análises técnicas e econômicas pode-se inferir que a bomba centrifuga operava com um rendimento de aproximadamente 59% na vazão de operação média de 140 m<sup>3</sup>/h. Essa vazão está muito distante da vazão de operação ideal da bomba de 360 m<sup>3</sup>/h com rendimento de 78%, o ideal é operar com um desvio máximo de 30% dos 360 m<sup>3</sup>/h para evitar danos mecânicos (a vazão mínima recomendável é de 252 m<sup>3</sup>/h), essa discrepância da vazão de operação ideal justifica a bomba ter a necessidade de manutenção com alta frequência. Com a instalação do inversor de frequência no motor da bomba centrifuga, ela consegue operar com a mesma vazão de operação média de 140 m<sup>3</sup>/h, porém com um rendimento acima dos 80%, ou seja, acima do rendimento ideal e consequentemente reduzira drasticamente os danos mecânicos sofridos pelo equipamento ao longo do processo de bombeamento.

Também se pode inferir que existia uma grande perda energética na forma de pressão nas válvulas estranguladas no processo de bombeamento. É possível notar com a curva do sistema que com a válvula totalmente aberta essa bomba forneceria uma vazão de 400 m<sup>3</sup>/h, porém devido à perda de pressão nas válvulas obstruídas a vazão era reduzida para 140 m<sup>3</sup>/h em média. Com a instalação do inversor de frequência não haverá mais perda de pressão significativa nas válvulas totalmente abertas, a bomba conseguira exercer a vazão desejada do processo com menor pressão na descarga da bomba devido à redução de rotação do motor da bomba. Com essa alteração no processo o consumo de energia elétrica será reduzido em 467 MWh por ano representando uma redução de 90% do consumo energético sem o inversor de frequência devido a menor rotação no eixo do motor.

## 5 CONCLUSÃO

Com isso, pode-se concluir que a instalação do inversor de frequência não trará riscos para o processo de bombeamento do efluente e reduzirá o gasto com energia elétrica e melhorar o rendimento de operação da bomba na estação de tratamento de efluente. O investimento inicial será de 90 mil reais e o retorno financeiro ocorrerá entre 8 e 9 meses considerando apenas o ganho com a economia de energia elétrica que será de aproximadamente 131 mil reais por ano.

## REFERÊNCIAS

ASKER, Mustafa; COBAN, Mustafa Turhan; TURGUT, Oguz Emrah. A review of non iterative friction factor correlations for the calculation of pressure drop in pipes. **Journal of Science and Technology**, Izmir - Turkey, p. 1-8, 1 jun. 2014.

BIRCK, Cleiton. **Estudo do controle de vazão de bombas de água para redução de custo de processo industrial**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia elétrica) - Universidade Técnologica Federal do Parana, Pato Branco, 2015.

CO., Crane. Flow of fluids through valves and fittings. In: CO., Crane. **Flow of fluids through valves, fittings and pipe**. Nova York: Technical Paper No. 410, 2018.

CO., Crane. Theory of flow in pipe. In: CO., Crane. **Flow of fluids through valves, fittings and pipe**. Nova York: Technical Paper No. 410, 2018.

COSTA, José Nilton de Abreu; CASTRO, Marco Aurélio Holanda de; COSTA, Luís Henrique Magalhães. Um ajuste à equação de Sârbu e Borza para estimativas de rendimento de bombas em ocasiões de redução de velocidade. In: XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 2018, Buenos Aires. **Um ajuste à equação de Sârbu e Borza para estimativas de rendimento de bombas em ocasiões de redução de velocidade** [...]. Buenos Aires: IAHR, 2018. Disponível em: [https://www.ina.gob.ar/congreso\\_hidraulica/resumenes/LADHI\\_2018\\_RE\\_725.pdf](https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_725.pdf). Acesso em: 30 abr. 2019.

COUTINHO, Ricardo Santos; SOARES, Alexandre Kepler. Simulação de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET. **Eng. Sanit Ambient**, [S. l.], p. 797-808, 1 jul. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/2017nahead/1809-4457-esa-s1413-41522017163428.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2019.

CREMASCO, Marco Aurélio. Bombas. In: CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 2018.

GREEN, Don W.; SOUTHARD, Marylee Z. **Perry's Chemical Engineers: Handbook**. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2018. 2208 p.

RAZA, Asif. Sizing, specifying and selecting centrifugal pumps. Engineering practice, Washington, p. 43-47, 1 fev. 2013.

SIMPSON, A.R. & MARCHI, A. (2013) **Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the efficiency estimate for variable speed pumps**. Journal of Hydraulic Engineering, v. 139, n. 12, p. 1314-1317.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho. Conceitos e definições das bombas de fluxo. In: VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **Bombas funcionando como turbinas**. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2012.