



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá**

**LUCAS IGAZ**

**VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA DO USO DE INVERSORES DE**  
**FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Guaratinguetá  
2023

**LUCAS IGAZ**

**VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA DO USO DE INVERSORES DE  
FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá  
2023

I24v	<p>Igaz, Lucas</p> <p>Viabilidade técnica/econômica do uso de inversores de frequência em sistemas de bombeamento / Lucas Igaz - Guaratinguetá, 2023.</p> <p>45 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 42-44</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna</p> <p>1. Inversores elétricos. 2. Bombas hidráulicas. 3. Bombas centrífugas. 4. Energia elétrica - Consumo. 5. Controladores elétricos. I. Título.</p> <p>CDU 621.314.572</p>
------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

LUCAS IGAZ

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna  
Coordenador(a)

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna  
Orientador(a)/UNESP-FEG

Prof. Me. Fernando Henrique Mayworm de Araujo  
UNESP-FEG

Prof. Me. Victor Arruda Ferraz de Campos  
UNESP-FEG

Fevereiro de 2023

## **DADOS CURRICULARES**

### **LUCAS IGAZ**

**NASCIMENTO** 06.11.1996 – São Bernardo do Campo / SP

**FILIAÇÃO** Rogério Tadeu Igaz  
Cassia Pedroso do Carmo Igaz

Dedico esse trabalho com amor aos meus pais e ao meu irmão por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem incondicionalmente em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rogério e Cassia, que sempre fizeram questão de estar ao meu lado em todos os momentos, me apoiarem, dedicarem todos seus recursos para a formação do meu caráter e na minha educação. Sempre incansáveis na educação e criação do homem que sou hoje e, mesmo de longe, sempre se fizeram presentes na minha vida em Guaratinguetá.

Ao meu irmão, Thadeu, futuro Engenheiro Civil, meu fiel escudeiro, confidente e meu grande parceiro para todos os momentos. Compartilhar os melhores momentos da vida ao seu lado são memórias que jamais vou esquecer.

A minha família de um modo geral, cada um com a sua particularidade, mas sempre desejando os melhores votos para a minha vida.

Aos amigos da República Arapuca, que me proporcionam momentos maravilhosos ao longo da graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e me orientar.

Ao Prof. Me. Fernando Henrique Mayworm de Araujo que se dispôs a ajudar com o desenvolvimento do experimento em laboratório.

E, por fim, a Deus e Nossa Senhora da Conceição Aparecida, que sempre estão presentes comigo em pensamento, me iluminando e abençoando a minha vida.

“Todo obstáculo é destruído pelo rigor”

Leonardo da Vinci

## RESUMO

Este trabalho avalia técnica e financeiramente a utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento. Os inversores de frequência, em sua definição, são dispositivos utilizados para controlar operações de sistemas eletronicamente e gerar, também, redução no consumo de energia elétrica. Proposto para diversas aplicações, a utilização deste equipamento atinge um dos principais objetivos do mercado, a redução de custo. Buscando a minimização de custos e uso racional de recursos naturais, o uso do inversor de frequência é uma alternativa para o uso nos processos de abastecimento de água. De acordo com o PROCEL Sanear, Programa Nacional de Conservação de Energia para o setor de saneamento, os sistemas de abastecimento são responsáveis por 3% da energia elétrica consumida no mundo e entre 2-3% da energia elétrica consumida no Brasil, cerca de 10 bilhões de kWh/ano e, em média, 25% da energia gasta no mundo deve-se à ineficiência energética e os diversos fatores envolvidos nessa ineficiência, como equipamentos obsoletos e hiper dimensionados, problemas de manutenção, perda de carga, entre outros. Em contrapartida a essa ineficiência, equipamentos e novas propostas de engenharia tem como principal objeto a utilização de equipamentos que atuem na capacidade e modelagem ideal que o sistema em análise necessita, com dimensionamento, aplicação, manutenção e investimentos coerentes, tanto economicamente quanto tecnicamente, envolvendo profissionais capacitados e equipes com conhecimentos variados, para aplicações relacionadas as áreas técnicas de hidráulica, elétrica e mecânica, para proposição de diagnósticos e planos de ação viáveis e que se paguem rapidamente. Após a realização do experimento, foi possível avaliar que a utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento são uma alternativa coerente para a redução e custos e possui payback inferior a 2 anos.

**PALAVRAS-CHAVE:** sistemas de bombeamento; condutos; inversores de frequência.

## ABSTRACT

This work technically and financially evaluates the use of variable speed drive in pumping systems. Variable speed drives, in their definition, are devices used to control system operations electronically and also generate a reduction in electricity consumption. Proposed for various applications, the use of this equipment achieves one of the main objectives of the market, cost reduction. Seeking cost minimization and rational use of natural resources, the use of variable speed drive is an alternative for use in water supply processes. According to PROCEL Sanear, the National Energy Conservation Program for the sanitation sector, supply systems are responsible for 3% of the electricity consumed in the world and between 2-3% of the electricity consumed in Brazil, about 10 billions of kWh/year and, on average, 25% of the energy spent in the world is due to energy inefficiency and the various factors involved in this inefficiency, such as obsolete and oversized equipment, maintenance problems, loss of load, among others. In contrast to this inefficiency, equipment and new engineering proposals have as their main object the use of equipment that operate at the ideal capacity and modeling that the system under analysis needs, with dimensioning, application, maintenance and coherent investments, both economically and technically, involving trained professionals and teams with varied knowledge, for applications related to the technical areas of hydraulics, electrical and mechanics, to propose viable diagnoses and action plans that pay for themselves quickly. After carrying out the experiment, it was possible to evaluate that the use of variable speed drive in pumping systems is a coherent alternative for reducing costs and has a payback of less than 2 years.

**KEYWORDS:** pumping systems; conduits; variable speed drives.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Número de artigos sobre sistemas de bombeamento publicados por ano.....	12
Figura 2 - Número de artigos sobre sistemas de bombeamento e inversores de frequência.	13
Figura 3 - Consumo de energia elétrica mundial.....	17
Figura 4 - Exemplo de Curva do Sistema.....	17
Figura 5 - Representação esquemática do sistema de bombeamento.....	18
Figura 6 - Altura geométrica em função de ha e hr. ....	20
Figura 7 - Altura geométrica de um sistema.....	21
Figura 8 - Diagrama de Moody. ....	24
Figura 9 - Vista em corte de um motor elétrico.....	27
Figura 10 - Exemplo de motor elétrico disponível no mercado. ....	27
Figura 11 - Características da bomba utilizada no ensaio. ....	28
Figura 12 - Exemplo de inversor de frequência disponível no mercado. ....	29
Figura 13 - representação de fluxo de caixa. ....	30
Figura 14 - Características da bomba utilizada no ensaio. ....	33
Figura 15 - Características da motor de indução utilizado no ensaio.....	33
Figura 16 - Sistema de bombeamento utilizado no ensaio .....	34
Figura 17 - Características do Inversor de Frequências utilizado no ensaio .....	35
Figura 18 - Painel do medidor de vazão utilizado no ensaio.....	35
Figura 19 - Painel do Inversor de Frequências utilizado no ensaio.....	35
Figura 20 - Altura manométrica para válvula e inversor de frequência .....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rugosidade para diversos materiais.....	22
Tabela 2 - Coeficiente para cálculo da perda de Carga Método de Hazen-Wiliams.....	25
Tabela 3 - Dados da bomba.. ..	32
Tabela 4 - Faixas de rendimento para as vazões analisadas .....	32
Tabela 5 - Faixas de vazão do experimento.. ..	33
Tabela 6 - Valores obtidos no experimento.....	36
Tabela 7 - Tarifa de Energia Elétrica.....	38
Tabela 8 - Cálculos de potência e economia para cada um dos sistemas.....	39

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	BOMBAS HIDRÁULICAS.....	15
2.1.1	Bombas Centrífugas.....	15
2.2	SISTEMAS DE BOMBEAMENTO.....	16
2.2.1	Pontos de Operação.....	17
2.2.2	Potência Motriz da Bomba (requerida).....	18
2.3	ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL (AMT).....	19
2.3.1	Altura estática.....	20
2.3.2	Altura dinâmica.....	21
<b>2.3.2.1</b>	<b><i>Perda de carga .....</i></b>	<b>21</b>
<b>2.3.2.2</b>	<b><i>Fator de atrito – Diagrama de Moody.....</i></b>	<b>24</b>
2.4	MOTORES ELÉTRICOS.....	26
2.5	INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	28
2.6	ENGENHARIA ECONÔMICA.....	29
<b>3</b>	<b>ESQUEMA DO EXPERIMENTO (METODOLOGIA).....</b>	<b>32</b>
3.1	EXPERIMENTO.....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>36</b>
4.1	CÁLCULOS DOS CONSUMOS.....	38
4.2	AValiação DO PAYBACK.....	40
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>45</b>

# 1 INTRODUÇÃO

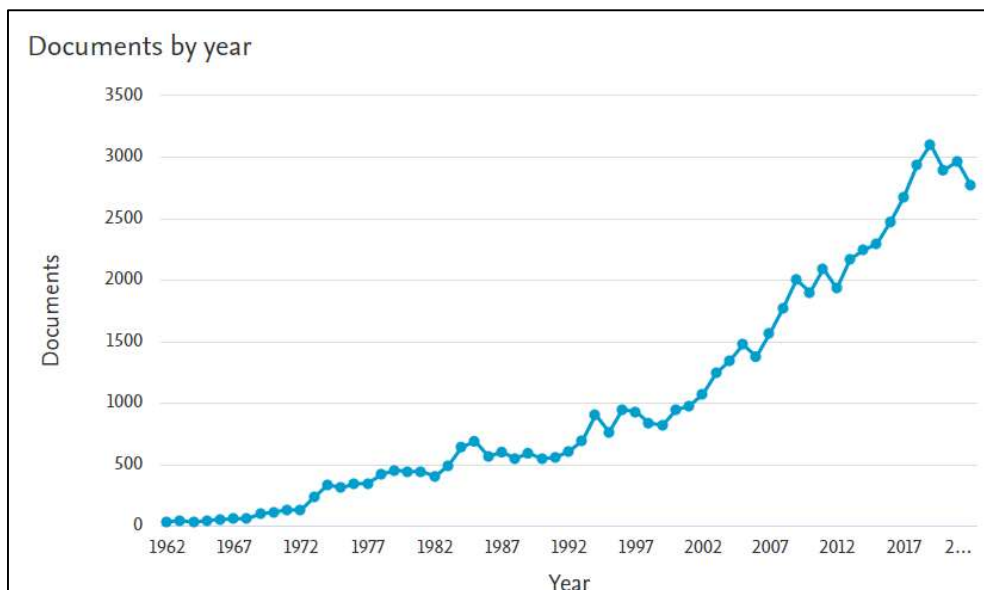
## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a análise do cenário global, tem-se uma busca constante de melhorias nos processos industriais, buscando a eficiência operacional, automações, controles eletrônicos e processos enxutos em busca de reduções de custo. Dessa forma, o papel do Engenheiro Mecânico se faz de extrema importância para projetar sistemas que busquem atingir esses objetivos do mercado.

Conforme análise realizada na base Scopus e apresentada na figura 1, pode-se verificar o aumento significativo de publicações envolvendo sistemas de bombeamento a partir dos anos 1970, seja em quesitos ambientais, físicos ou de engenharia. Portanto, um tema presente no meio científico em busca de melhorias e análises sobre seus respectivos impactos.

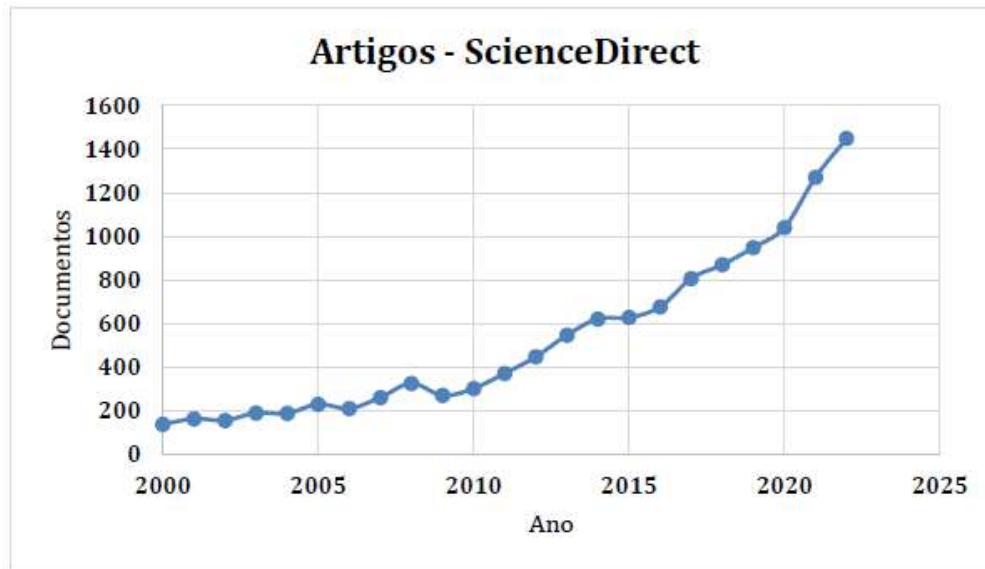
Quando filtra-se combinando sistemas de bombeamento com a utilização de Inversores de Frequência, através das palavras-chave “*Pumping system*” e “*Variable speed drive*”, é possível observar um aumento significativo de trabalhos envolvendo a combinação entre os dois buscando eficiência operacional e reduções de custo a partir dos anos 2000, como pode ser observado na figura 2.

Figura 1 - Número de artigos sobre sistemas de bombeamento publicados por ano.



Fonte: SCOPUS (2023).

Figura 2 - Número de artigos sobre sistemas de bombeamento e inversores de frequência.



Fonte: O autor (2023).

Nos anos recentes, como pode-se verificar nas figuras 1 e 2, diversos estudos relacionados a plantas de distribuição de água têm ganhado destaque em relação a problemas de fluxo de energia.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho trata-se do comparativo de sistemas de bombeamento utilizando inversores de frequência em seu controle com sistemas sem os inversores, operados através de válvula comumente conhecido como “registro”, especificamente na bomba centrífuga para esse trabalho. O inversor de frequência aplica-se neste trabalho como um controlador de velocidade de rotação do motor da bomba.

De acordo com a PROCEL (2005), a expectativa de vida de um inversor de frequência é, em média, de 20 anos e a recuperação do montante investido de até 5 anos, portanto, esse trabalho busca avaliar a viabilidade da aplicação deste equipamento.

A variação da frequência de operação do sistema de bombeamento é feita através da utilização do Inversor de Frequência, possibilitando controle sobre a velocidade de rotação, trabalhando em velocidade adequada, em contrapartida ao uso da válvula cuja abertura é determinada manualmente e tem suas perdas relacionadas na abertura e fechamento.

Dessa forma, esse trabalho tem por objetivo avaliar tecnicamente e economicamente a viabilidade da aplicação do inversor de frequência em sistemas de bombeamento com a

proposta de economizar o consumo de energia elétrica, reduzindo custos e o desperdício, além da análise de quanto tempo se faz necessário para que o equipamento se faça viável de instalação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão descritos os equipamentos envolvidos em um sistema de bombeamento e todos os fatores que influenciam na composição de um projeto de Sistema de Bombeamento através de Registro e Inversores de Frequência em bombas centrífugas.

De acordo com Abdelsalam (2022), sistemas de bombeamento são utilizados amplamente em diversos segmentos e aplicações e baixa eficiência e custos crescentes em unidades de bombeamento de água faz com que o mercado de energia frequentemente busquem por fontes alternativas e avançadas de tecnologia buscando reduzir as despesas com energia consumida e o método mais eficiente para atingir essa redução se faz por meio da utilização de Inversores elétricos de frequência para aumentar a eficiência operacional do sistema.

### 2.1 BOMBAS HIDRÁULICAS

Bombas hidráulicas são equipamentos que convertem energia mecânica em energia hidráulica e tem por objetivo mover fluídos através de tubulações, podendo agir contra a ação da gravidade. Nessas tubulações (ou condutos), a parede do tubo exerce influência sobre a parede da tubulação, que dissipa energia devido ao atrito gerado entre a parede e o fluído (MAUAD, 2020).

Os condutos podem ser fechados ou abertos. Os fechados se caracterizam pela pressão interna maior que a pressão externa e os abertos exercem sob pressão igual à pressão atmosférica. Este trabalho tem por objetivo a análise de condutos fechados, agindo sob pressão provocada pelo sistema de bombeamento (MAUAD, 2020).

#### 2.1.1 Bombas Centrífugas

Bombas Centrífugas são bombas que transferem energia cinética para o líquido em operação, através da força centrífuga exercida pela rotação de um disco a fim de promover seu escoamento. As bombas centrífugas operam transformando energia mecânica em pressão e energia cinética transferidos ao líquido (LIMA, 2003).

De acordo com Abdelsalam (2022), as bombas centrífugas convertem, via trabalho de eixo, a energia elétrica que entra no sistema em energia mecânica para o acionamento mecânico da bomba e esta converte, finalmente, a energia mecânica em energia hidráulica,

atingindo rendimentos em torno de 65-85% geralmente. A utilização de Inversores de Frequência para o controle das bombas centrífugas atinge reduções de energia elétrica em torno de 27% dependendo da faixa de vazão utilizada.

As bombas centrífugas são mais adequadas para operações que demandam de altas vazões e pressões controladas e, dentre suas vantagens de aplicação, pode-se citar exemplos como baixo custo de manutenção, facilidade de instalação, flexibilidade operacional, vazão uniforme, não se faz necessário a utilização de válvulas, operam mesmo com líquidos contendo impurezas, vazão uniforme, dentre outros e, em contrapartida, precisa de ajustes antes de sua utilização, sendo a necessidade de expulsar o gás contido em seu interior (LIMA, 2003).

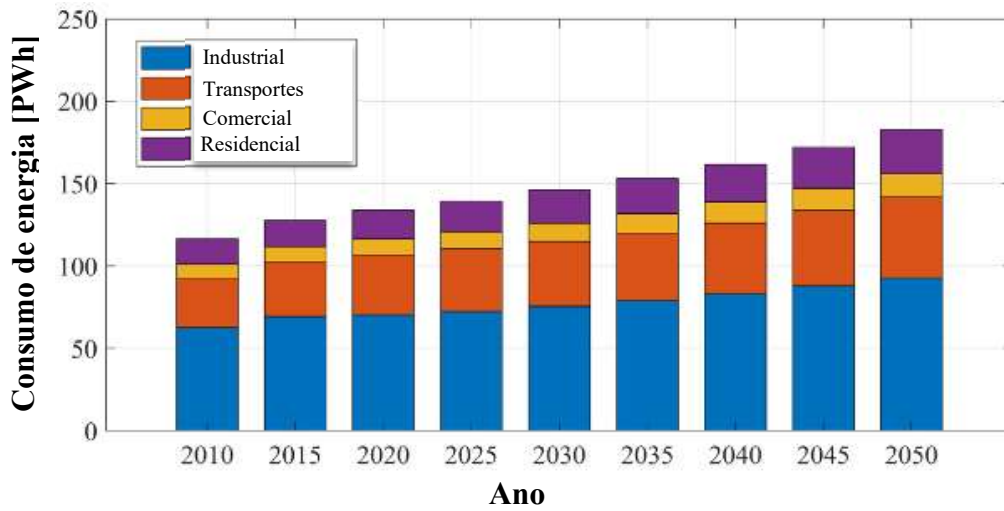
## 2.2 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

A utilização de bombas nos processos representa, aproximadamente, 21% do consumo mundial de eletricidade para sistemas industriais com acionamento por motor. Muitas pesquisas concentram-se em aumentar a eficiência operacional destes equipamentos, com potenciais médios de economia de energia de 30% (XINGCHENG, 2022).

Os sistemas de bombeamento podem ser classificados em dois diferentes grupos, sendo o primeiro, Sistemas de Bomba única (*Single Pump System*) e Sistemas com múltiplas bombas (*Multiple Pump Systems*) (KARASSIK, 2008).

De acordo com Briefing (2019), pode ser observado no gráfico apresentado na figura 3 que a utilização industrial possui ampla utilização de energia elétrica no mundo hoje e, como comentado acima, os sistemas de bombeamento possuem 21% do consumo industrial de energia elétrica, necessitando cada vez mais de modelos otimizados e eficientes para a utilização consciente de energia elétrica e reduções de custo e consumo visando as projeções de consumos cada vez maiores para o setor industrial.

Figura 3 - Consumo de energia elétrica mundial.

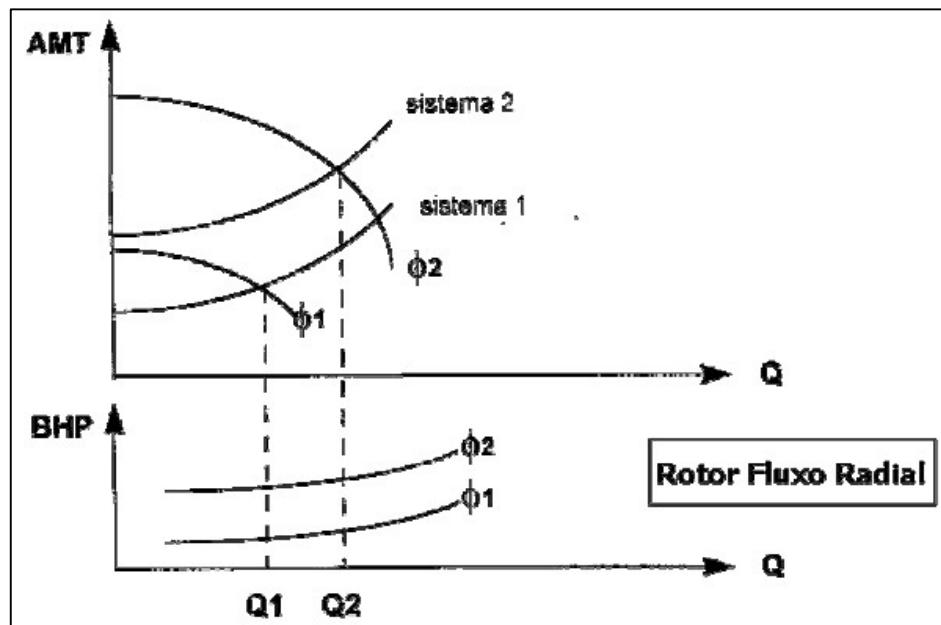


Fonte: BRIEFING (2019).

### 2.2.1 Pontos de Operação

Para a definição do ponto de operação de um sistema de bombeamento, composto por válvulas ou inversores de frequência, tubulações e bombas, de modo geral, se faz necessário encontrar a curva característica do sistema como na Figura 4, para verificar o comportamento do sistema sob as diversas condições de operação que é submetido.

Figura 4 - Exemplo de Curva do Sistema.



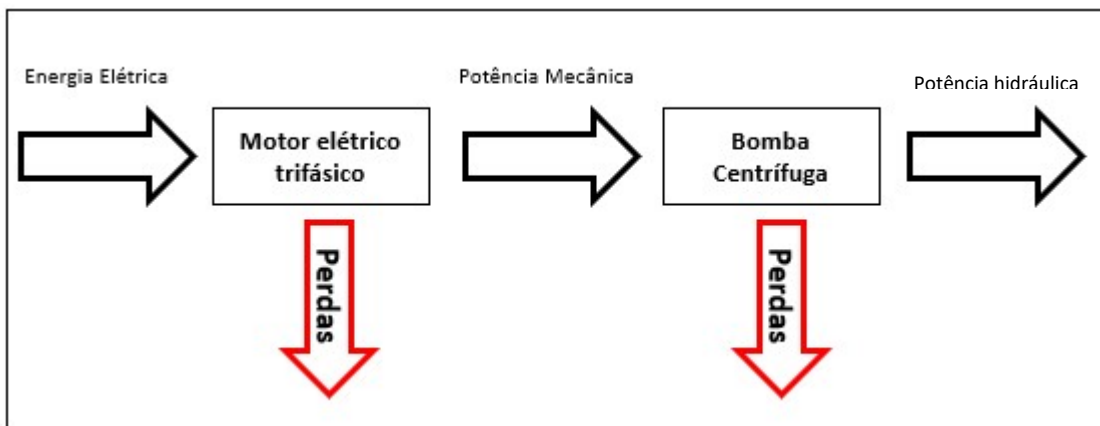
Fonte: SIEMENS LARGE DRIVES (2006).

Analisando o gráfico apresentado na figura 4, pode-se observar que a vazão envolvida em cada ponto, sendo esta a variável de entrada, tem consequências na variável de saída, Altura Manométrica do Sistema e, esta, influência direta na Potência consumida e, conseqüentemente, no consumo de energia elétrica, como será visto mais à frente neste trabalho.

Como em todos os sistemas, temos perdas relativas a cada etapa do processo, podendo estas ser em forma de calor, vibração, ruído, etc.

O esquema representado na figura 5 esquematiza como essas perdas se relacionam com o sistema aplicado neste trabalho e, a potência que será subsequente calculada, diz respeito a potência de entrada na bomba centrífuga.

Figura 5 - Representação esquemática do sistema de bombeamento.



Fonte: O autor (2022).

### 2.2.2 Potência Motriz da Bomba (requerida)

Como a potência do experimento será calculada através dos dados experimentais obtidos, será calculada a potência motriz de cada um dos equipamentos (válvula e inversor de frequências) através da equação (1):

$$P = \frac{V \times I \times \cos \phi \times \sqrt{3} \times \eta_{motor}}{1000} \quad (1)$$

Sendo:

P = Potência motriz [kW];

V = Tensão de alimentação [V];

A = corrente consumida [A];

Cos  $\varphi$  = Fator de potência da bomba;

### 2.3 ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL (AMT)

A altura manométrica total (AMT) representa a energia por unidade de peso do fluido transportado que é solicitada pelo equipamento para transportar o fluido com uma determinada vazão. A altura manométrica indica a capacidade do fluido de trabalho em vencer obstáculos, atritos e desníveis e, ainda sim, ao final disponibilizar para o sistema a energia necessária/solicitada.

É caracterizada pela soma da altura dinâmica e altura estática. A altura dinâmica é a soma entre carga de velocidade e perda de carga e a altura estática se refere à altura geométrica somada a carga de pressão (SCHIAVI, 2013).

Pode ser calculada conforme equação (2):

$$AMT = Hg + Hfa + Hfr + \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Sendo:

AMT = altura manométrica total;

Hg = altura geométrica;

Hfa = perda de carga na aspiração;

Hfr = Perda de carga no recalque;

V = velocidade na saída do recalque;

Como neste trabalho foi realizado ensaio de apenas uma bomba, a altura manométrica é calculada através da equação (3) e (4), relacionando com a potência, peso específico do fluido (água), vazão e rendimento da bomba utilizada.

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H}{\eta}; \quad (3)$$

Manipulando, tem-se:

$$H = \frac{P \times \eta}{\gamma \times Q}; \quad (4)$$

No qual:

$P$  = potência motriz [kW];

$\gamma$  = peso específico da água [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

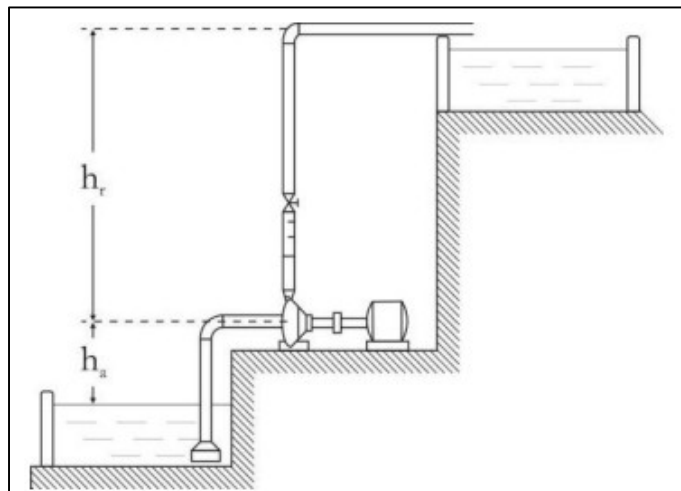
$Q$  = vazão [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];

$H$  = altura manométrica [m];

$\eta$  = rendimento da bomba [%];

Na Figura 6 pode ser visualizado que a altura geométrica total que o fluido precisa vencer é a soma da altura geométrica de aspiração ( $h_a$ ) e a altura geométrica de recalque ( $h_r$ ).

Figura 6 - Altura geométrica em função de  $h_a$  e  $h_r$ .

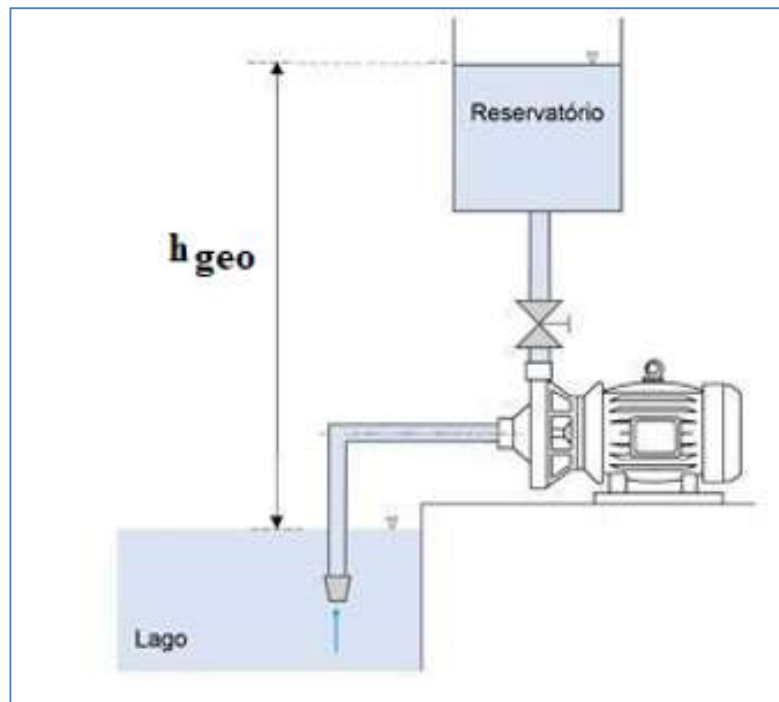


Fonte: PROCEL (2012).

### 2.3.1 Altura estática

A altura estática é composta pela altura geométrica ( $H_{\text{geo}}$ ), representada na Figura 7 e carga de pressão. A carga de pressão para sistemas abertos é nula e, para sistemas fechados, se trata da diferença de pressão, entre o reservatório de descarga e o de sucção. A altura Geométrica é composta pela diferença de altura entre o nível de sucção e o nível de descarga.

Figura 7 - Altura geométrica de um sistema.



Fonte: CAMARGO (2020).

### 2.3.2 Altura dinâmica

A altura dinâmica é composta pela carga de velocidade e perda de carga. A carga de velocidade se trata da diferença entre carga do fluido no reservatório de sucção e o de recalque e pode ser desprezado (SCHIAVI, 2013).

#### 2.3.2.1 Perda de carga

As partículas do fluido no interior do conduto, ao entrarem em contato com as paredes do conduto, adquirem velocidade nula e exercem influência nas demais partículas, provocando uma diminuição da pressão inicial. Esse fenômeno é conhecido como perda de carga (MAUAD, 2020) e, em última análise, dissipa-se sob a forma de calor. A perda de carga se desdobra em duas: perda de carga localizada, causada pelas peças envolvidas na montagem do sistema, como cotovelos, válvulas, etc; e perda de carga distribuída, causada pelo atrito do fluido com as paredes da tubulação retilínea (GOMES, 2012).

No fenômeno de perda de carga distribuída, temos a influência de diversos fatores, sendo: rugosidade da parede do tubo, diâmetro e comprimento do tubo, propriedades do

fluido (viscosidade e massa específica) que escoar ao longo da tubulação e a velocidade do escoamento. A viscosidade é a principal forma de dissipação de energia (MAUAD, 2020).

Um importante critério de avaliação de perda de carga é o Número de Reynolds, adimensional, que indica qual o tipo de escoamento está agindo na tubulação.

A título de curiosidade, um experimento realizado em 1883 por Osborne Reynolds demonstrou a existência de dois tipos de escoamento, laminar e turbulento. Nas suas palavras:

[...] o primeiro onde os elementos do fluido seguem-se ao longo de linhas de movimento e que vão da maneira mais direta possível ao seu destino, e outro em que se movem em trajetórias sinuosas da maneira mais indireta possível (REYNOLDS, 1883).

Para Sistemas de Bombeamento como o que é analisado neste trabalho, são considerados tubulações de seção circular e limite de transição entre o escoamento laminar e turbulento como 2300.

A rugosidade relativa ( $R_r$ ) é encontrada a partir da relação contida na equação (5), no qual o parâmetro  $k$  pode ser obtido através da tabela mostrada na tabela 1, esse valor será utilizado como informação de entrada no Diagrama de Moody para determinar o fator de atrito (MAUAD, 2020).

$$R_r = \frac{k}{D}; \quad (5)$$

Sendo:

$D$  = diâmetro da tubulação [m];

$k$  = rugosidade absoluta da tubulação [m];

Tabela 1 - Rugosidade para diversos materiais.

<b>MATERIAL</b>	<b>Rugosidade Absoluta [mm]</b>
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,40
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6

Aço ou ferro galvanizado	0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,3
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido com cimento centrifugado (uso)	0,10
Ferro fundido com cimento revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de serviço	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC.	0,0015

Fonte: MAUAD (2020).

Para o cálculo da perda de carga, primeiramente se faz necessário o cálculo do diâmetro da tubulação, que se dá em razão da vazão requerida e velocidade de escoamento do fluido, conforme equação (6):

$$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{V \cdot \pi}} \quad (6)$$

Sendo:

Q = vazão solicitada pelo sistema [m<sup>3</sup>/s];

V = velocidade de escoamento do fluido [m/s];

Após o cálculo do diâmetro da tubulação, calcula-se o número de Reynolds (adimensional) através da equação (7).

$$Re = \frac{(V \cdot D)}{\nu} \quad (7)$$

Sendo:

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ ;

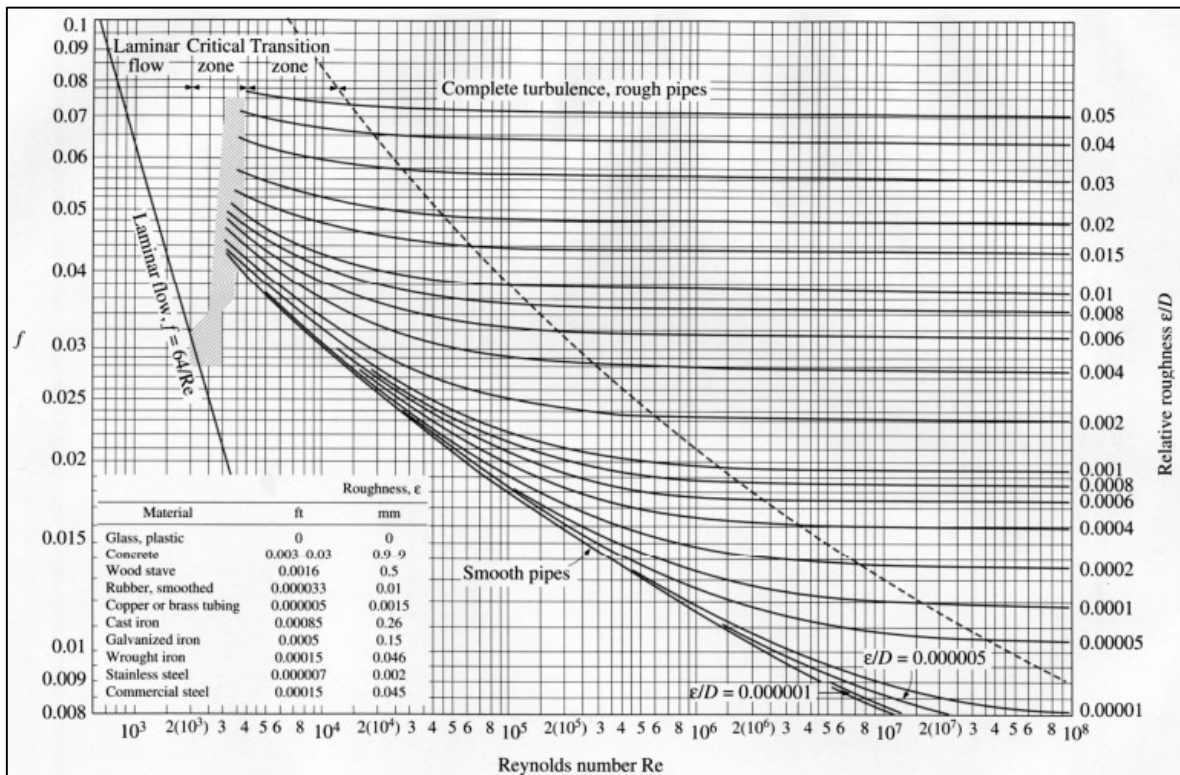
V = velocidade de escoamento do fluido [m/s];

D = diâmetro da tubulação [m];

### 2.3.2.2 Fator de atrito – Diagrama de Moody

O fator de atrito é um parâmetro adimensional utilizado para o cálculo da perda de carga em uma tubulação. Para encontrar o fator de atrito, utiliza-se o diagrama de Moody (figura 8), este em escala logarítmica em função da rugosidade relativa da tubulação, fator de atrito e número de Reynolds (SCHIAVI, 2013).

Figura 8 - Diagrama de Moody.



Fonte: FOX (2018).

Para o cálculo da Perda de Carga, tem-se diversas experiências realizadas para o desenvolvimento das fórmulas, podendo-se concentrar, principalmente, nos trabalhos realizados por Hazen-Williams e Darcy-Weisbach.

Método de Hazen-Williams: amplamente utilizado em redes de saneamento para o transporte de água e esgoto e com diâmetros de tubulação maiores que 50 mm, a Perda de Carga para esse método é calculada conforme equação (8):

$$h = L \times \frac{10,641}{C^{1,85}} \times \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}}; \quad (8)$$

Sendo:

$h$  = perda de carga [m];

$L$  = comprimento da tubulação [m];

$Q$  = vazão [ $m^3/s$ ];

$C$  = coeficiente do material da fabricação do tubo e condição de paredes internas (Tabela 2);

$D$  = diâmetro da tubulação [m];

Tabela 2 - Coeficiente para cálculo da perda de Carga Método de Hazen-Wiliams.

<b>Tipo de Tubo</b>	<b>C</b>
Aço soldado - até 30 anos de uso	75
Aço soldado - até 20 anos de uso	90
Ferro fundido usado	90
Ferro fundido com até 15 anos de uso	100
Aço galvanizado usado	100
Cobre e latão	130
PVC - até 75 mm de diâmetro	125
PVC - até 100 mm de diâmetro	135
PVC - maior que 100 mm de diâmetro	140

Fonte: O autor (2022).

Método de Darcy-Weisbach: este método é universal, utilizado para qualquer diâmetro de tubulação, material e fluido e pode ser calculado através da equação (9):

$$h = \frac{f \times L \times V^2}{D \times 2 \times g} \quad (9)$$

Sendo,

$h$  = perda de carga [m];

$L$  = comprimento da tubulação [m];

$D$  = diâmetro da tubulação [m];

$V$  = velocidade de escoamento do fluido [m/s];

$g$  = aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];

$f$  = fator de atrito – extraído do Diagrama de Moody;

Na parte experimental desse trabalho, como a análise foi feita somente na bomba, não se fará necessária a utilização dos parâmetros explicados acima que compõe o projeto de um sistema de bombeamento, apenas os dados da bomba isoladamente.

## 2.4 MOTORES ELÉTRICOS

De acordo com Abdelsalam (2022), a vasta maioria das bombas centrífugas para sistemas de bombeamento de água que são aplicados num amplo segmento de indústrias e sistemas de saneamento são acionadas por motores de indução trifásicos.

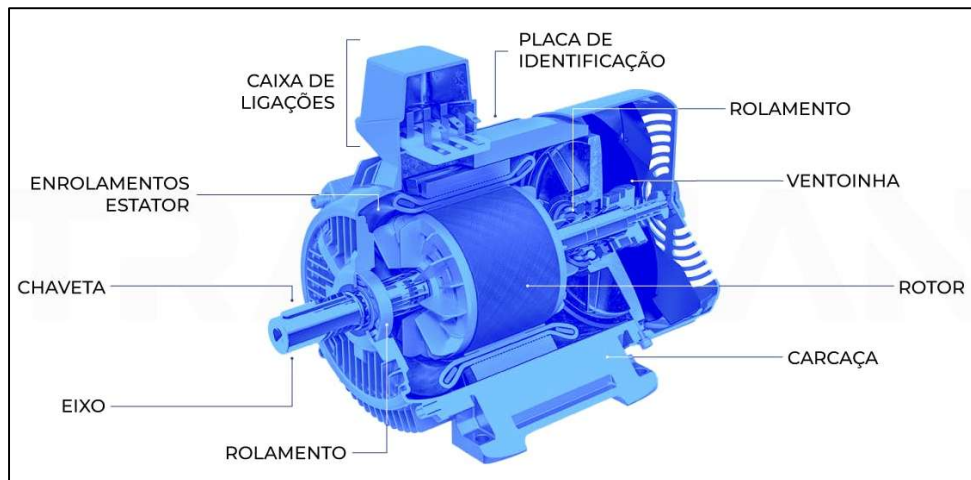
Motores elétricos, figuras 9 e 10, são equipamentos muito utilizado na indústria para diversas aplicações como bombas e pontes rolantes devido ao seu potencial de redução de energia elétrica quando comparado com outras fontes de geração de energia.

O projeto bem elaborado para a instalação de um motor elétrico garante que seu funcionamento de acordo com a vida útil proposta para o equipamento e evita custos desnecessários, avarias precoces no motor, baixa produtividade e baixo fator de potência. Nesse tópico será explanado sobre o motor elétrico de indução trifásico, pois é o utilizado no experimento deste trabalho e o mais utilizado na atualidade.

Muitas características para a escolha correta de um motor de indução trifásico são descritas em normas, nacionais e internacionais, como, por exemplo, NBR 15626/2008 e VDE 530.

Ainda tratando-se da redução do consumo de energia elétrica, busca-se também o controle de velocidade dos motores elétricos, podendo ser variação do escorregamento, do número de polos e, para este caso, a variação da frequência de variação da alimentação de energia elétrica, buscando-se, por fim, o consumo eficiente de energia elétrica (PROCEL, 2002). Essa variação da frequência faz-se por meio da utilização de Inversores de Frequência, equipamento este que chega a valores até cinco vezes menores que o custo do motor elétrico trifásico em utilização e que funciona modificando a rotação do motor e alterando a frequência de alimentação dos motores elétricos trifásicos de corrente contínua.

Figura 9 – Vista em corte de um motor elétrico.



Fonte: TRACTIAN (2022).

Figura 10 - Exemplo de motor elétrico disponível no mercado.

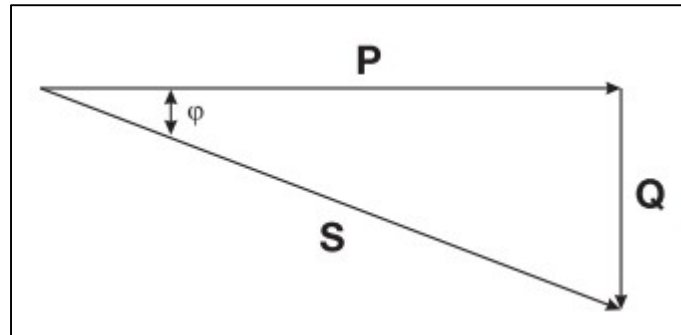


Fonte: WEG (2022).

Outro importante fator nos motores elétricos de indução é o fator de potência. Fator de Potência é um parâmetro para calcular a eficiência elétrica de um motor elétrico, sendo o cosseno do ângulo entre a potência aparente ( $S$ ) que corresponde à potência caso não houvesse defasagem de corrente e a potência ativa ( $P$ ) que realiza trabalho, conforme figura 11.

Quanto maior o fator de potência, maior a disponibilidade de potência ativa e, conseqüentemente, melhor o aproveitamento de energia elétrica no sistema elétrico brasileiro.

Figura 11 - Características da bomba utilizada no ensaio.



Fonte: WEG (2021).

## 2.5 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Inversores de frequência (figura 8), são equipamentos eletrônicos com que tem como função o controle da velocidade e torque de um motor elétrico, promovendo variação da tensão e frequência que é fornecida para o motor, possibilitando que o motor trabalhe em diferentes velocidades e sem a necessidade da utilização de válvulas de controle e possuem ampla aplicação na indústria devido ao seu relativo baixo custo e reduções em larga escala do consumo de energia elétrica, que é o objetivo central deste trabalho (VALER, 2016).

O Brasil utiliza rede elétrica com frequência padrão de 60 Hz, portanto o inversor de frequência é um equipamento de grande valia, pois a frequência padrão é diretamente proporcional a velocidade do motor e se torna útil no controle das variações. Com o controle do motor trifásico através da utilização do inversor de frequência, tem-se benefícios como redução dos picos de corrente na partida, baixo custo de instalação (em média 30% do valor do equipamento) e, principalmente, redução da energia elétrica consumida no processo. Consequentemente, essas variações influenciam diretamente na curva da bomba utilizada.

Figura 12 - Exemplo de inversor de frequência disponível no mercado.



Fonte: WEG (2022).

## 2.6 ENGENHARIA ECONÔMICA

O tópico presente tem como objetivo central avaliar a implementação do Inversor de Frequência sob a ótica financeira, tendo seu foco principal como a avaliação do *payback* da instalação do equipamento.

A Engenharia Econômica trata da área de conhecimento responsável por unir questões de engenharia e economia buscando balizar a tomada de decisões estratégicas para avaliar a viabilidade ou não da aplicação de um determinado projeto, compra ou construção sob o ponto de vista de rentabilidade e retorno do investimento realizado através de técnicas matemáticas para estimar resultados. Busca-se também aperfeiçoar processos e ter como consequência ganhos relativos à eficiência e produtividade.

Tratando-se de um importante aspecto no mercado hoje, na busca por processos controlados e redução de custo de uma forma geral, é importante que a implementação de um novo equipamento esteja coerente com essa estratégia e, na formulação da instalação de um novo equipamento, sua projeção de retorno seja clara para avaliar a viabilidade do projeto nos quesitos que este trabalho apresenta, ou seja, análise técnica e financeira para ser considerado um benefício tangível.

A simulação será feita a partir da hipótese de um empréstimo no valor total do equipamento e mão de obra necessária para sua instalação e um valor pago por mês com a aplicação da taxa de juros definida e terá a decisão da viabilidade da instalação do equipamento e o pagamento à vista, seguindo os tópicos abaixo:

- Necessidade de capital para o investimento;
- Estimativa de custos;
- Taxas de retorno;
- Tempo estimado para o retorno do investimento.

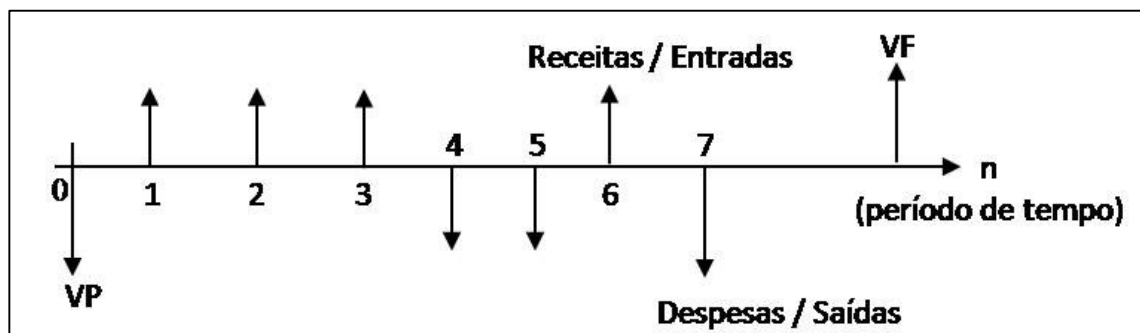
Para a hipótese definida, será considerado o modelo SPC (Sistemas de Pagamentos Constantes), o qual determinado valor  $P$  é financiado para ser pago em quantias uniformes, num período  $n$  de meses (HIRSCHFELD, 1998).

Benefício tangível pode ser considerado como o tipo de situação em que os valores econômicos podem ser expressos objetivamente e sem apresentar dificuldades, seguindo um raciocínio simples e que todas as variáveis possam ser descritas com austeridade.

Para a aplicação deste trabalho, parte-se do pressuposto que a instituição que está fazendo o empréstimo para a aquisição do equipamento possua fluxo de caixa para que seja viabilizado a aplicação do equipamento na unidade de bombeamento.

Fluxo de caixa caracteriza-se pelo conjunto de entradas e saídas de dinheiro de uma indústria, estabelecimento, empresa, etc ao longo de um período de tempo e pode ser representado na Figura 13:

Figura 13 - Representação de fluxo de caixa.



Fonte: VENDA MUITO MAIS (2022).

Será analisado o equipamento em 2 cenários de aquisição: à vista e com juros compostos.

Juros compostos: é a categoria que se baseia na soma dos juros de um período determinado com o capital atual, tornando-se um novo capital para o cálculo do período seguinte, seguindo desse modo até o fim do período total.

Juro = compensação em dinheiro feita pelo uso de um determinado capital, a uma taxa pré-definida por um determinado intervalo de tempo calculado;

VP = Valor presente = também denominado de capital, é o valor que se põe a render com os juros;

Taxa de Juros = razão final entre os juros pagos ao final do período de tempo e o capital disponibilizado inicialmente (sempre é relacionada com uma unidade de tempo sendo, neste trabalho, em meses);

Para o caso dos juros compostos, calculado através do software Excel de forma iterativa, a partir das informações inseridas para taxa de juros constante, pagamento feito por período e valor presente, retorna-se, para esse problema, a quantidade de meses necessários para pagamento total do investimento feito para os pagamentos constantes.

O equacionamento para a projeção iterativa do retorno será dado pela equação (10);

$$U = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

Sendo:

$i$  = taxa de juros para o período de amortização – para a aplicação deste trabalho será considerada como taxa de juros por mês;

$n$  = número de períodos de amortização – para esta aplicação será o número de meses necessários para que o equipamento seja pago integralmente;

$U$  = valor de cada contribuição para uma série uniforme de pagamento, que será a saída  $n$  após a definição de todos os parâmetros de entrada.

### 3 ESQUEMA DO EXPERIMENTO (METODOLOGIA)

Este trabalho tem como uma das suas principais preocupações a aplicação prática desse tipo de equipamento em diversos segmentos industriais, acometidos de sistemas superdimensionados com coeficientes de segurança significativamente altos (gerando baixa potência nominal e redução de rendimento) ou sistemas manuais de controle via válvula, causando diversos tipos desperdícios, como de energia elétrica, perda de carga, demanda por equipamentos maiores para suprir o alto consumo de equipamentos superdimensionados, etc.

Faixas de operação inferiores a 75% para motores trifásicos implicam em significativa redução de desempenho operacional, tendo, portanto, faixas ideais de operação de, no mínimo, 75%.

#### 3.1 EXPERIMENTO

Tabela 3: Dados da bomba.

<b>Dados do Experimento</b>	
Modelo da Bomba	KSB 150-26
Ano de fabricação	1974
Q	360 m <sup>3</sup> /h
Hm	20 mca
n (rotações)	1750 rpm
Rendimento do motor elétrico	89,5%
Fator de potência do motor = $\cos \varphi$	0,78

Fonte: O autor (2023)

As informações do catálogo técnico da bomba estão na tabela 3 e no Anexo A e, para as faixas de vazão utilizadas nesse experimento, o rendimento da bomba varia entre 60-75%, dependendo da rotação de cada vazão definida, conforme tabela 4:

Tabela 4: Faixas de rendimento para as vazões analisadas

<b>Faixas de rendimento (<math>\eta</math>)</b>	
Medida 1	75%
Medida 2	70%
Medida 3	65%
Medida 4	60%

Fonte: O autor (2023)

Para esse experimento, utilizou-se quatro vazões, conforme tabela 5:

Tabela 5: Faixas de vazão do experimento.

Faixas de vazão	
Q1	126 m <sup>3</sup> /h
Q2	144 m <sup>3</sup> /h
Q3	153 m <sup>3</sup> /h
Q4	179,7 m <sup>3</sup> /h

Fonte: O autor (2023).

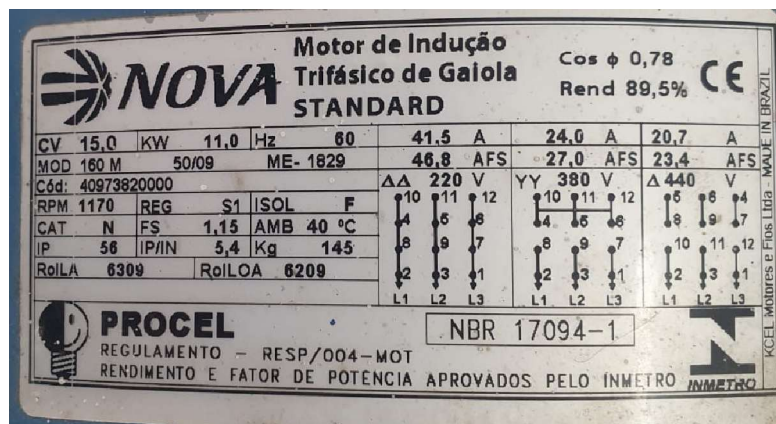
As imagens dos equipamentos utilizados neste experimento estão no nas Figuras 14, 15, 16, 17, 18 e 19.

Figura 14 - Características da bomba utilizada no ensaio.



Fonte: O autor (2022).

Figura 15 - Características do motor de indução utilizado no ensaio.



Fonte: o autor (2022).

Figura 16 - Sistema de bombeamento utilizado no ensaio.



Fonte: O autor (2022).

Figura 17 - Características do Inversor de Frequências utilizado no ensaio.



Fonte: O autor (2022).

Figura 18 - Painel do medidor de vazão utilizado no ensaio.



Fonte: O autor (2022).

Figura 19 - Painel do Inversor de Frequências utilizado no ensaio.



Fonte: O autor (2022).

## 4 RESULTADOS

Os resultados obtidos no ensaio são os que seguem abaixo:

Roteiro simplificado deste experimento:

1. Foram definidas as faixas de vazão de operação para o experimento, variando entre 126 m<sup>3</sup>/h e 179,7 m<sup>3</sup>/h;
2. Definidos os dois métodos de análise para os pontos de operação, primeiramente utilizado válvula e, secundamente, o inversor de frequências para acionamento do sistema;
3. Coleta dos dados de rotação e corrente para cada um dos casos;
4. Coleta e análise da potência consumida pela válvula e pelo inversor de frequências, representado na tabela 6.

Tabela 6 - Valores obtidos no experimento.

<b>Medida</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Rotação [rpm]</b>	1170	1020	970	870
<b>Vazão [m<sup>3</sup>/h]</b>	179,7	153	144	126
<b>Vazão [m<sup>3</sup>/s]</b>	0,050	0,043	0,040	0,035
<b>Corrente Válvula [A]</b>	26,7	26,5	26,3	25,9
<b>Corrente Inversor de Frequência [A]</b>	26,7	23,3	22,3	20,7
<b>Potência Motriz da Válvula [kW]</b>	7,10	7,05	7,00	6,89
<b>Potência Motriz Inversor de Frequência [kW]</b>	7,10	6,20	5,93	5,51
<b>Percentual de Redução da Potência Elétrica</b>	0%	14%	18%	25%
<b>Redução da Potência Elétrica [kW]</b>	0,00	0,85	1,06	1,38

Fonte: O autor (2022).

A conversão das medidas de vazão de [m<sup>3</sup>/h] para [m<sup>3</sup>/s] serão feitas dividindo a vazão em [m<sup>3</sup>/h] por 3600, quantidade de segundos em 1 hora.

Como mostrado no tópico 2.3 deste trabalho, este experimento foi realizado apenas na bomba, portanto, a Altura Manométrica será calculada através da equação abaixo:

$$H = \frac{P \times \eta}{\gamma \times Q}; \quad (04)$$

No qual,

P = potência motriz [kW];

$\gamma$  = peso específico da água [kg/m<sup>3</sup>];

Q = vazão [m<sup>3</sup>/s];

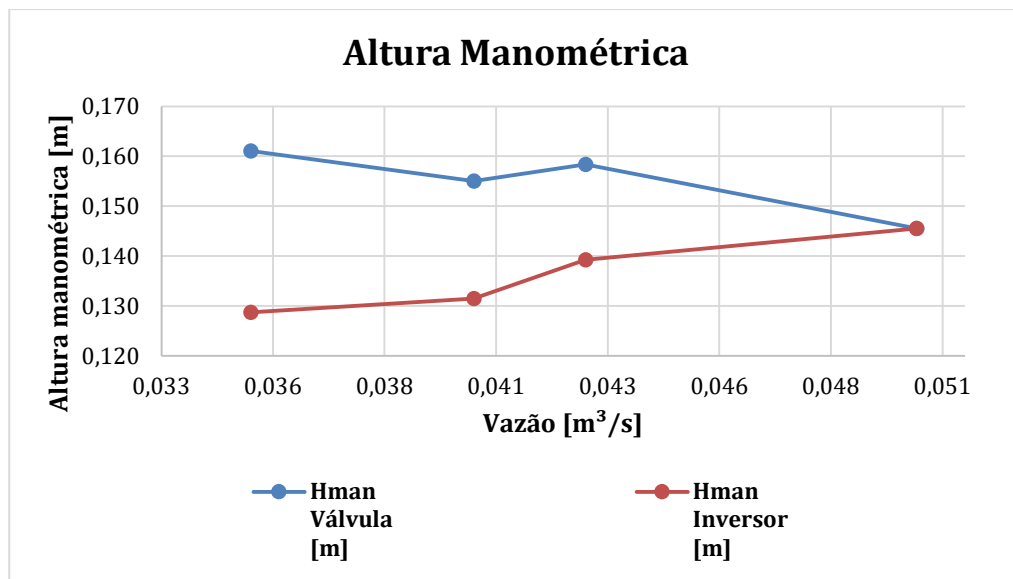
H = altura manométrica [m];

$\eta$  = rendimento da bomba [%];

Para cada um dos dispositivos utilizados (válvula e inversor de frequência), utilizando a equação (04), pode-se traçar os gráficos com cada respectiva curva característica do sistema.

O gráfico apresentado na figura 20 relaciona os dados do sistema, sendo: vazão como variável de entrada e Altura Manométrica como variável de saída a partir dos valores inseridos de potência, rendimento da bomba para cada faixa de vazão (Anexo A), peso específico da água e vazão.

Figura 20 - Altura manométrica para válvula e inversor de frequência



Fonte: O autor (2023).

Para o experimento, pode-se avaliar que:

A equação de potência indica que a altura manométrica tem influência direta sobre a potência consumida pelo sistema, dessa forma, avaliando os gráficos experimentais do sistema, pode-se observar que para o primeiro sistema via válvula, à medida que a vazão diminui, a altura manométrica aumenta, enquanto que para o segundo sistema avaliando, utilizando Inversor de Frequências, a altura manométrica diminui, diminuindo a potência consumida e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade de energia elétrica utilizada.

#### 4.1 CÁLCULO DOS CONSUMOS

Tabela 7 - Tarifa de Energia Elétrica.

MODALIDADE TARIFÁRIA	SUBGRUPOS					
	A4 (2,3 a 25 kV)			AS (Subterrâneo)		
	Tarifa de uso do Sistema de Distribuição (TUSD)		Tarifa de Energia (TE)	Tarifa de uso do Sistema de Distribuição (TUSD)		Tarifa de Energia (TE)
	Demanda [R\$/kW]	Energia [R\$/kWh]	Energia [R\$/kWh]	Demanda [R\$/kW]	Energia [R\$/kWh]	Energia [R\$/kWh]
TARIFA HORÁRIO AZUL						
Ponta	31,00	0,1119	0,39208	77,6	0,14926	0,39208
Fora ponta	18,82	0,1119	0,2485	14,17	0,14926	0,2485
Ultrapassagem de demanda ponta	62,00	-	-	155,2	-	-
Ultrapassagem de demanda fora ponta	37,64	-	-	28,34	-	-
Energia reativa excedente	18,82	-	0,26046	14,17	-	-

Fonte: ENEL (2022).

Analisando com a tarifa média calculada, temos, para a categoria A4, conforme tabela 7:

- CP = Consumo Ponta;
  - $CP = R\$ 0,119/kWh + R\$ 0,39208/kWh$ 
    - $CP = R\$ 0,51108/kWh$ ;
- CFP = Consumo Fora de Ponta;
  - $CFP = R\$ 0,119/kWh + R\$ 0,24850/kWh$ 
    - $CFP = R\$ 0,3604/kWh$ ;

Será considerado, portanto, para o equipamento com funcionamento ininterrupto:

- HP = Horas de Ponta;
  - HP = 22 dias x 3 horas/dia;
    - HP = 66 horas/mês;
- HFP = Horas Fora de Ponta;
  - HFP = 22 dias x 21 horas (dias da semana) + 8 x 24 (finais de semana);
    - HFP = 654 horas/mês;

Sendo, horas de ponta o período do dia em que a carga do sistema nacional interligado é mais elevada, sendo sempre de 3 horas consecutivas. Portanto, tem-se 3 horas por dia em horário de ponta e 21 horas fora do horário de ponta.

Assim, o custo final por mês por equipamento será composto pela soma entre a quantidade de horas na ponta multiplicado pelo valor de consumo na ponta e a quantidade de horas fora da ponta multiplicado pelo valor de consumo fora de ponta, ambos multiplicados pela potência ( $P_{v\grave{a}lvula}$  e  $P_{inversor}$ ) de cada equipamento, portanto tem-se as equações (11) e (12):

$$\text{Consumo V\acute{a}lvula} = (HP \times P_{v\grave{a}lvula} \times CP) + (HFP \times P_{v\grave{a}lvula} \times CFP); \quad (11)$$

$$\text{Consumo Inversor} = (HP \times P_{inversor} \times CP) + (HFP + P_{inversor} \times CFP); \quad (12)$$

Após os cálculos, chega-se na tabela 8, com a economia entre equipamentos para cada faixa de vazão e a economia entre um equipamento e outro, representada pela diferença entre o valor do consumo mensal da válvula e o consumo mensal do inversor de frequência.

Tabela 8 - Cálculos de potência e economia para cada um dos sistemas.

Medida	Vazão [m³/h]	Potência Motriz da Válvula [kW]	Potência Motriz Inversor de Frequência [kW]	R\$/mês VÁLVULA	R\$/mês INVERSOR	Economia/ mês
1	179,7	7,1025	7,1025	R\$ 1.910,32	R\$ 1.910,32	R\$ -
2	153	7,0493	6,1981	R\$ 1.896,01	R\$ 1.667,06	R\$ 228,95
3	144	6,9961	5,9321	R\$ 1.881,70	R\$ 1.595,51	R\$ 286,19
4	126	6,8897	5,5064	R\$ 1.853,08	R\$ 1.481,04	R\$ 372,05

Fonte: O autor (2023).

Para esse estudo, não será considerado a demanda de energia pois o equipamento (válvula ou inversor de frequências) faz parte de um cenário maior (redes de saneamento, custos totais de energia elétrica de uma indústria, etc).

A tabela abaixo indica a potência consumida para cada um dos sistemas analisados e a economia por mês de cada um dos equipamentos, sendo a economia calculada como a diferença entre o valor gasto por mês com a válvula e o valor gasto por mês com o Inversor de Frequência.

Cotação do Inversor de Frequência utilizado no ensaio (WEG CFW09), baseado na média entre 3 cotações, é de R\$ 4442,85.

Para as faixas de vazão trabalhadas neste experimento, pode-se encontrar uma redução de custo de 25,12% para a faixa mais baixa de vazão.

Custo de aplicação para esse tipo de equipamento é de, em média, 30% do custo do equipamento, sendo o investimento total (sem juros) de R\$ 5.775,70.

## 4.2 AVALIAÇÃO DO PAYBACK

Seguindo os tópicos abordados no item 2.6, temos:

- Custo de aplicação do equipamento: R\$ 5775,70;
- Payback composto com juros de 1% ao mês e pagamentos mensais no valor de R\$ 350,00 = 18,1 meses = 1,5 ano.

Considerando que o tempo de vida útil de um inversor de frequências é de 20 anos, tem-se 18,5 anos e meio de custos evitados com energia elétrica, podendo esse dinheiro alocado para outros objetivos/investimentos.

Considerando o investimento feito em condições de pagamento à vista para aquisição e instalação do equipamento, tem-se o retorno do investimento em 15,5 meses = 1,3 ano.

## 5 CONCLUSÃO

Conforme avaliado no experimento realizado, pode-se avaliar diversos benefícios para a instalação do inversor de frequência como alternativa em sistemas convencionais de bombeamento para busca de redução de custo. Entre elas, podemos citar a melhoria nos controles de pressão e fluxos do processo, economia de energia como principal fonte de redução de custo, eliminação de válvulas no processo e suas consequências como perda de carga, melhoria do rendimento da bomba utilizada no processo, baixo custo de manutenção, mudanças nas curvas da bomba e seus respectivos impactos na altura manométrica total e redução da pressão dinâmica.

Para o estudo prático realizado em laboratório, foi possível avaliar neste trabalho, a economia de R\$372,05 por mês em energia elétrica com a utilização do inversor de frequência para a faixa mais baixa de vazão. Dessa forma, a estimativa de payback do equipamento é em torno de 18 meses no máximo para as condições avaliadas. Avaliando-se os resultados do experimento, é possível concluir que, quando aplicado para baixas faixas de vazão, o inversor de frequência é um equipamento que apresenta excelente viabilidade de aplicação, tendo o retorno investimento em, no máximo, 18 meses e os demais meses serão de custos evitados dado a vida útil do equipamento.

Essa estimativa de payback é coerente com as principais estratégias aplicadas nas empresas hoje para instalação de novos projetos e equipamentos, as quais buscam essas instalações de forma que o valor investido tenha um retorno de, no máximo, dois anos.

## REFERÊNCIAS

ABDELSALAM, A. Improving energy efficiency and economics of motor-pump-system using electric variable-speed drives for automatic transition of working points. **Computers & Electrical Engineering**, Amsterdam, v. 97, n. 6, p. 107607, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045790621005413>. Acesso em: 10 jan. 2023.

CAMARGO M. **O erro mais comum na hora de especificar uma bomba centrífuga**. Itajubá: Engenharia & Cia, [2020]. Disponível em: <https://www.engenhariaecia.eng.br/post/o-erro-mais-comum-na-hora-de-especificar-uma-bomba-centrifuga#:~:text=A%20perda%20de%20carga%2C%20por,parte%20mais%20chatinha%20do%20c%C3%A1lculo>. Acesso em: 22 dez. 2022.

CHAODONG, T.; FENG, Z. Review of variable speed drive technology in beam pumping units for energy-saving. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 6, p. 2676-2688, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720313305>. Acesso em: 15 dez. 2022.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA – EEL/USP. **Diagrama de Moody**. Lorena: Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, [s.d.]. Disponível em: <http://www.dequi.eel.usp.br/~lmguiaraes/Diagrama%20de%20Moody.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022.

ENEL BRASIL. **Tabela de tarifas**. São Paulo: Enel, 2020. Disponível em: [https://www.enel.com.br/.../Corporativo\\_e\\_Governo/tabela-de-tarifas.html](https://www.enel.com.br/.../Corporativo_e_Governo/tabela-de-tarifas.html). Acesso em: 06 dez. 2023.

ENEL. **Resolução homologatória nº 3053/2022 da ANEEL**: válidas a partir de 04 jul. 2022. Rio de Janeiro: ENEL, [2022]. Disponível em: [https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo\\_e\\_Governo/tabela-de-tarifas.html#](https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo_e_Governo/tabela-de-tarifas.html#). Acesso em: 29 nov. 2022.

FORTES, M. Z.; FONSECA, V. O uso de inversores de frequência para ajustes do ponto ótimo de operação em sistemas de bombeamento. *In*: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES E ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS, 46., 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABM, 2012. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/o-uso-de-inversores-de-frequncia-para-ajustesdo-ponto-timo-de-operao-em-sistemas-debombeamento>. Acesso em: 17 nov. 2022.

FOX, R. W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

GOMES, H.; CARVALHO, P. **Manual de sistemas de bombeamento**: eficiência energética. João Pessoa, PB: Editora Universitária – UFPB, 2012. Disponível em: [manual\\_sistemas\\_bombeamento\\_procel.pdf](manual_sistemas_bombeamento_procel.pdf) (mdr.gov.br). Acesso em: 29 nov. 2022.

LOPES, I. F. *et al.* Eficiência energética em sistemas motrizes industriais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 4., 2011, Juiz de Fora.

**Anais [...]**. Juiz de Fora, 2011. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/losim/congressos.php>. Acesso em: 17 nov. 2022.

**MÁQUINA FORT. Exemplo de motor elétrico disponível no mercado.** Taió: Máquina Fort, [2020]. Disponível em: <https://maquinafort.com.br/projects/motores-eletricos/>. Acesso em: 04 jan. 2023.

MARIANI, A. L. C. **Noções de mecânica dos fluidos.** 2017. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3030034/mod\\_resource/content/3/PME2033\\_Laminar\\_2012.pdf#:~:text=Comumente%20considera%2Dse%20que%20o,a%20viscosidade%20din%C3%A2mica%20do%20fluido](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3030034/mod_resource/content/3/PME2033_Laminar_2012.pdf#:~:text=Comumente%20considera%2Dse%20que%20o,a%20viscosidade%20din%C3%A2mica%20do%20fluido). Acesso em: 29 nov. 2022.

MAUAD, F. F.; BOLLELI, T. M. **Aula 3 - perda de carga.** 2020. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5626814/mod\\_resource/content/2/Aula%202%20%20%202808.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5626814/mod_resource/content/2/Aula%202%20%20%202808.pdf). Acesso em: 29 nov. 2022.

NATALE, F. **Automação industrial:** série brasileira de tecnologia. 10. ed. São Paulo: Érica, 2006.

RAKIBUZZMAN, M.; SUH, S. H. A study on multistage centrifugal pump performance characteristics for variable speed drive system. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 105, 2015, p. 270-275. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815009066>. Acesso em: 29 nov. 2022.

SCHIAVI, M. **Análise da viabilidade econômica na implantação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121099/000739894.pdf;sequence=1>. Acesso em: 07 dez. 2022.

SIEMENS LARGE DRIVES. Aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento. **Workshop sobre Eficiência Energética**, Brasília, DF, 31 maio 2006. Disponível em: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/APOSTILA\\_MH/InversorFrequencia\\_Siemens\\_BOMBAS.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/APOSTILA_MH/InversorFrequencia_Siemens_BOMBAS.pdf). Acesso em: 20 nov. 2022.

SIGHIERI, L.; NISHINARI, A. **Controle automático de processos industriais.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.

TRACTIAN. **Como funcionam os motores elétricos?.** São Paulo: Tractian, 2022. Disponível em: <https://tractian.com/blog/motores-eletricos-entenda-a-funcionalidade-desse-ativo..> Acesso em: 04 jan. 2023.

VALER, R.; MELENDEZ, T. Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v. 15, p. 20-26, 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138816000254>. Acesso em: 17 nov. 2022.

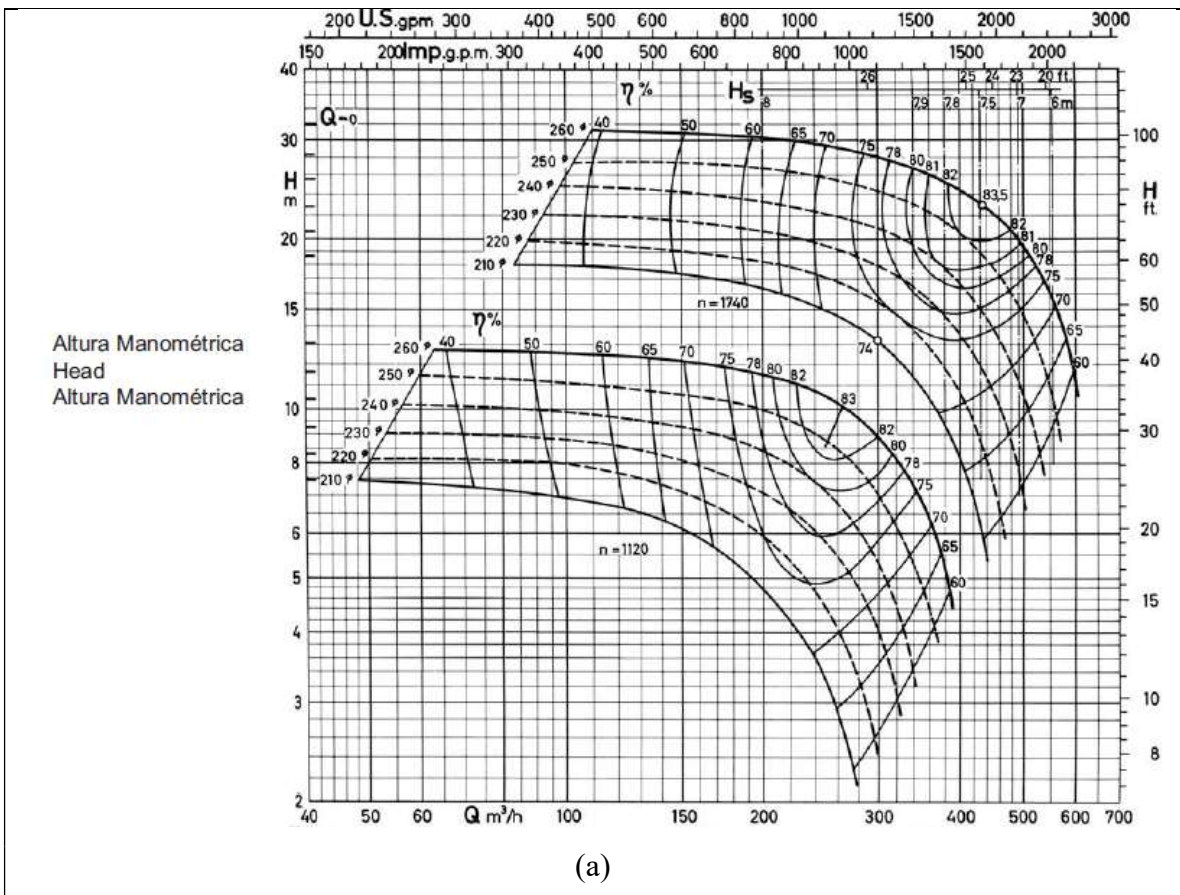
VENDA MUITO MAIS. **Decisão de investimento:** o que usar, TIR, payback ou VPL?. São Paulo: Venda Muito Mais, [2020]. Disponível em: <https://vendamuitomais.com.br/decisao-de-investimento-o-que-usar-tir-payback-ou-vpl/>. Acesso em: 9 jan. 2023.

WEG CFW09. **Exemplo de inversor de frequência disponível no mercado.** São Paulo: WEG CFW09, [2022]. Disponível em: [WEG-cfw700-programmieranleitung-10004067447-handuch-de.pdf](#). Acesso em: 28 dez. 2022.

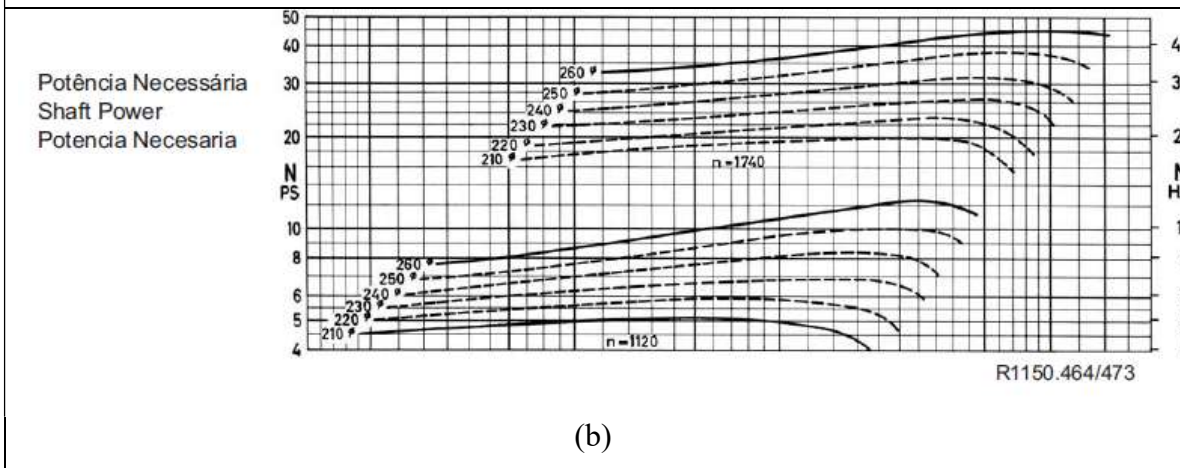
WEG. **Guia de especificações:** motores elétricos. Código 50032749, rev. 24, 2021. Disponível em: <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2022.

XINGCHENG, G.; JI, P. Application of intelligent methods in energy efficiency enhancement of pump system: a review. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 11592-11606, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722017401>. Acesso em: 12 dez. 2022.

ANEXO A – Catálogo da bomba utilizada no ensaio: a) Altura Manométrica, b) potência necessária.



(a)



(b)

Fonte: Catálogo bomba KSB ETA (sem ano).