



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA - DETEC
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MANOEL JOSE DE CARVALHO NETO

**APLICAÇÕES DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS:
UMA REVISÃO DE LITERATURA**

PAU DOS FERROS

2023

MANOEL JOSE DE CARVALHO NETO

**APLICAÇÕES DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS:
UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Bárbara Barbosa Tsuyuguchi

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Thiago Valério de Souza

PAU DOS FERROS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

CC331 Carvalho Neto, Manoel José de Carvalho Neto.
Netoa Aplicações do inversor de frequência em estações
 elevatórias: uma revisão de literatura / Manoel
 José de Carvalho Neto Carvalho Neto. - 2023.
 79 f. : il.

 Orientadora: Bárbara Barbosa Tsuyuguchi
 Tsuyuguchi.
 Coorientador: Pedro Thiago Valério de Souza
 Souza.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
 2023.

 1. Energia elétrica. 2. Custos de operação. 3.
 Eficiência energética. 4. Otimização. 5. Curvas
 características. I. Tsuyuguchi, Bárbara Barbosa
 Tsuyuguchi, orient. II. Souza, Pedro Thiago
 Valério de Souza, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MANOEL JOSÉ DE CARVALHO NETO

**APLICAÇÕES DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS:
UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

DEFENDIDA EM 11/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Bárbara Barbosa Tsuyuguchi

Prof. Dr. Alex Pinheiro Feitosa

Prof. Dr. Adelson Menezes Lima

*A minha querida mãe, a minha família, e
aos amigos que me apoiaram ao longo desta
caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e por toda força e determinação que ele me deu ao longo de toda a minha vida acadêmica. Agradeço a minha mãe, minha rainha, Maria Audeci de Carvalho por todo seu amor, carinho e pelo esforço que compartilhamos para chegar à mais uma etapa importante da minha vida, e a toda minha família que sempre me acolheu e apoiou ao longo dessa jornada.

Agradeço a minha amiga e orientadora, Profa. Dra. Bárbara Barbosa Tsuyuguchi, por ter se disponibilizado a contribuir com todo o desenvolvimento desse trabalho. Agradeço também por toda a sua paciência, responsabilidade, e compromisso como profissional educadora, e além de tudo, por ter despertado meu interesse pela área de Saneamento e abastecimento de água. Agradeço ao amigo, Prof. Dr. Pedro Thiago Valério de Souza, pela sua disponibilidade em ser coorientador, contribuindo para o aperfeiçoamento dos tópicos de eletrotécnica abordados ao longo deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora, e também amigos, Prof. Dr. Alex Pinheiro Feitosa e Prof. Dr. Adelson Menezes Lima, por dedicarem um pouco de seu tempo para o aperfeiçoamento deste trabalho, agradeço por todo o incentivo, pelas conversas e momentos de descontração que tivemos ao longo do curso. Agradeço a todos os professores a quem tive a honra de ser aluno, em especial a Glaydson Barros, Otávio Paulino, Marília Santiago, Leonardo Oliveira, Joel Medeiros, Wesley Santos, Alisson Gadelha, Sharon Dantas, Diego Farias, Josy Ramos, Sanderlir Dias, Matheus Fernandes, Daniel Jales, Adla Kellen, e Ernandes Costa. Obrigado a todos pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço aos muitos amigos que fiz ao longo da minha graduação, em especial, Rocílio Bessa, Gabryel Barros, Marcos Vinícios, Francisco Antônio, Isaac Ravanelle, Carlos Ramalho, Ingrid Miranda, Jeisse Marianne, Amanda Santiago, Cristina Carvalho, Tamires Lima, Matheus Andrade, João Paulo, Pedro Afonso, Pablo Roberto, Ronildo Marley, Henrique Almeida, Jonh David, Djalma Fontes, Franciele Oliveira, Jéssica Cibely, Kérlia Roberta, Ronielbe Avelino, Joyce Teodoro, Daiara Melquíades, Kauann Jácome, Ricassily Lima, Amanda Beatriz, Lucas Linhares, Paulo Neto, Ruan Santana, Bruno Fernandes, Bruna Fernandes, Kaio Alencar, Cássio Alencar, Gisele Tomé, Anderson Mendes, Heloísa Andrade, Ingrid Eduarda, Sara Rízia, Suyanne Brito, Wanessa França, Franklin Ayran, Kércia Nogueira, Michelly Lira, Gleycimara Torres, Áquila Figueredo, Glayson Costa e muitos outros. Muito obrigado pela amizade e por todos os momentos compartilhados. Agradeço a todos que, direto ou indiretamente contribuíram com a realização do meu objetivo. Muito obrigado a todos!

“Veio uma mulher de Samaria a tirar água. Jesus lhe disse: dá-me de beber.”

[João 4:7]

RESUMO

Os sistemas de abastecimento de água são responsáveis pela parcela mais significativa das despesas com energia elétrica nas empresas de saneamento, sendo necessário a implementação de novas tecnologias e equipamentos cada vez mais eficientes. Os conjuntos motobomba das estações elevatórias devem ser dimensionados de tal forma que, os custos de operação sejam os menores possíveis, como forma de reduzir o preço da tarifa final repassada aos consumidores. Para isso, é importante que se escolha uma bomba (ou conjunto de bombas), que apresente uma curva de desempenho hidráulico, o mais próximo possível do ponto de operação ótima do sistema, garantindo um alto rendimento energético no bombeamento. Este trabalho tem por objetivo elencar as principais vantagens da utilização de inversores de frequência nos conjuntos motobomba, para se obter ajustes do ponto ideal de operação, em função das variações horárias de vazão demandada nos SAA. O estudo foi feito em forma de revisão de literatura, apresentando resultados de alguns trabalhos, desenvolvidos por autores de referência na área de eficiência energética no setor de saneamento. Apresentados na seção de resultados e discussão, os estudos agregam informações acerca das características técnicas e operacionais, antes e depois da substituição de equipamentos como, válvulas reguladoras de pressão, sistemas de by-pass, dentre outros métodos de controle pouco eficientes do ponto de vista energético, frente a implantação dos inversores de frequência. Entre os resultados obtidos, o principal deles foi a significativa diminuição do consumo de energia por metro cúbico de água bombeado, além dos dados em relação ao retorno financeiro obtido após a otimização dos sistemas de bombeamento. Por fim, utilizando o *software* Excel®, foi desenvolvido uma planilha para obtenção de novas curvas características de uma família de bombas, simulando uma interface homem máquina ligada a um inversor de frequência.

Palavras-chave: Energia elétrica. Custos de operação. Eficiência energética. Otimização. Curvas características.

ABSTRACT

Water supply systems are responsible for the most significant portion of electricity expenses in sanitation companies, making it necessary to implement new technologies and increasingly efficient equipment. Pump sets at pumping stations must be sized in such a way that operating costs are as low as possible, as a way of reducing the price of the final tariff passed on to consumers. To achieve this, it is important to choose a pump (or set of pumps) that presents a hydraulic performance curve as close as possible to the system's optimal operating point, ensuring high energy efficiency during pumping. This work aims to list the main advantages of using frequency inverters in motor pump sets, to obtain adjustments of the ideal operating point, depending on the hourly variations in flow demanded in the SAA. The study was carried out in the form of a literature review, presenting results of some works, developed by leading authors in the area of energy efficiency in the sanitation sector. Presented in the results and discussion section, the studies add information about the technical and operational characteristics, before and after the replacement of equipment such as pressure regulating valves, bypass systems, among other control methods that are inefficient from the point of view. energy, given the implementation of frequency inverters. Among the results obtained, the main one was the significant reduction in energy consumption per cubic meter of water pumped, in addition to data regarding the financial return obtained after optimizing the pumping systems. Finally, using Excel® software, a spreadsheet was developed to obtain new characteristic curves for a family of pumps, simulating a human machine interface connected to a frequency inverter.

Keywords: Electricity. Operating costs. Energy efficiency. Optimization. Characteristic curves.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEE	Ações de Eficiência Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BHP	<i>Break Horse Power</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CMB	Conjunto Motor-Bomba
CV	Cavalo Vapor
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EEAB	Estação Elevatória de água Bruta
ETA	Estação de Tratamento de Água
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
ONU	Organização das Nações Unidas
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RPM	Rotações Por Minuto
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
UTS	Unidade de Tratamento Simplificado

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bomba centrífuga do tipo monobloco.	16
Figura 2: Conjunto motobomba do tipo mancal com luva de acoplamento.	16
Figura 3: Princípio de funcionamento das bombas centrífugas.	17
Figura 4: Tipos de Rotores.....	18
Figura 5: Instalação típica de bombeamento.	19
Figura 6: Curva típica de um sistema de Recalque.	21
Figura 7: Gráfico de cobertura hidráulica para famílias de bombas centrífugas de 1750 rpm.....	22
Figura 8: Curvas características para diferentes diâmetros de rotores de uma família de bombas.....	23
Figura 9: Representação da interseção entre a curva do sistema e as curvas características de uma família de bombas.	24
Figura 10: Curvas características de potência mecânica para diferentes diâmetros de rotores de uma família de bombas.	25
Figura 11: Forma de onda da tensão alternada, (a) monofásica e (b) trifásica.	29
Figura 12: (a) circuito com fator de potência unitário ($\cos\varphi = 1$), (b) fator de potência atrasado ($\cos\varphi < 1$), e (c) fator de potência adiantado ($\cos\varphi > 1$).	30
Figura 13: Evolução dos motores elétricos de indução.	31
Figura 14: Estator trifásico de um motor CA com os enrolamentos ligados em triângulo.	32
Figura 15: Produção do campo magnético girante no estator de um motor CA trifásico.	33
Figura 16: Vista em corte de um motor elétrico de indução e seus componentes.....	34
Figura 17: Informações contidas na plaqueta dos motores de indução.....	35
Figura 18: Relação entre a velocidade do campo magnético girante e a velocidade do rotor.	36
Figura 19: Triângulo das potências para um motor elétrico de indução.	39

Figura 20: Chave de acionamento do tipo partida direta.	41
Figura 21: Quadro elétrico de partida estrela-triângulo.	42
Figura 22: Autotransformador utilizado na partida por chave compensadora.	43
Figura 23: Quadro elétrico de uma chave de partida compensadora.....	44
Figura 24: <i>Soft Starters</i> para uso geral WEG.....	45
Figura 25: Métodos de partida de motores de indução trifásicos.	46
Figura 26: Comparativo entre os picos de corrente de alguns métodos de partida de motores de indução.....	46
Figura 27: Diagrama elétrico de um inversor de frequência trifásico.....	47
Figura 28: Motor elétrico de ímãs permanentes, projetado para ser acionado exclusivamente por inversor de frequência.....	48
Figura 29: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.	51
Figura 30: Captação do Booster Rio Verde.	53
Figura 31: Motores Booster Rio Verde.....	53
Figura 32: Demanda de ponta de 2017 a 2021 do Booster.....	54
Figura 33: Caixa de reunião, CMB e barrilete.	57
Figura 34: Bomba KSB Meganorm modelo 125-400.....	58
Figura 35: Motor WEG W22 Plus.	58
Figura 36: Válvula controladora de vazão.	59
Figura 37: Comparativo da relação energia por volume entre os dois sistemas.....	63
Figura 38: Sistema de Abastecimento de Água de Pirapama.....	65
Figura 39: Estação Elevatória de Água Bruta de Pirapama.	66
Figura 40: Variação da velocidade ao longo do dia.....	68
Figura 41: Variação do nível do reservatório ao longo do dia.....	68
Figura 42: Interface da planilha desenvolvida para variar as curvas características para determinada família de bombas.	69
Figura 43: Novas curvas características de altura manométrica (em azul) para frequência de 57 Hz e rotação de 1660 RPM.....	71

Figura 44: Curvas de potência (em vermelho) para frequência de 57 Hz e rotação de 1660 RPM.71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados do sistema Booster antes e depois do projeto.	55
Tabela 2: Resultados financeiros após instalação dos inversores.....	56
Tabela 3: Medições de vazão e pressão no estudo de caso.	60
Tabela 4: Medições de potência no estudo de caso.	61
Tabela 5: Medições de energia no estudo de caso.	62
Tabela 6: Resultado financeiro da substituição do sistema de partida.....	63
Tabela 7: Dados da Estação Elevatória de Pirapama.	67
Tabela 8: Resumo EE Pirapama.	69
Tabela 9: Dados das curvas características fornecidas pelo fabricante da bomba.	70
Tabela 10: Parâmetros de variação do sistema.....	70
Tabela 11: Dados das curvas características fornecidas pelo fabricante da bomba.	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE BOMBEAMENTO	15
3.1. Bombas Centrífugas	15
3.2. Princípio de funcionamento	17
3.3. Potência e rendimento dos conjuntos motobomba	18
3.4. Curvas características e ponto de operação	20
3.5. Métodos para obtenção de novas curvas características.....	25
3.6. Manobras rápidas e Golpe de aríete	27
4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE ELETROTÉCNICA	28
4.1. Potência elétrica e Lei de Ohm	28
4.2. Sistemas de corrente alternada trifásicos	29
4.3. Distribuição de energia elétrica.....	30
5. MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO.....	31
5.1. Princípio de funcionamento	32
5.2. Rotação nominal	35
5.3. Rendimento e fator de potência.....	37
6. ACIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS	40
6.1. Partida direta	40
6.2. Partida estrela-triângulo	41
6.3. Partida por chave compensadora.....	42
6.4. <i>Soft Starter</i>	44
6.5. Inversor de frequência	47
6.6. Aplicação do inversor de frequência para melhoria da eficiência energética nos sistemas de bombeamento	49
7. METODOLOGIA	50

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
8.1. Estudo de caso 1: sistema de eficiência energética através da implantação de inversores de frequência em estação elevatória tipo Booster na cidade de Rio Verde – GO (Dias; et al., 2022).....	52
8.2. Estudo de Caso 2: utilização de inversor de frequência para redução do consumo de energia na Unidade de Tratamento Simplificado (UTS) II do município de Palmas – TO (Cheren, 2016).....	56
8.3. Estudo de caso 3: Utilização de inversores de frequência para otimização da estação elevatória do Pirapama, município de Cabo de Santo Agostinho, região metropolitana de Recife – PE (Pedrosa, 2015).	64
8.4. Desenvolvimento de uma planilha para obtenção de novas curvas características para uma família de bombas.....	69
9. CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem precioso e indispensável a vida no planeta terra, além de servir como pilar de várias atividades humanas, como agricultura, pecuária, geração de energia, processos industriais, transporte, entre outros, e por esses motivos valor econômico. Em 2010 a Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU), por meio de sua Resolução nº 64/292, reconheceu o direito à água potável e limpa e o direito ao saneamento básico, como essenciais para se garantir uma qualidade de vida digna para todas as pessoas (Planalto, 2014). Os sistemas de abastecimento de água (SAA) são projetos de engenharia destinados a garantir a distribuição de água à população em geral e as indústrias, por isso devem ser projetados levando-se em consideração uma previsão futura de aumento de demanda.

As estações elevatórias de bombeamento estão presentes nas principais estruturas dos SAA para consumo humano, além das instalações de bombeamento prediais e de irrigação. As bombas são acionadas em sua totalidade por motores elétricos de indução trifásicos, alimentados em baixa ou média tensão. Os conjuntos motobomba são responsáveis pela maior parcela de energia elétrica consumida pelas empresas de saneamento, sendo de grande importância o correto dimensionamento das bombas e motores que vão operar em todas as etapas do SAA e também na coleta e tratamento de esgoto.

O dimensionamento das bombas deve ser feito de forma que, as mesmas operem dentro do ponto de operação ótimo e da faixa de maior rendimento global do conjunto. Em caso de sistemas com grande variação da demanda de consumo, deve-se procurar estratégias para otimização do consumo de energia (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992). Entre as principais ações que podem ser adotadas para redução do consumo de energia estão: estudo detalhado para redução da potência dos equipamentos caso seja possível, possibilidade de mudança do sistema tarifário junto às concessionárias de energia elétrica, e por último, implementar projetos de automação nas estações elevatórias (Tsutiya, 2006).

As tecnologias atuais empregadas na engenharia elétrica, permitiram a fabricação de motores de indução cada vez mais eficientes em relação ao consumo de energia e vida útil, mas isso de forma isolada não garante uma redução significativa no consumo de energia, pelas empresas de saneamento e a indústria em geral. Cerca de 30% dos motores instalados atualmente no Brasil, já possuem mais de 20 anos de operação, sendo que grande parte desse percentual já ultrapassa os 25 anos (WEG, 2021).

Ressalta-se, portanto, a importância do correto dimensionamento de bombas e motores elétricos, para garantir o máximo rendimento e economia de energia, nas estações elevatórias

de bombeamento, conseqüentemente proporcionando um menor custo final por metro cúbico bombeado aos consumidores. Diante disso, o presente trabalho abordará as vantagens da utilização de inversores de frequência, frente aos outros dispositivos de controle e operação existentes nas estações de bombeamento, comparando os custos com energia elétrica antes e depois da implantação dos dispositivos.

2. OBJETIVOS

- **GERAL**

- ✓ Analisar as principais vantagens da utilização de inversores de frequência para o acionamento e controle dos conjuntos motobomba em estações elevatórias de médio e grande porte.

- **ESPECÍFICOS**

- ✓ Expor os principais problemas existentes em sistemas de bombeamento, que podem ser solucionados com a utilização de inversores de frequência;
- ✓ Apresentar os princípios básicos de funcionamento das bombas centrífugas, as relações entre curvas características fornecidas pelos fabricantes, e a curva de um sistema de bombeamento;
- ✓ Apresentar alguns conceitos sobre eletrotécnica, o funcionamento de motores elétricos de indução, além dos métodos de partida e acionamentos mais utilizados;
- ✓ Demonstrar como a mudança de rotação de uma bomba centrífuga, simulando a utilização de um inversor de frequência, modifica suas curvas características de potência e altura manométrica.

3. ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE BOMBEAMENTO

Estações elevatórias são obras e instalações formadas por conjuntos motobomba e seus respectivos equipamentos e acessórios de funcionamento. Estão presentes em praticamente todos os locais e processos em que se necessita bombear água ou qualquer outro fluido. Adutoras, instalações prediais de água fria, instalações de combate a incêndio, estações de tratamento de água ou esgoto, dragagem, usinas de açúcar e etanol, refrigeração em processos industriais, entre outras são exemplos de aplicações em que se utilizam estações elevatórias.

O assunto “bombeamento” é bastante multidisciplinar, sendo os equipamentos objeto de aprofundamento nas disciplinas de engenharia mecânica (bombas) e engenharia elétrica (motores). Portanto é necessário que os profissionais envolvidos tenham conhecimentos superpostos de forma a poder trabalhar melhor em conjunto nos projetos de sistemas de bombeamento (Azevedo Netto; et al., 2015, p.257).

De acordo com Tsutiya (2006), as estações elevatórias são componentes fundamentais em todas as etapas do abastecimento de água, na captação, adução, tratamento e distribuição. O desenvolvimento de novas tecnologias em materiais e equipamentos eletro-mecânicos vem permitindo utilizar estações de bombeamento nos mais diversos tipos de projetos de transporte de água.

3.1. Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas são o tipo de bombas hidráulicas mais utilizadas, e “respondem por mais de 90% das aplicações, geralmente acionadas por motores elétricos” (Azevedo Netto; et al., 2015, p.270). “Com o advento da eletricidade e do motor elétrico, as bombas centrífugas passaram a ser preferidas devido ao maior rendimento, custo menor de instalação, operação e manutenção” (Tsutiya, 2006, p.227). As bombas são os principais componentes de uma estação elevatória, podem funcionar individualmente, ou associadas em série ou paralelo, além disso podem ser tipo monobloco (Figura 1) ou montadas em mancal (Figura 2).

Figura 1: Bomba centrífuga do tipo monobloco.



Fonte: Conab bombas 2023.

Figura 2: Conjunto motobomba do tipo mancal com luva de acoplamento.



Fonte: Excel bombas hidráulicas LTDA (2019).

As bombas do tipo mancal são mais versáteis do ponto de vista de manutenção, pois sua construção mecânica é totalmente separada do motor elétrico, permitindo que em caso de falhas na bomba ou motor, basta substituir um ou o outro, o que não acontece nos conjuntos monoblocos.

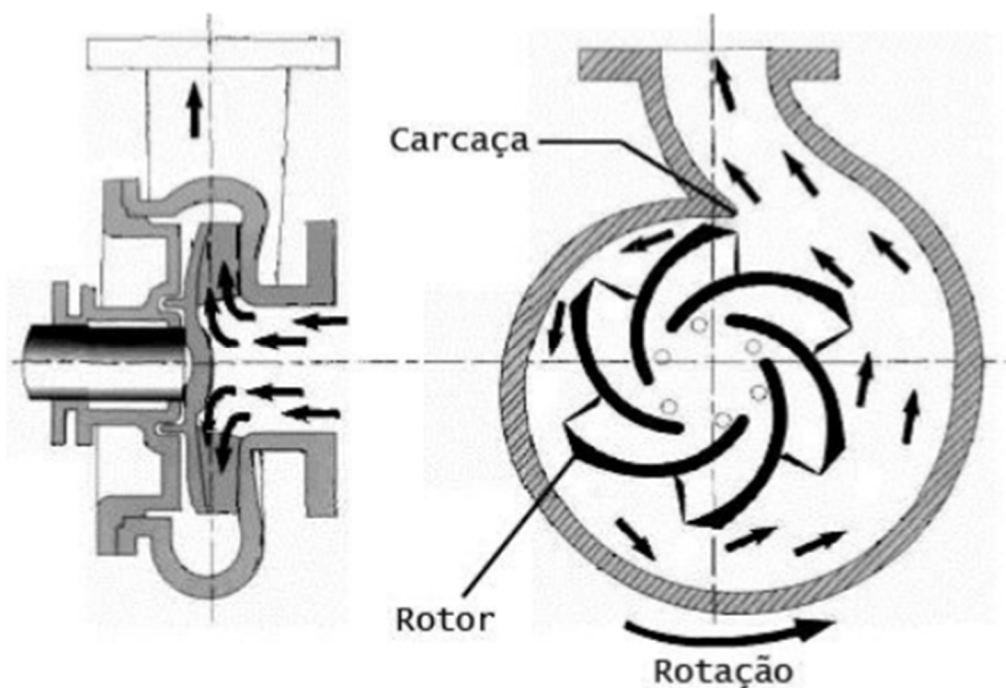
Dentre os principais fatores considerados para seleção dos conjuntos motobomba de uma estação elevatória, temos: escolha da melhor faixa de operação, proveniente da interseção entre a curva do sistema e a curva de operação da bomba; características e disponibilidade de diferentes modelos no mercado.

3.2. Princípio de funcionamento

Os principais componentes de uma bomba centrífuga são: carcaça, eixo, rotor, difusor, mancais, rolamentos, vedação (selo mecânico ou gaxeta) e pedestal. De acordo com Tsutiya (2006), as bombas centrífugas aceleram as partículas de fluido através do giro do rotor, fornecendo energia cinética que é convertida em pressão na saída do rotor, em direção ao difusor (Figura 3).

As pás do rotor impulsionam o líquido em direção à carcaça, proporcionando-lhe um acréscimo de pressão e velocidade. A carcaça que na maioria das vezes tem a forma de espiral, possui entre outras funções a de receber o líquido que sai do rotor, transformando parte de sua energia cinética em energia potencial de pressão (Tsutiya, 2006, p.227).

Figura 3: Princípio de funcionamento das bombas centrífugas.



Fonte: Gomes (2012).

O rotor é o principal componente da bomba. Pode ser do tipo aberto, semiaberto ou fechado (Figura 4), isso vai depender do tipo de líquido que vai ser bombeado, e além disso o número de rotores é o que vai classificar a bomba como simples ou multiestágio. “É o componente da bomba que transfere energia mecânica para o líquido em energia cinética. [...] Um rotor é projetado para fornecer uma vazão Q , contra uma altura manométrica H , girando a n rotações por minuto” (Tsutiya, 2006, p.228).

Figura 4: Tipos de Rotores.

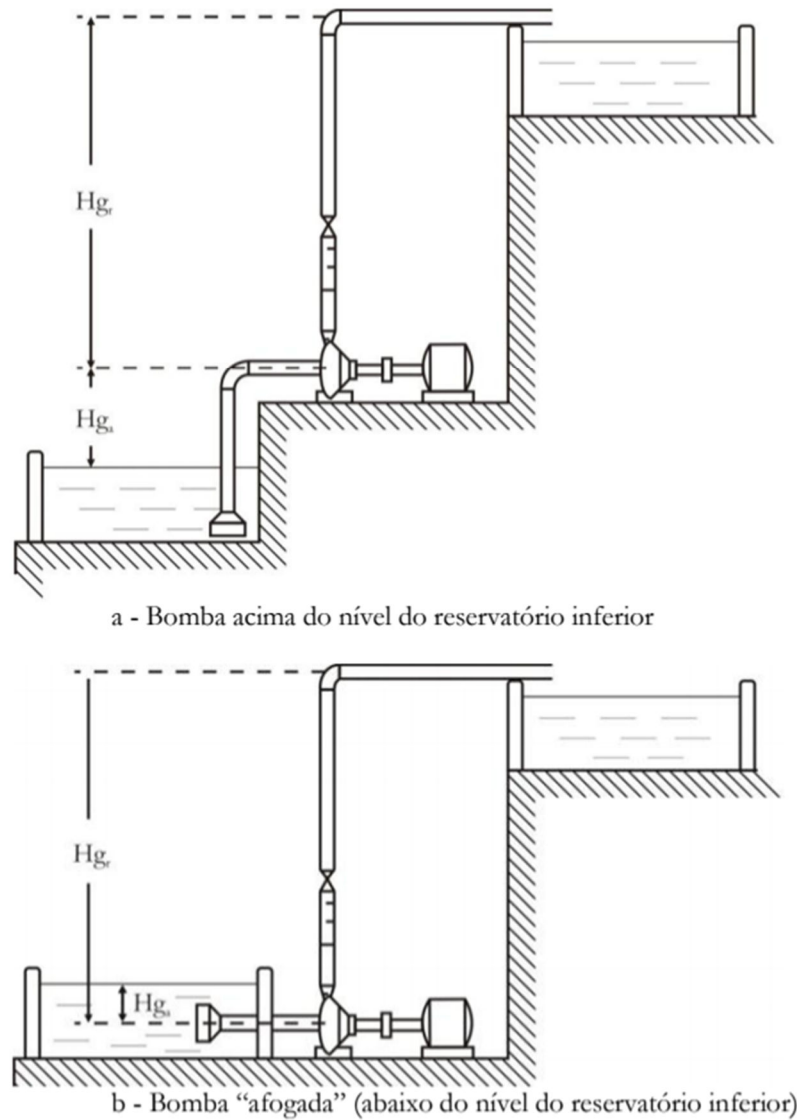


Fonte: Researchgate (2017).

3.3. Potência e rendimento dos conjuntos motobomba

A determinação da potência mínima de uma bomba é feita a partir da vazão demandada e sua altura manométrica necessária. A vazão de adução Q será calculada de acordo com o tipo de projeto de bombeamento. Para adutoras, “a vazão de adução é estabelecida em função da população a ser abastecida, da cota *per capita*, dos coeficientes de variação das vazões e do número de horas de funcionamento” (Tsutiya, 2006, p.158).

A altura manométrica H é a energia adicionada pela bomba ao escoamento, por unidade de peso de líquido bombeado, e pode ser obtida aplicando-se a equação da energia entre o nível do reservatório de sucção e local de descarga (Gomes, 2012). A bomba pode ter sucção acima do nível do reservatório (Figura 5a), ou sucção afogada (Figura 5b).

Figura 5: Instalação típica de bombeamento.

Fonte: Gomes (2012).

Assim, a altura manométrica (em metros) pode ser determinada pela seguinte equação:

$$H_m = H_{gs} + H_{gr} + H_{fs} + H_{fr} \quad (1)$$

Sendo:

H_{gs} é a altura geométrica de sucção;

H_{gr} é a altura geométrica de recalque;

H_{fs} é a perda de carga na sucção;

H_{fr} é a perda de carga no recalque;

Como as variações de nível nos reservatórios de sucção e recalque são muito pequenas, geralmente as cargas cinéticas podem ser desprezadas. As perdas de carga podem ser calculadas

pela equação universal de Darcy-Weisbach, ou pela equação de Hazen-Williams. Além disso, para o caso de sucção afogada (Figura 05b), a altura geométrica de sucção terá sinal negativo na Equação 1.

A potência da bomba (em cavalo-vapor) pode ser determinada pelo produto entre a altura manométrica, vazão e peso específico do líquido bombeado, por meio da equação 2.

$$P_{bomba} = \frac{1000 \cdot H_m \cdot Q}{75 \cdot \eta} \quad (2)$$

Sendo:

H_m é a altura manométrica total do sistema em metros;

Q é a vazão a ser bombeada em m³/s;

η é o rendimento do conjunto motobomba.

O rendimento global de um conjunto motobomba é o produto entre o rendimento do motor elétrico e o rendimento da bomba, definido pela equação 3.

$$\eta = \eta_{motor} \cdot \eta_{bomba} \quad (3)$$

Sendo:

η_{motor} é o rendimento eletromecânico do motor;

η_{bomba} é o rendimento mecânico da bomba.

Para que a bomba forneça esta potência ao fluido, ela recebe do motor a potência mecânica, ou BHP (*Break Horse Power*). Evidentemente a potência mecânica do motor deve ser maior que a potência hidráulica da bomba, uma vez que existem perdas decorrentes da transformação da energia mecânica em energia cinética ao líquido (Gomes, 2012).

3.4. Curvas características e ponto de operação

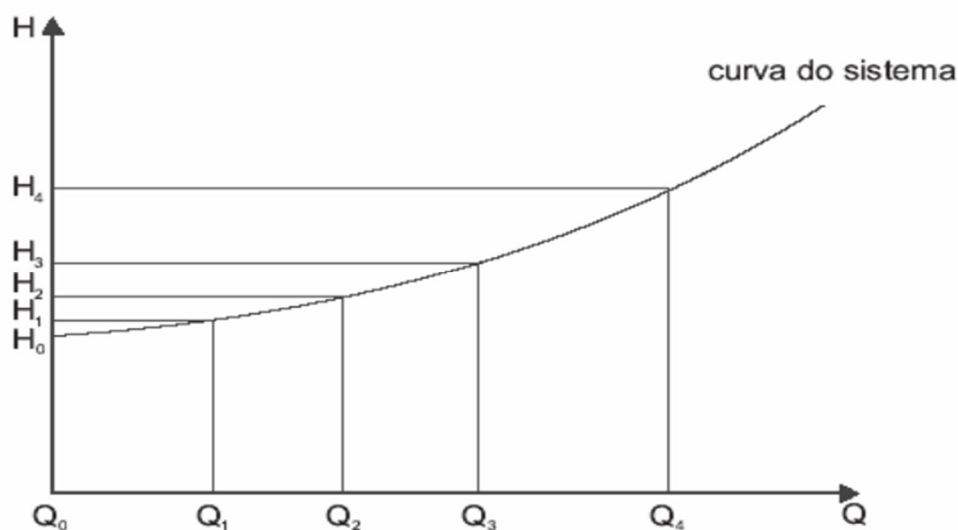
Os fabricantes de bombas fornecem gráficos de cobertura hidráulica, para auxiliar na correta escolha do modelo que melhor satisfaz as características de vazão e altura manométrica do sistema.

Nos catálogos dos fabricantes de bombas são apresentados, em geral, três gráficos correspondentes a uma família de bombas. O gráfico da curva característica propriamente dita, representando as curvas de altura de elevação em função da vazão e indicando também as linhas dos pontos de igual rendimento (isorrendimento), o

gráfico da variável N.P.S.H. requerido, em função da vazão, [...] e, finalmente, a curva de potência necessária à bomba em função da vazão de recalque. O conjunto destas três curvas, para uma determinada velocidade de rotação, é útil na análise de desempenho, bem como no processo de escolha da bomba, como será visto adiante (Porto, 2006, p.137).

A partir dos valores das perdas de carga em função da vazão, deve-se traçar a curva de altura manométrica total do sistema, para diferentes valores de vazão, também chamada de curva característica do sistema. A energia necessária para bombear o fluido, será correspondente a energia que o sistema impõe, para vencer as perdas de carga nas tubulações de sucção e recalque, acrescentada da energia necessária para vencer a diferença de nível entre os pontos de captação e descarga (Porto, 2006). A curva do sistema pode ser esboçada aplicando diferentes valores de vazão à equação 1, como mostra a figura 6.

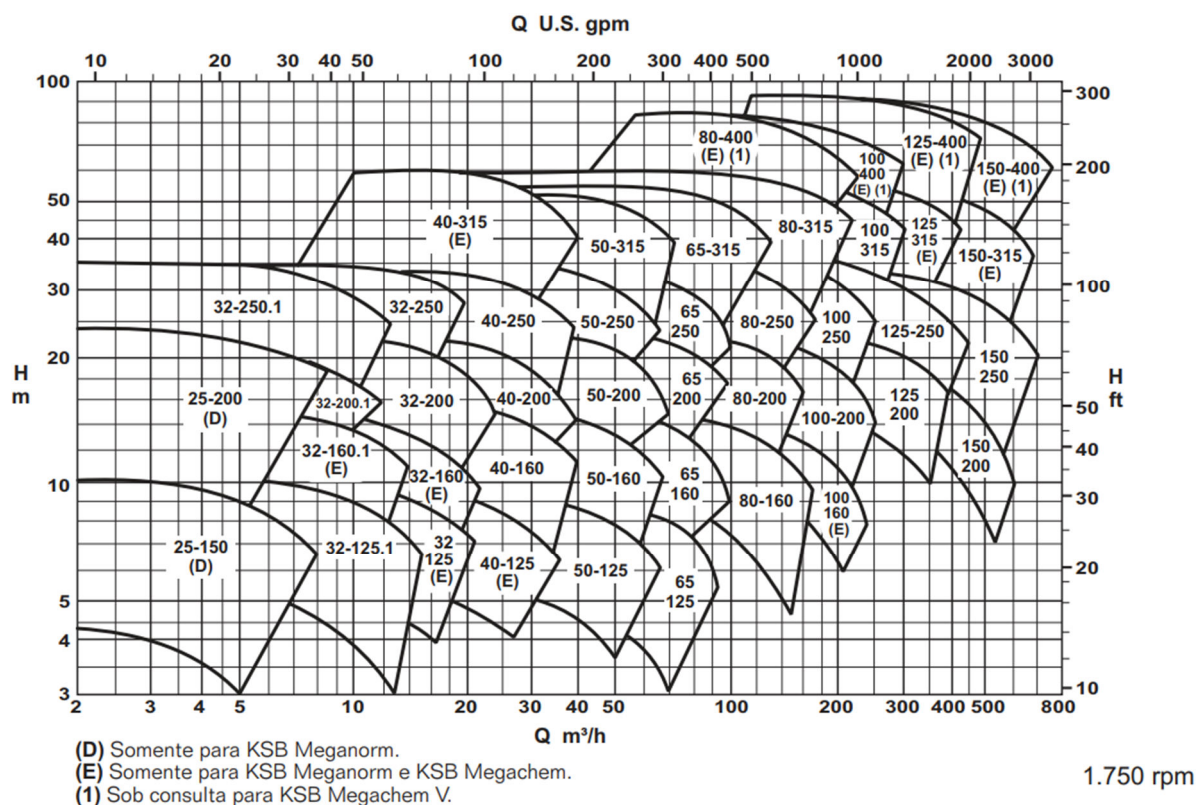
Figura 6: Curva típica de um sistema de Recalque.



Fonte: Manual de curvas características KSB (2009).

“O levantamento das características do sistema de bombeamento é o ponto de partida para dimensionar o tipo de bomba e a potência do motor do acionamento” (Dutra, 2005, p.6). Para as bombas, a altura manométrica é decrescente em função da vazão, e pode ser obtida a partir de ensaios feitos em laboratório. Os fabricantes fornecem gráficos de cobertura hidráulica para suas famílias de bombas, como forma de “pré-dimensionamento”, como mostra a figura 7.

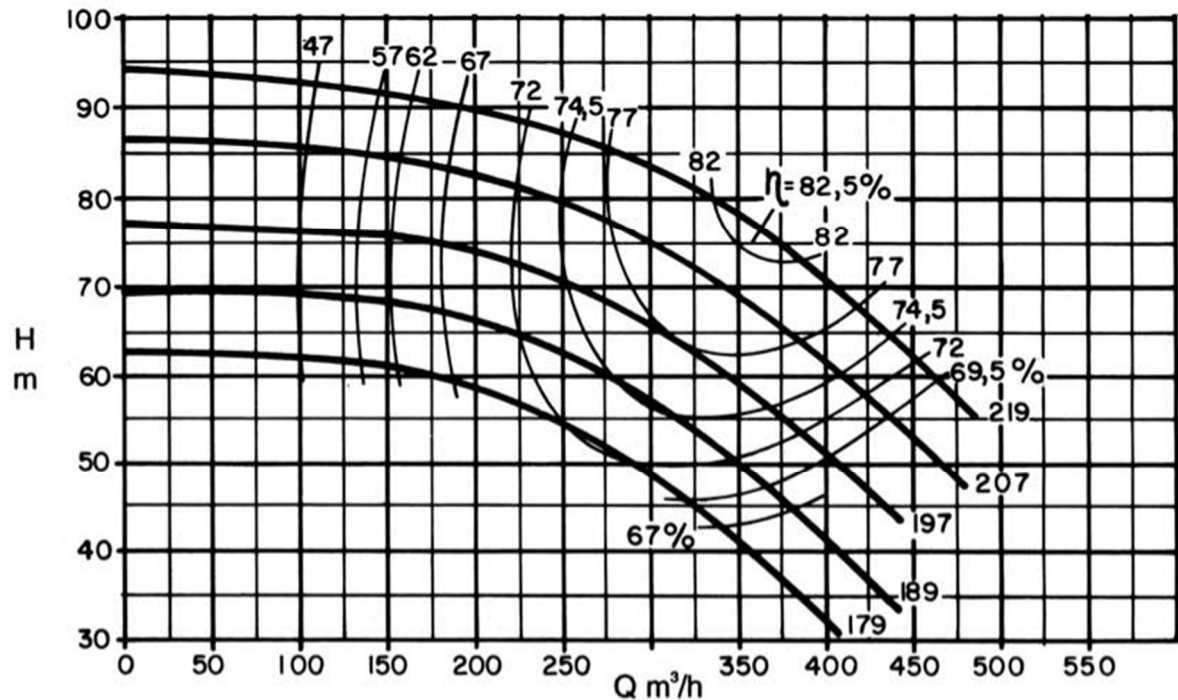
Figura 7: Gráfico de cobertura hidráulica para famílias de bombas centrífugas de 1750 rpm.



Fonte: Manual de curvas características KSB (2009).

A partir das curvas mostradas na figura 7, é escolhida uma família de bombas que satisfaz os valores de vazão e altura manométrica do sistema. Em seguida deve-se analisar o gráfico de curvas características para aquela família e encontrar o diâmetro de rotor adequado para o sistema, como mostra a figura 8.

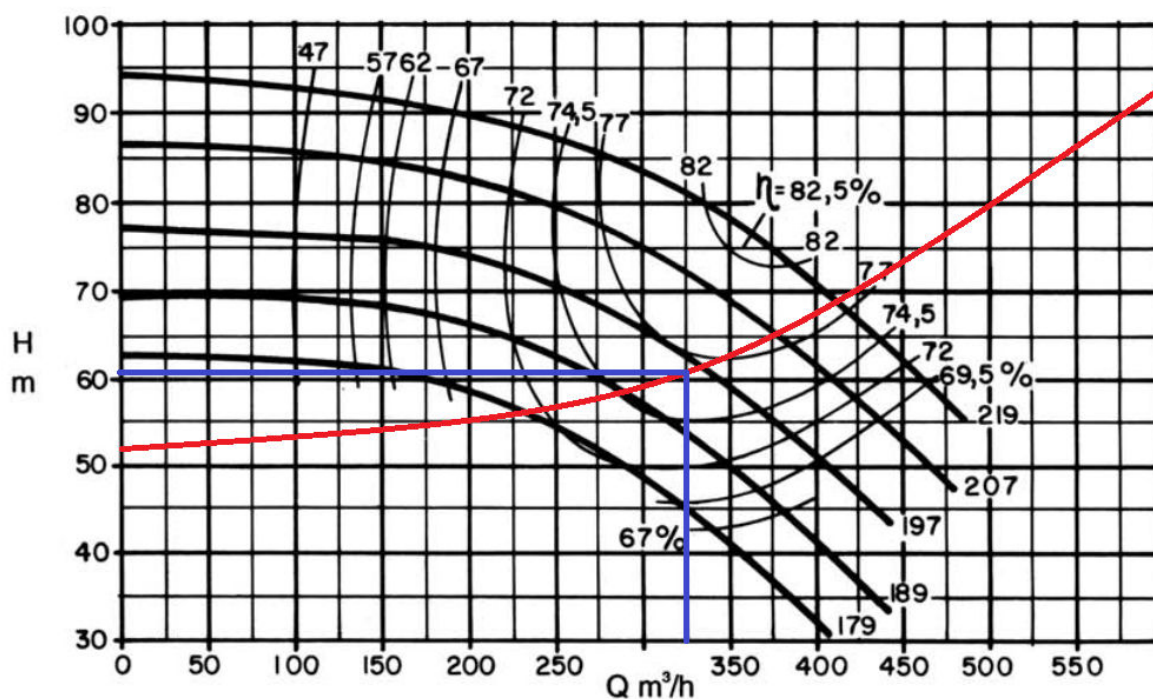
Figura 8: Curvas características para diferentes diâmetros de rotores de uma família de bombas.



Fonte: Manual de curvas características KSB (2009).

A partir das curvas características do sistema e da bomba, deve-se encontrar o ponto de operação, a partir do ponto de interseção das duas curvas, verificando se satisfaz os valores de vazão e altura manométrica do projeto, como mostra a figura 9. Nela, a curva vermelha representa a curva de um sistema hipotético, e as linhas azuis representam os valores de vazão de, 325 m³/hora, e de altura manométrica de aproximadamente 61 metros.

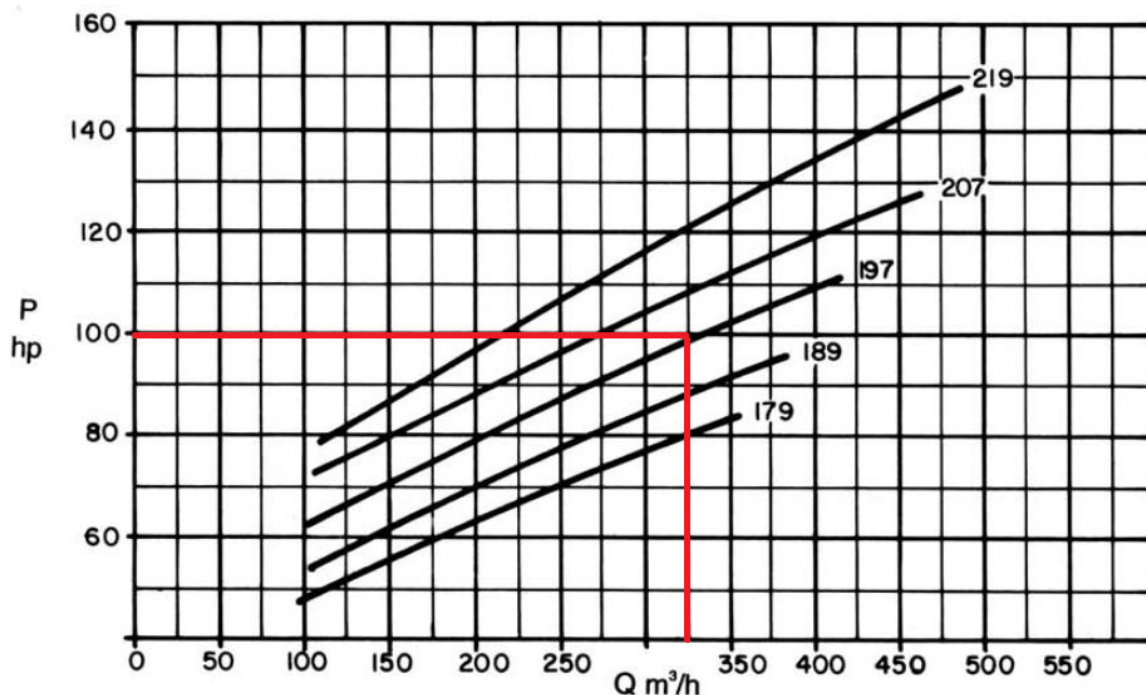
Figura 9: Representação da interseção entre a curva do sistema e as curvas características de uma família de bombas.



Fonte: Manual de curvas características KSB (2009).

Pode-se observar pela figura 9, que o diâmetro de rotor 197 milímetros satisfaz os valores de projeto, com valores de vazões e altura manométrica ligeiramente superior. Os fabricantes também fornecem um gráfico de potência em função da vazão e do rotor escolhido. A figura 10 mostra que a potência mínima para o acionamento da bomba deve ser de aproximadamente 100 cv, considerando a vazão de 332 m³/h.

Figura 10: Curvas características de potência mecânica para diferentes diâmetros de rotores de uma família de bombas.



Fonte: Manual de curvas características KSB (2009).

3.5. Métodos para obtenção de novas curvas características

Um dos principais fatores a ser considerado nos projetos de estações elevatórias, é o correto dimensionamento das bombas, pois mesmo com a grande variedade de modelos projetados para as mais diversas condições de operação, é comum encontrar situações de projeto em que não se tem uma bomba com as características ideais de altura manométrica, vazão e rendimento adequado. Nessas situações, podemos recorrer às relações de semelhança para obtenção de novas curvas características para uma bomba, a partir da variação da rotação, ou variar o diâmetro do rotor.

No estudo e desenvolvimento de máquinas hidráulicas, utiliza-se a teoria de semelhança para prever o desempenho de um protótipo a partir de ensaios em modelos em escala reduzida, ou as alterações de vazão, altura de elevação e potência em máquinas geometricamente semelhantes, em função da rotação e ou da mudança do diâmetro do rotor. Parte-se da suposição de que máquinas geometricamente semelhantes trabalham em condições de semelhança, desde que tenham o mesmo rendimento. (Porto, 2006, p.135).

De acordo com Porto (2006), a variação de rotação e diâmetro do rotor de uma bomba, fornece novos valores de vazão, altura manométrica e potência, obtidos pelas seguintes relações de semelhança:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (4)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \quad (6)$$

Sendo Q , H , P , D , e N representam, respectivamente, os valores de vazão, altura manométrica, potência, diâmetro do rotor e rotação da bomba. Para uma mesma rotação, uma redução no diâmetro do rotor fornece as seguintes relações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (7)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \quad (9)$$

A diminuição do diâmetro do rotor só pode ser feita em um torno mecânico, e para isso é necessário desmontar toda a parte frontal da bomba, comprometendo assim a garantia do equipamento, já que serão feitas modificações não especificadas pelo fabricante. Além disso, uma vez feito o corte, não tem como reverter o processo, caso o cálculo do diâmetro tenha sido errado, por isso essa prática está praticamente em desuso. De acordo com Gomes (2012), a melhor solução para obtenção de novas curvas é variar a rotação da bomba. Para um mesmo diâmetro de rotor, a variação de rotação fornece as seguintes relações de semelhança:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (10)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (11)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (12)$$

“O conjunto destas três curvas, para uma determinada velocidade de rotação, é útil na análise de desempenho, bem como no processo de escolha da bomba” (Porto, 2006, p.137). “A partir daí se constroem “curvas” ditas “paralelas”, por critérios de “semelhança mecânica”, leis de homologia” (Azevedo Netto; et al., 2015, p.278).

3.6. Manobras rápidas e Golpe de aríete

Alguns fenômenos devem ser observados com cautela no projeto de estações elevatórias (principalmente em adutoras de grande porte), onde podemos destacar o transiente hidráulico (ou “Golpe de Aríete”), causado por manobras rápidas no sistema de bombeamento, como fechamento ou abertura rápida de registros e válvulas, e principalmente, na partida e parada dos conjuntos motobomba.

[...] denomina-se “*golpe de aríete*” ou “*martelo hidráulico*” a qualquer variação súbita de pressão em uma tubulação (conduto forçado), normalmente associada a uma mudança de velocidade súbita (acelerando ou desacelerando a massa de água) que se traduz em uma “pancada” como se a tubulação sofresse uma “martelada” (Azevedo Netto; et al., 2015, p.295).

O golpe de aríete ocorre durante partida de bombas, abertura e fechamento de válvulas e registros, e paradas bruscas programadas ou não, no caso de problemas na rede de energia elétrica, ou falhas mecânicas nos componentes do sistema. A escolha do sistema de proteção adequado contra os transientes hidráulicos, depende de qual local do sistema acontece a variação brusca de pressão. No caso das bombas, é recomendável o fechamento do registro durante o acionamento, como forma de reduzir o pico de potência necessário para partida, utilização de volantes de inércia ou chaves de partida indireta (Tsutiya, 2006).

Durante a ocorrência de qualquer um destes acontecimentos, o sistema sofre flutuações de pressão e vazão e podem ocasionar desde simples perturbações no funcionamento por um período não muito longo de tempo, até rompimento de tubos e acessórios, cujos casos são fartamente documentados na literatura especializada. Variações de pressões ou vazões propagam-se ao longo da tubulação desde o seu ponto de origem como uma onda de choque e os seus efeitos são, via de regra, tão mais pronunciados quanto mais rápidas sejam estas variações (Tsutiya, 2006, p.318).

4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE ELETROTÉCNICA

A eletrotécnica consiste no estudo das aplicações técnicas da eletricidade. De acordo com Gomes (2012), os conceitos básicos da eletrotécnica são necessários para compreensão do funcionamento, dos sistemas elétricos de acionamento e operação dos motores de indução, que são utilizados nas estações elevatórias de bombeamento.

4.1. Potência elétrica e Lei de Ohm

A lei de Ohm representa a relação entre tensão, corrente e resistência elétrica, além disso, é o princípio no qual se baseiam os métodos de partida indireta, utilizados no acionamento dos motores elétricos. “Segundo esta, a tensão elétrica (V), nas extremidades de um resistor ou condutor, é igual ao produto da resistência (R) pela intensidade da corrente elétrica (I) que a percorre” (Gomes, 2012, p.38) e é expressa pela equação 13:

$$V = R \cdot I \quad (13)$$

Sendo:

V é a tensão elétrica em Volts;

R é a resistência elétrica em Ohm;

I é a corrente elétrica em amperes.

“A potência elétrica é a taxa de variação do trabalho elétrico, sendo dada pelo produto da tensão pela corrente” (Gomes, 2012, p.38). É dada por:

$$P = V \cdot I \quad (14)$$

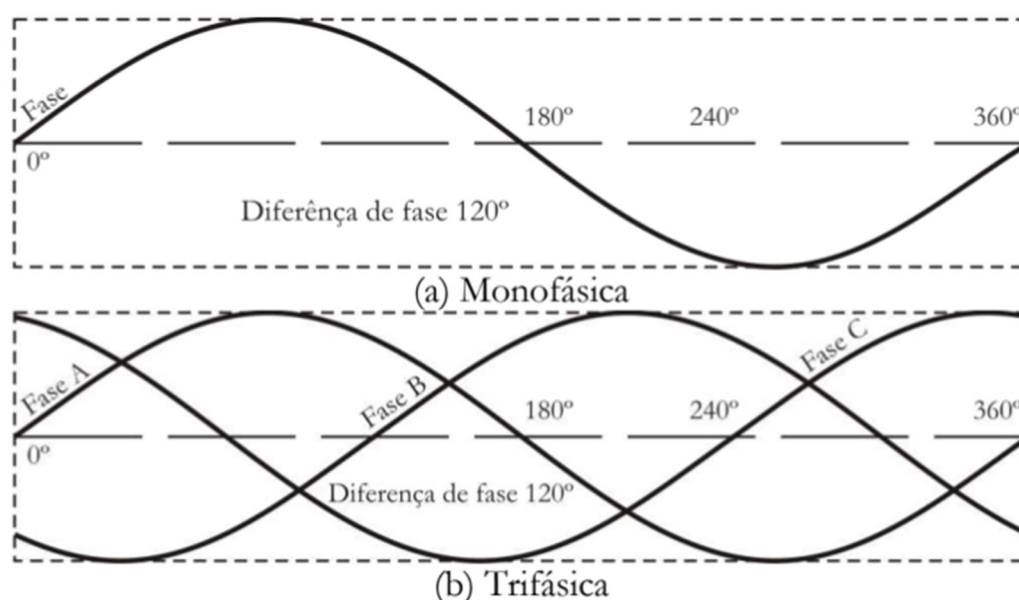
Substituindo V pela Equação 13, temos que a potência elétrica pode ser calculada em função da resistência e da corrente elétrica:

$$P = R \cdot I^2 \quad (15)$$

4.2. Sistemas de corrente alternada trifásicos

“A corrente alternada se caracteriza pelo fato de que a tensão, em vez de permanecer fixa, como entre os polos de uma bateria, varia com o tempo, mudando de sentido alternadamente” (WEG, 2021, p.11). A frequência elétrica comumente utilizada no Brasil é de 60 Hz. A geração de energia nas usinas se dá em sistemas trifásicos, enquanto que a distribuição pode ser feita tanto em redes monofásicas quanto trifásicas (Gomes, 2012). Os dispositivos trifásicos (geradores, transformadores e motores) compostos por três bobinas, podem ser acionados geralmente segundo dois tipos de ligação, sendo elas as ligações do tipo estrela-triângulo. A figura 11 trás a representação gráfica da tensão alternada para os dois sistemas.

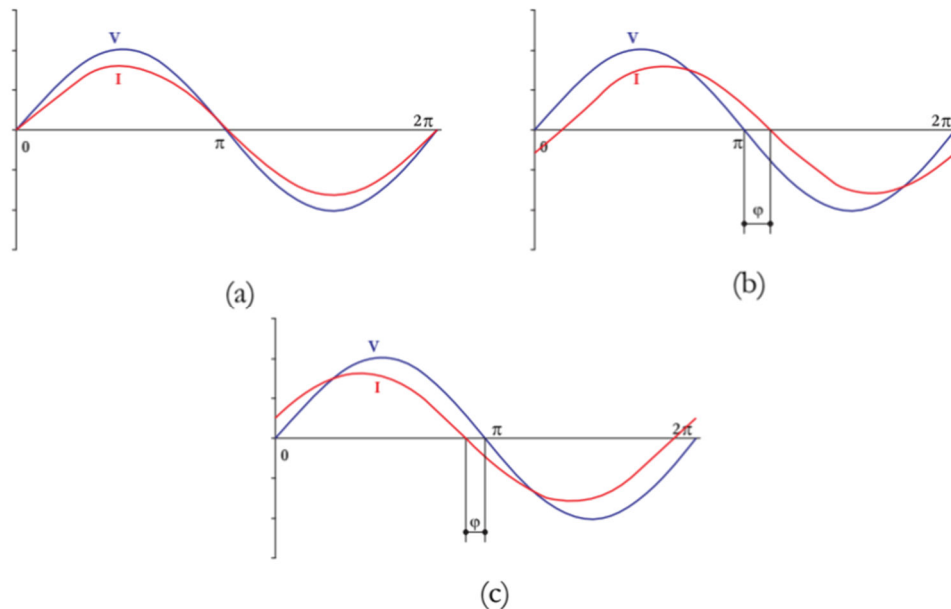
Figura 11: Forma de onda da tensão alternada, (a) monofásica e (b) trifásica.



Fonte: Gomes, 2012.

“A presença de motores elétricos e outros dispositivos que provocam cargas indutivas dão origem a uma defasagem da corrente em relação à tensão. O ângulo correspondente a este atraso é chamado de ângulo de fase (φ) e o seu cosseno é conhecido como fator de potência” (Gomes, 2012, p.40). A figura 12 apresenta o comportamento da corrente em relação à tensão para circuitos resistivos, indutivos e capacitivos.

Figura 12: (a) circuito com fator de potência unitário ($\cos \varphi = 1$), (b) fator de potência atrasado ($\cos \varphi < 1$), e (c) fator de potência adiantado ($\cos \varphi > 1$).



Fonte: Gomes, 2012.

4.3. Distribuição de energia elétrica

Segundo Gomes (2012), O fornecimento de energia elétrica é feito em função da carga instalada, da demanda consumidora, e do tipo de rede existente no local da unidade de consumo. De acordo com a resolução N° 456/2000 da ANEEL, a tensão de fornecimento para a unidade consumidora se dará de acordo com a potência instalada:

- Tensão secundária de distribuição: quando a carga instalada na unidade consumidora for igual ou inferior a 75 kW.
- Tensão primária de distribuição inferior a 69 kV: quando a carga instalada na unidade consumidora for superior a 75 kW e a demanda contratada ou estimada pelo interessado para o fornecimento for igual ou inferior a 2500 kW.
- Tensão primária de distribuição igual ou superior a 69 kV: quando a demanda contratada ou estimada pelo interessado para o fornecimento for superior a 2500 kW.

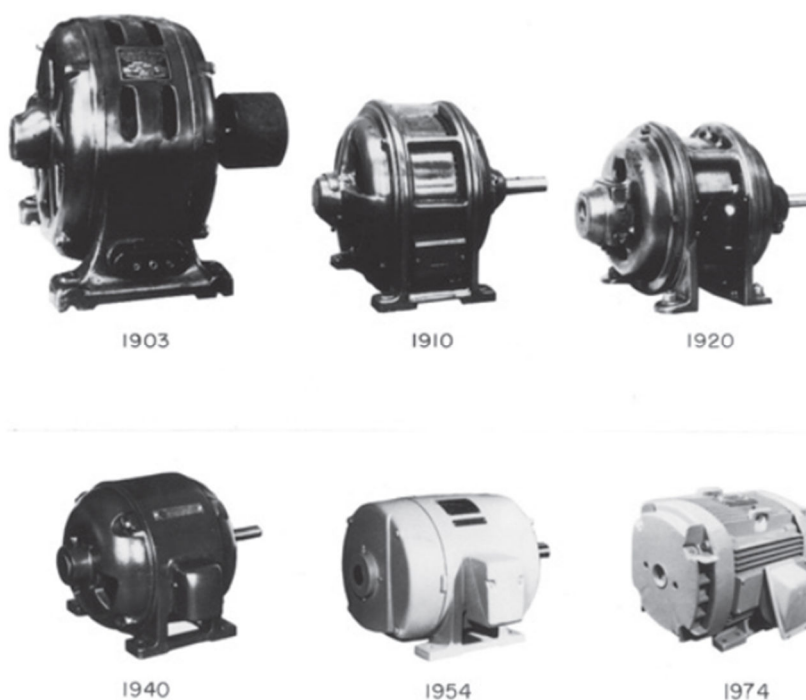
A maioria das instalações elétricas das estações elevatórias se enquadra na situação b). A distribuição é feita em rede primária, com tensão inferior a 69 kV, utilizando rede trifásica com 3 ou 4 fios.

5. MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

O Motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. Existem motores que funcionam em corrente contínua, corrente alternada, ou em ambas (motor universal), porém os mais utilizados são os motores de Corrente Alternada (CA), visto que esse é o sistema de distribuição de energia mais difundido. Entre os tipos de motores CA, os mais comuns são os síncronos e os de indução, sendo este último o mais utilizado. A figura 13 apresenta as diferentes características construtivas dos motores ao longo do tempo.

O motor de indução é o mais usado de todos os tipos de motores, pois, combina as vantagens da utilização de energia elétrica – baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, simplicidade de comando – com sua construção simples e grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos. [...] Funciona normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas, encontradas na prática. Atualmente, é possível o controle da velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência (WEG, 2021, p.6).

Figura 13: Evolução dos motores elétricos de indução.



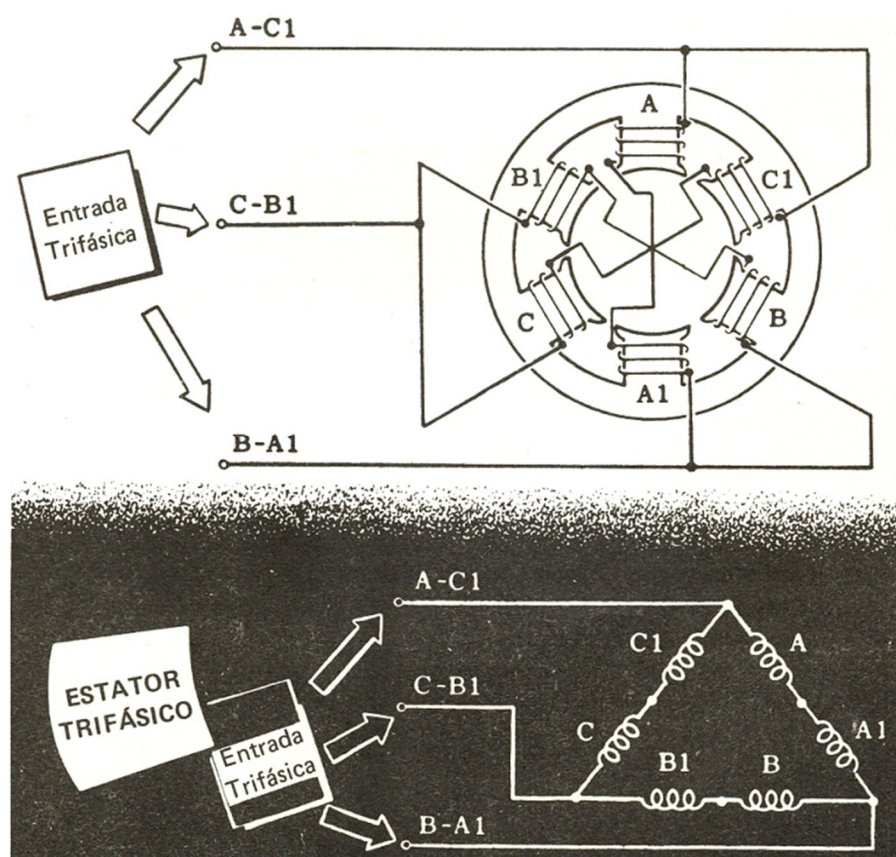
Fonte: Chapman (2013).

Os motores de indução podem ser monofásicos ou trifásicos, onde os trifásicos são os mais utilizados nas aplicações industriais. Motores monofásicos geralmente são utilizados em máquinas e equipamentos de pequeno porte, salvo locais onde não se tem acesso a uma rede de distribuição trifásica, geralmente em fazendas, chácaras ou locais de difícil acesso, e além disso são limitados a baixas potências. Já os motores trifásicos são os mais utilizados em aplicações de médio e grande porte na indústria em geral.

5.1. Princípio de funcionamento

O motor de indução trifásico é formado essencialmente por dois componentes principais, o estator (parte fixa) e o rotor (parte móvel). Um campo magnético girante é produzido quando se aplica uma tensão alternada trifásica aos três enrolamentos do estator. O rotor não é alimentado externamente, dispensando escovas, e as correntes que circulam nele, são induzidas eletromagneticamente pelo estator, como mostram as figuras 14 e 15.

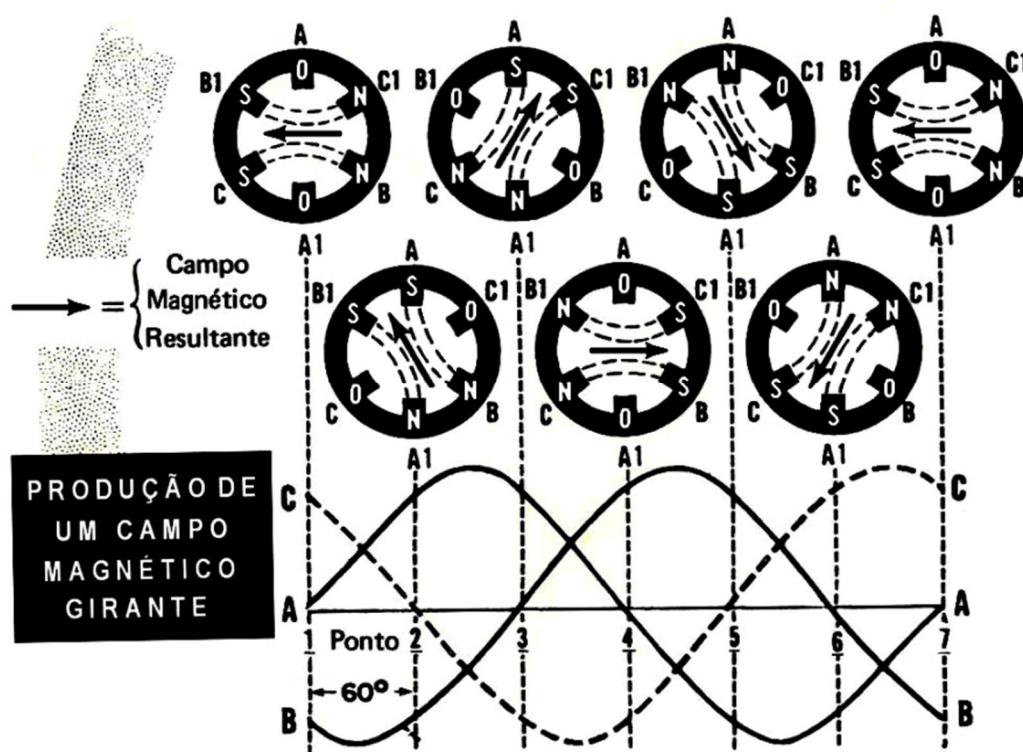
Figura 14: Estator trifásico de um motor CA com os enrolamentos ligados em triângulo.



Fonte: Pinheiro (2007).

O campo magnético gerado por uma bobina depende da corrente que passa por ela naquele instante. Se a corrente for nula não haverá campo magnético. Se a corrente for máxima, o campo também será máximo. Como as correntes nos três enrolamentos estão defasadas de 120° elétricos, os campos magnéticos que produzem apresentam a mesma defasagem. Os três campos combinam-se em um único campo que atua sobre o rotor. [...] Ao fim de um ciclo da corrente alternada, o campo terá girado 360° , ou uma rotação completa. [...] As formas de ondas podem representar tanto as correntes como os campos magnéticos gerados pelas três fases ou correntes das fases. (Pinheiro, 2007, p.23).

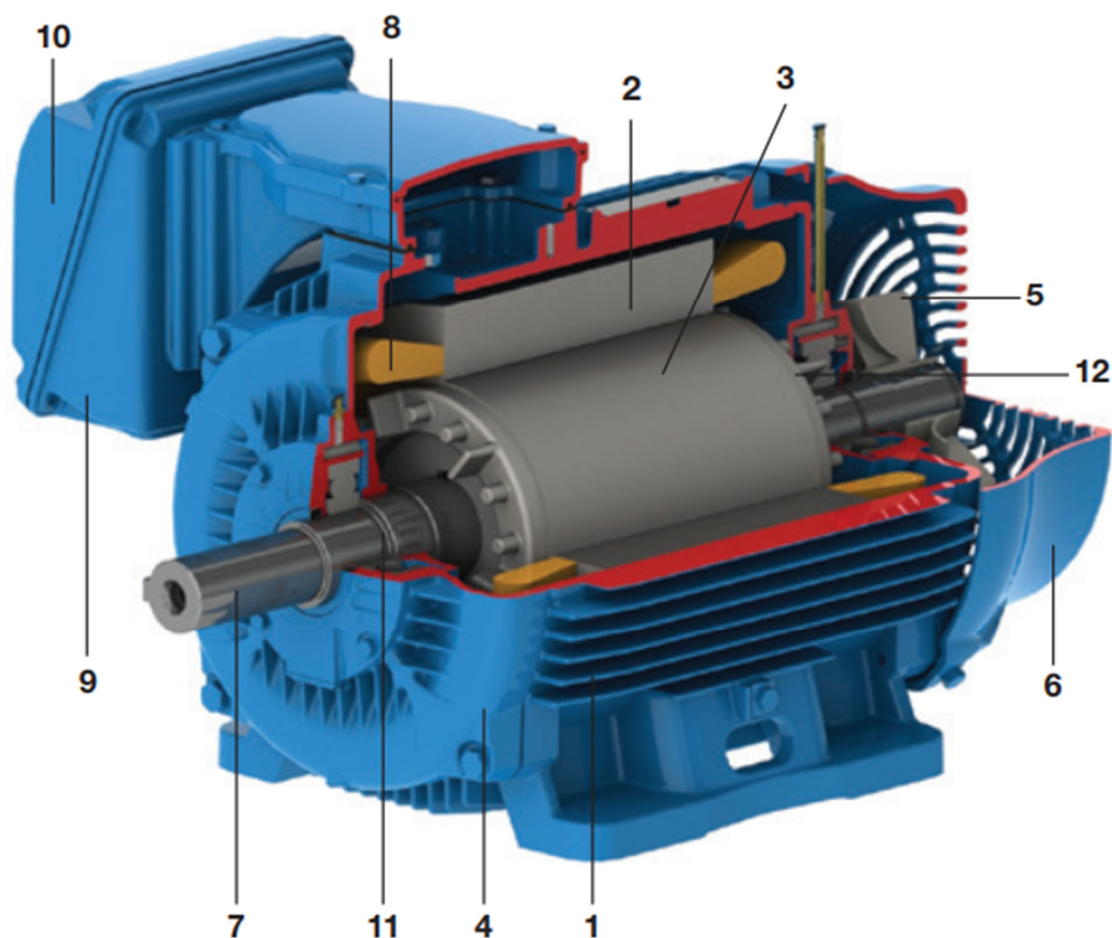
Figura 15: Produção do campo magnético girante no estator de um motor CA trifásico.



Fonte: Pinheiro (2007).

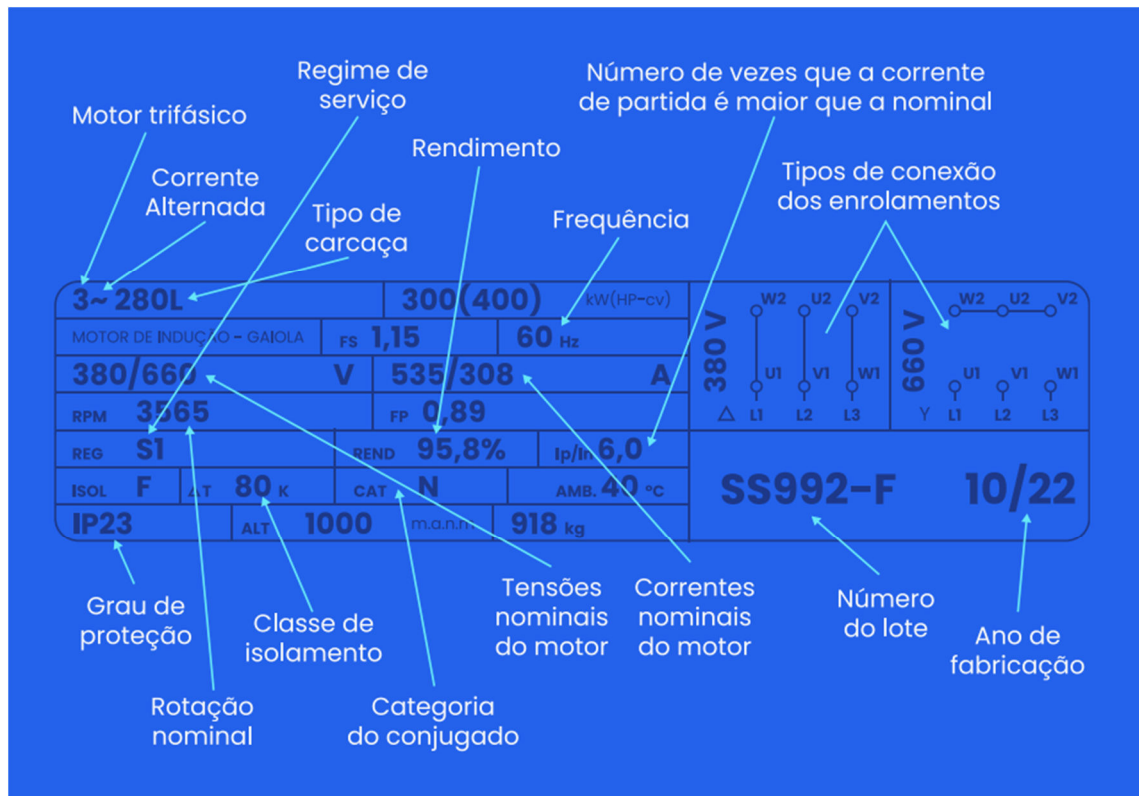
De acordo com WEG (2021), os principais componentes do motor elétrico (Figura 16) de indução trifásico são: Carcaça (1), núcleo de chapas do estator (2), núcleo de chapas do rotor (3), tampas frontal e traseira (4), ventilador (5), tampa defletora (6), eixo (7), enrolamento trifásico (8), caixa de ligação (9), terminais (10), e rolamentos (11). O que caracteriza o motor de indução é que só o estator é ligado à rede de alimentação.

Figura 16: Vista em corte de um motor elétrico de indução e seus componentes.



Fonte: WEG, guia de especificação de motores elétricos (2021).

Segundo Nascimento Júnior (2015), o motor de indução trifásico é mais utilizado por conta de sua construção resistente, reduzindo custo de fabricação, necessidade de manutenção relativamente baixa e funcionamento eficiente. A placa de identificação do motor (Figura 17) é o local onde podem ser encontradas as principais informações técnicas sobre o mesmo, que são utilizadas para o correto dimensionamento das instalações, dispositivos de partida, e manutenção dos seus componentes.

Figura 17: Informações contidas na plaqueta dos motores de indução.

Fonte: Tractian, motores elétricos (2023).

5.2. Rotação nominal

O valor da rotação nominal de um motor de indução, é um dos principais parâmetros analisados para sua aplicação em determinados tipos de máquinas. Os motores comerciais mais usuais apresentam quatro valores nominais de rotação síncrona: 3600, 1800, 1200 e 900 rpm, sendo motores com: 2, 4, 6 e 8 polos respectivamente, isso para motores alimentados por uma rede de distribuição com frequência de 60 Hz. A velocidade de rotação síncrona de um motor de indução pode ser calculada pela equação 16:

$$n_{sinc} = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (16)$$

Sendo:

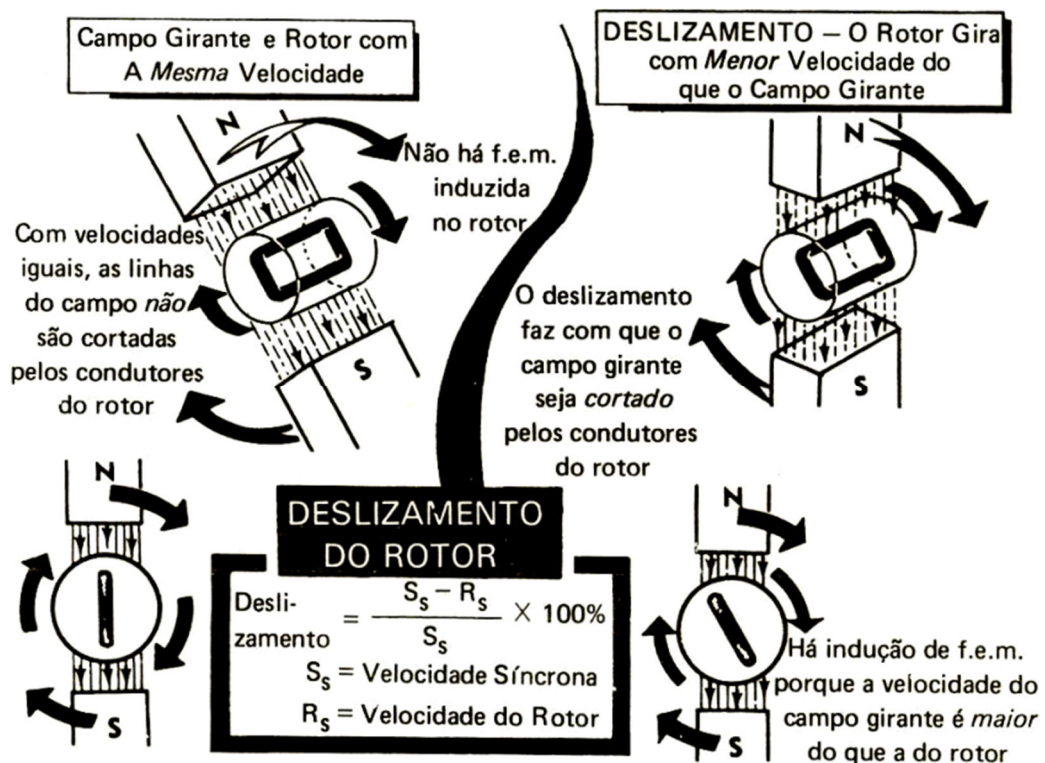
f é a frequência da rede de alimentação em Hertz;

P é o número de polos do motor.

Devido às características eletromecânicas de construção, independentemente do número de polos de um motor de indução, a sua rotação nominal especificada pelo fabricante é sempre

um pouco menor que o valor fornecido pela Equação 16, isso ocorre pela existência de uma diferença entre a velocidade do campo magnético girante e a velocidade real do eixo do motor, como mostra a figura 18.

Figura 18: Relação entre a velocidade do campo magnético girante e a velocidade do rotor.



Fonte: Pinheiro (2007).

A tensão induzida nas barras do rotor de um motor de indução depende da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Como o comportamento de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, muitas vezes é mais lógico falar em velocidade relativa. Dois termos são comumente utilizados para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos. Um deles é a velocidade de escorregamento, definida como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor (Chapman, 2013, p.313).

Essa diferença s é chamada de escorregamento, e pode ser expressa em forma de porcentagem pela equação 17:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \cdot 100 \quad (17)$$

Sendo:

n_{sinc} é a velocidade síncrona do campo magnético girante;

n_m é a velocidade real do eixo do motor.

“Se o rotor estiver girando na velocidade síncrona, então $s=0$, ao passo que, se o rotor estiver estacionário, então $s=1$. Todas as velocidades normais de um motor recaem em algum lugar entre esses dois limites” (Chapman, 2013, p.313). O escorregamento (assim como a eficiência energética) nos motores de indução tende a diminuir à medida que aumentamos sua potência, ou seja, quanto maior a potência, menor a diferença entre a rotação do campo magnético girante e a rotação real do eixo.

5.3. Rendimento e fator de potência

De acordo com Pinheiro (2007), a potência nominal de um motor elétrico, é a energia que o mesmo absorve da rede de alimentação, e transforma em energia mecânica útil no eixo. Os motores de indução são equipamentos que apresentam simultaneamente carga resistiva e indutiva, ou seja, uma parcela de corrente fornecerá potência ativa (kW) e o restante serve para magnetização do estator, chamada de potência reativa (kVAr). Para um motor de indução trifásico, a potência útil é dada pela equação 18.

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \eta \cdot \cos \varphi \quad (18)$$

Sendo:

P é a potência fornecida na ponta de eixo (ou potência útil) em Watts;

V_L é a tensão de linha da rede de alimentação em Volts;

I é a corrente solicitada da rede de alimentação em amperes;

η é o rendimento do motor;

φ é o ângulo de defasagem da tensão em relação à corrente;

$\cos \varphi$ é o fator de potência do motor.

“O rendimento define a eficiência com que é feita a conversão da energia elétrica absorvida da rede pelo motor, em energia mecânica disponível no eixo” (WEG, 2021, p.11). É dado pela relação entre a potência mecânica disponível no eixo do motor, e a potência absorvida da rede elétrica (potência ativa). Pode ser calculado em porcentagem pela equação 19.

$$\eta (\%) = \frac{P_{mecânica}}{P_{ativa}} = \frac{P \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \cos \varphi} \cdot 100 \quad (19)$$

O fator de potência representado por **$\cos \varphi$** , é calculado pela relação entre a potência ativa e a potência reativa (ou potência aparente). É um dos principais parâmetros de avaliação da eficiência energética de um sistema elétrico, e pode ser calculado pela equação 20:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (20)$$

Sendo:

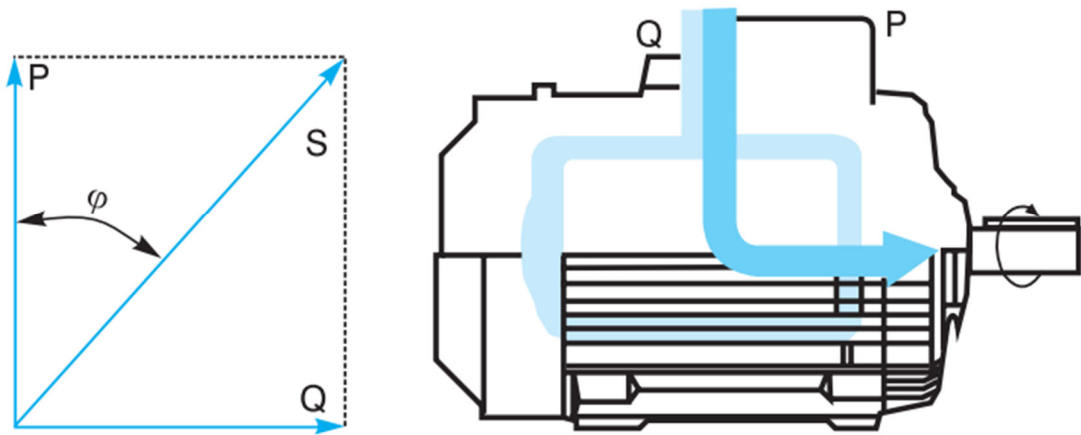
P é a potência ativa em kW;

S é a potência aparente em kVA.

A energia reativa limita a capacidade de transporte de energia útil (ativa) nas linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição, em outras palavras, quanto maior o fator de potência, maior a disponibilidade de potência ativa no sistema e maior é o aproveitamento do sistema elétrico brasileiro. O fator de potência de referência das cargas, determinado pela portaria do DNAEE número 85, é de 0,92. O motor elétrico representa aproximadamente 68% do consumo de energia elétrica dentro das indústrias, por isso, é um elemento de grande impacto nos índices de fator de potência. Logo, é imprescindível a utilização de motores com potência e características bem dimensionadas à sua função [...] (WEG, 2021, p.9).

“O aumento do fator de potência é realizado com a ligação de uma carga capacitiva, em geral, um capacitor ou motor síncrono super excitado, em paralelo com a carga” (WEG, 2021, p.9). O triângulo das potências é apresentado na figura 19.

Figura 19: Triângulo das potências para um motor elétrico de indução.



Fonte: WEG, guia de especificação de motores elétricos (2021).

6. ACIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

Durante a etapa de concepção e projeto de uma estação elevatória, é importante verificar qual tipo de partida poderá ser utilizada nos conjuntos motobomba, pois isso depende de fatores como, potência dos motores elétricos, quantidade de bombas que funcionarão simultaneamente, além das características da rede de distribuição de energia, e das normas exigidas pelas concessionárias.

O ligamento de um motor elétrico é uma operação crítica, pois durante este processo podem ocorrer distúrbios na rede elétrica pela queda da tensão, dependendo da qualidade desta rede ou da tecnologia utilizada para esta “partida”. Além desta condição, durante a “partida”, o motor e os componentes do sistema de acionamento são submetidos a condições severas, com picos elevados de corrente, temperatura do rotor elevadíssima, atingindo o estado de rubro, além dos esforços mecânicos no eixo e acoplamento (Gomes, 2012, p.352).

Durante a partida, a corrente elétrica dos motores de indução pode se tornar extrema. Dependendo das características do motor, pode chegar a nove vezes o valor da corrente nominal a plena carga. Este valor ocorre no início da partida, no instante em que o eixo começa a se mover, e vai caindo até que este alcance a velocidade de rotação de trabalho (valor nominal). O valor do pico da corrente durante a partida é conhecido como corrente de rotor bloqueado e é fornecida pelo fabricante (Gomes, 2012, p.109).

Os métodos de partida analógica mais utilizados são o de partida direta, partida estrela-triângulo, e partida por chave compensadora (autotransformador). O acionamento de motores elétricos e outros dispositivos de características indutivas, como ar-condicionado, micro-ondas e máquinas de solda, provocam grandes picos de corrente e quedas de tensão nas instalações elétricas de baixa tensão, e até mesmo na própria rede de distribuição. Apenas motores de pequeno porte, (até 5 hp) podem ser ligados diretamente à rede de alimentação com partida direta, já os motores de médio e grande porte devem ser acionados com métodos de partida indireta, como chave estrela-triângulo ou autotransformador (Azevedo Netto; et al., 2015).

6.1. Partida direta

“A partida direta é a forma mais simples de partir um motor elétrico, na qual as três fases são ligadas diretamente ao motor, ocorrendo um pico de corrente” (Franchi, 2008, p.154). As chaves de partida direta (Figura 20) utilizam apenas um contactor de força e um relé de sobrecarga, e devido ao seu baixo custo, são as mais utilizadas em aplicações de pequeno porte.

Figura 20: Chave de acionamento do tipo partida direta.



Fonte: Eletrofor material elétrico (2023).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), devem ser observadas as restrições impostas pelas concessionárias de energia elétrica, em relação à partida direta de motores elétricos com potência nominal acima de 3,7 kW (5 CV), alimentados diretamente pelas redes de distribuição em baixa tensão.

6.2. Partida estrela-triângulo

Na partida estrela-triângulo a corrente de partida é reduzida para um terço do valor em comparação com a partida direta, “o motor tem o enrolamento fechado em estrela (reduzindo a tensão elétrica aplicada nas bobinas) e, quando sua velocidade estiver próxima à nominal, comuta a ligação para triângulo” (Gomes, 2012, p.353). Em geral tem baixo custo de instalação em comparação com os outros métodos de partida indireta, porém exige um número maior de componentes eletromecânicos (Figura 21). Tem como desvantagem, a redução do torque do motor a um terço do valor nominal devido ao fechamento estrela.

Figura 21: Quadro elétrico de partida estrela-triângulo.



Fonte: Loja elétrica din (2016).

6.3. Partida por chave compensadora

Na partida por chave compensadora o motor é alimentado por uma tensão inferior à sua tensão nominal de funcionamento, o mesmo é ligado por um “autotransformador” (Figura 22) durante o intervalo de acionamento, e semelhante à partida estrela-triângulo, quando o motor atingir a velocidade nominal é feita a comutação para a rede de alimentação.

O motor parte com o enrolamento ligado em triângulo e com uma tensão reduzida através do autotransformador. Após o processo de partida, em uma operação simultânea, é desligado o autotransformador e ligado o contator ou disjuntor para operação em regime e aplicada a tensão plena (nominal) no motor. Normalmente os autotransformadores possuem derivações (TAP) para aplicar uma tensão reduzida nos terminais do motor, correspondente a 65%, 80% e 90% da tensão nominal. [...] No TAP de 65% o pico de corrente na partida é reduzido para aproximadamente 1/3 da partida direta (Gomes, 2012, p.354).

Figura 22: Autotransformador utilizado na partida por chave compensadora.



Fonte: Loja mister volt (2018).

A partida por chave compensadora tem um quadro elétrico que necessita de mais componentes (Figura 23), o que torna sua montagem mais complexa e seu custo mais elevado. Sua principal desvantagem é a limitação da quantidade de partidas que pode ser realizada em determinado período de tempo, pois o autotransformador é um componente de força “a seco” sem nenhum tipo de refrigeração.

Figura 23: Quadro elétrico de uma chave de partida compensadora.



Fonte: Soto filhos motores e geradores elétricos (2023).

6.4. *Soft Starter*

A *Soft Starter* é um tipo de chave de partida a estado sólido, formado por um conjunto de pares de tiristores, diodos, ou combinação de ambos, um em cada terminal de potência do motor (WEG, 2021). A figura 24 mostra alguns tipos comuns de *Soft Starters*.

Figura 24: *Soft Starters* para uso geral WEG.



Fonte: Catálogo de produtos de automação industrial WEG (2022).

Sua principal vantagem em relação aos outros métodos de partida, é que, assim como a chave de partida compensadora, podem ser acionados motores com diversos níveis de tensão, independentemente do tipo de fechamento, sem limitação da quantidade de partidas por hora, como mostra a figura 25.

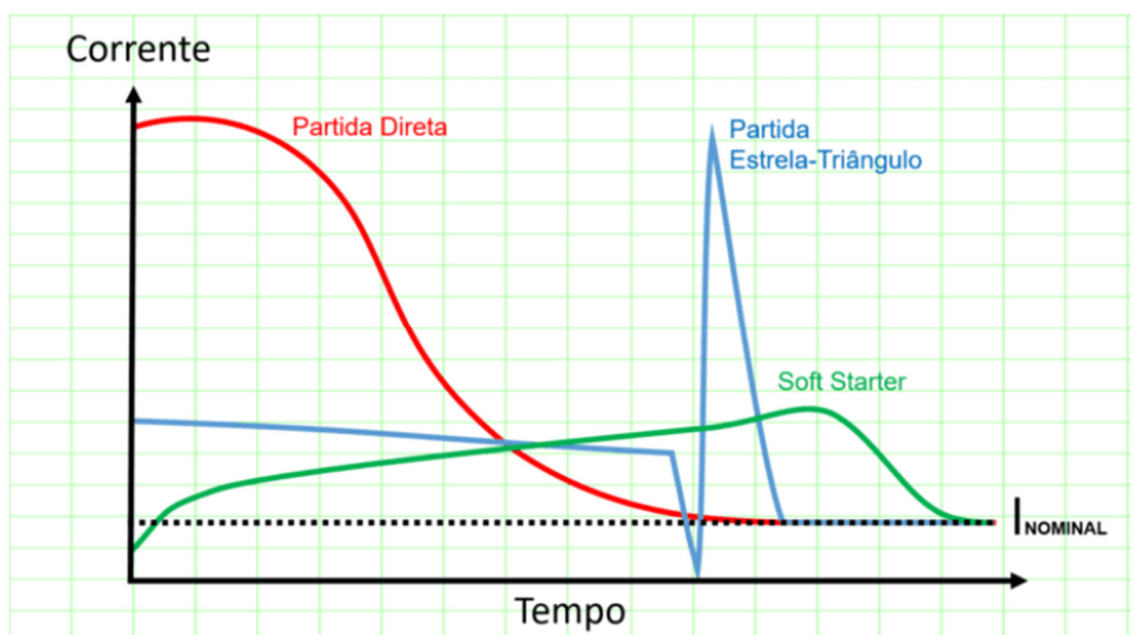
O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para aplicar uma tensão variável aos terminais do motor durante a aceleração. No final do período de partida, ajustável tipicamente entre 2 e 30 segundos, a tensão atinge seu valor pleno após uma aceleração suave ou uma rampa ascendente, ao invés de ser submetido a incrementos ou saltos repentinos. Com isso, consegue-se manter a corrente de partida (na linha) próxima da nominal e com suave variação. Além da vantagem do controle da tensão (corrente) durante a partida, a chave eletrônica apresenta, também, a vantagem de não possuir partes móveis ou que gerem arco, como nas chaves mecânicas. Este é um dos pontos fortes das chaves eletrônicas, pois sua vida útil torna-se mais longa (WEG, 2021, p.25).

Figura 25: Métodos de partida de motores de indução trifásicos.

Tensões do motor	Tensão de serviço	Partida com chave estrela-triângulo	Partida com chave compensadora	Partida com chave série-paralela	Partida com Soft-Starter
220/380 V	220 V 380 V	Sim Não	Sim Sim	Não Não	Sim Sim
220/440 V	220 V 440 V	Não Não	Sim Sim	Sim Não	Sim Sim
380/660 V	380 V	Sim	Sim	Não	Sim
220/380/ 440 V	220 V 380 V 440 V	Sim Não Sim	Sim Sim Sim	Sim Sim Não	Sim Sim Sim

Fonte: WEG, guia de especificação de motores elétricos (2021).

As chaves *soft starter* são bastante eficientes para solução dos problemas causados pela elevada corrente de partida dos motores (Figura 26), e também na solução dos transientes causados pelo golpe de Aríete em sistemas de bombeamento, pois permitem longas rampas de partida e desaceleração, a depender da necessidade do sistema. Além disso, existem modelos produzidos atualmente exclusivamente para acionamento de bombas centrífugas, possibilitando ajustes mais detalhados para esse tipo de aplicação.

Figura 26: Comparativo entre os picos de corrente de alguns métodos de partida de motores de indução.

Fonte: Blog Schneider Eletric (2022).

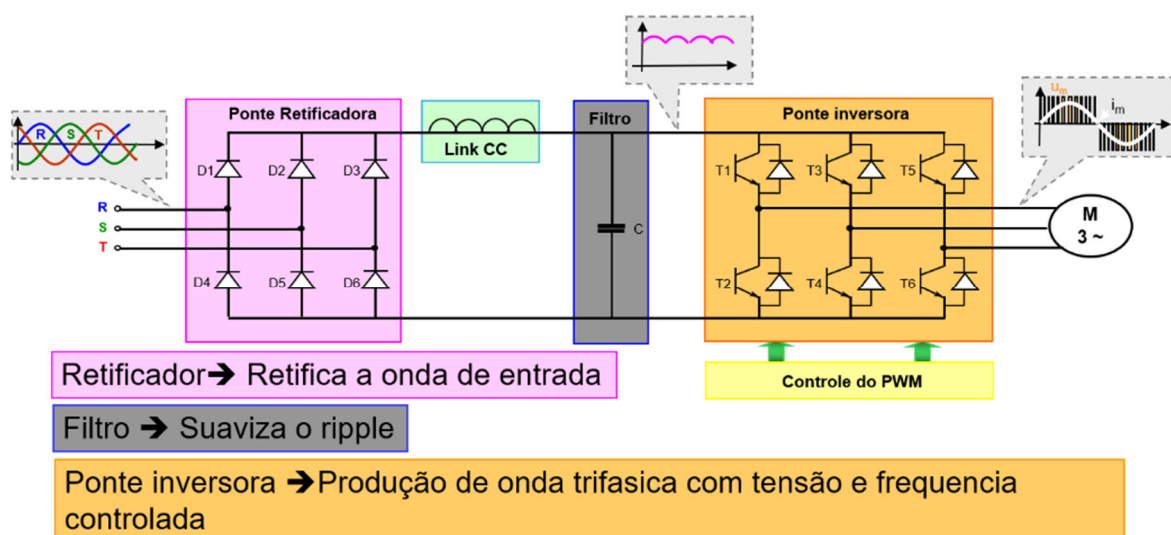
6.5. Inversor de frequência

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos cuja função é, controlar com precisão parâmetros como a velocidade e aceleração dos motores elétricos de indução. (Pedra, 2020). “[...] Controlam a velocidade de motores elétricos através da alteração do módulo e da frequência da tensão da rede trifásica com a qual alimenta-se o motor” (Dias, 2015, p.32).

O conversor de frequência é um equipamento eletrônico que varia a frequência da tensão aplicada e consequentemente a velocidade do motor. No caso de bombas centrífugas, isso resulta na possibilidade de controle de vazão. Além disso, o conversor pode ser utilizado para a partida e parada suave do motor, pela variação de sua velocidade através de uma rampa de aceleração. (Gomes, 2012, p.355).

De acordo com Pedra (2020), O inversor de frequência converte uma fonte de tensão elétrica alternada em um sinal de onda quadrada, por um processo PWM (*Pulse Width Modulation*), em tradução, “modulação por largura de pulso”. A variação da frequência de alimentação na entrada do motor fornece o controle preciso da velocidade, permitindo ajustes desde baixas rotações até altas velocidades, conforme as necessidades operacionais do equipamento. A figura 27 representa o circuito interno de um inversor de frequência, que é dividido em duas partes principais, a parte de controle e parte de potência.

Figura 27: Diagrama elétrico de um inversor de frequência trifásico.



Fonte: Blog Schneider Eletric (2020).

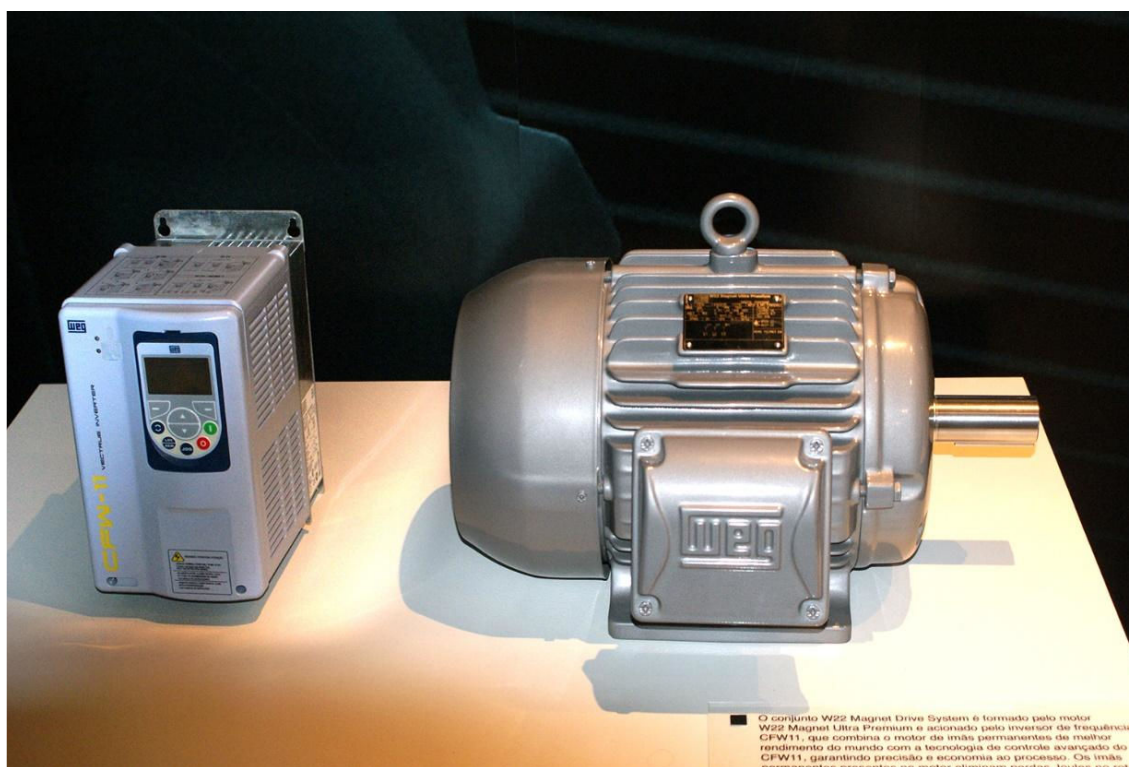
Ainda segundo Pedra (2020), em relação aos seus componentes internos, são constituídos basicamente por uma ponte retificadora, um filtro CC e uma ponte inversora. A ponte retificadora é composta por uma associação de diodos que possuem a função de

transformar o sinal senoidal da rede elétrica em um sinal retificado, cortando o semicírculo negativo e permitindo apenas o ciclo positivo do sinal.

O filtro DC é formado pela associação de indutores e capacitores a fim de transformar esse sinal em um mais próximo de um sinal DC ou sinal contínuo, elevando assim a tensão de pico. Por último, a ponte inversora. Consiste em uma associação de transistores do tipo IGBT, onde eles recebem este sinal quase DC, e o convertem para um sinal modulado pela largura de pulso (PWM). Dada a largura que esses pulsos apresentam, ocorre uma variação na tensão/corrente e assim replicando na variação da velocidade do motor.

Os inversores de frequência são bastante utilizados em aplicações onde há necessidade de um controle preciso de velocidade, como máquinas operatrizes, esteiras transportadoras, ventiladores, exautores, máquinas de comando CNC, e estações elevatórias. Além disso, seu uso é obrigatório para o acionamento de motores elétricos de ímãs permanentes, como apresentado na figura 28.

Figura 28: Motor elétrico de ímãs permanentes, projetado para ser acionado exclusivamente por inversor de frequência.



Fonte: Museu WEG de ciência e tecnologia (2019).

Quando há apenas necessidade de partir o motor, é mais vantajoso do ponto de vista econômico, a utilização de uma chave do tipo *soft starter*.

6.6. Aplicação do inversor de frequência para melhoria da eficiência energética nos sistemas de bombeamento

Os conjuntos motobomba são responsáveis pela parcela mais significativa do consumo de energia elétrica nas estações elevatórias. Os motores de indução produzidos atualmente, atendem normas e padrões internacionais de alto rendimento energético, proporcionando uma economia significativa de médio e longo prazo.

Por definição, a eficiência energética consiste na relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização. Em outras palavras, é a utilização racional de energia, em que se procura minimizar as perdas nos processos e nas atividades (WEG, 2021, p.3).

Quando se pensa nos grandes consumidores de energia elétrica é comum citar as empresas prestadoras de serviços de saneamento. Aproximadamente 2% da energia elétrica do Brasil é consumida pelas empresas de saneamento, onde os equipamentos de maior gasto são os conjuntos motobomba, responsáveis por aproximadamente 90% do consumo (SNS, 2008).

O inversor de frequência é um equipamento de fundamental importância no combate ao desperdício de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. Esse equipamento possibilita uma redução no consumo de energia elétrica de 10 a 50% e, devido a sua importância, tanto no combate ao desperdício de energia como também na diminuição de perdas de água (SNS, 2008, p.87).

7. METODOLOGIA

A pesquisa teve caráter qualitativo, descritivo, e apresentou aspectos de revisão bibliográfica. Por se tratar de um estudo de revisão da literatura, o procedimento metodológico foi apoiado na literatura especializada e atualizada. Para isso, foram consultadas as principais referências adotadas no ensino superior na área de bombeamento, abastecimento de água e automação elétrica:

- Azevedo Netto (2015);
- Gomes (2012);
- Tsutiya (2006);
- Chapman (2013);
- Porto (2006);
- Franchi (2008);
- Nascimento Júnior (2006);
- Entre outros.

Também foram consultados estudos científicos de elevada divulgação e repercussão entre os estudiosos do tema em questão, bem como documentos acadêmicos (Trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses), além de manuais técnicos fornecidos pelos fabricantes de bombas centrífugas e motores elétricos.

- Santos (2017);
- Cherem (2016);
- Pedrosa (2015)
- Dias (2022);
- Diniz (2016);
- Schmidlin (2006);
- WEG Motores SA;
- KSB Bombas Hidráulicas SA;
- ABB Eletrification;
- Schneider Eletric;
- Entre outros.

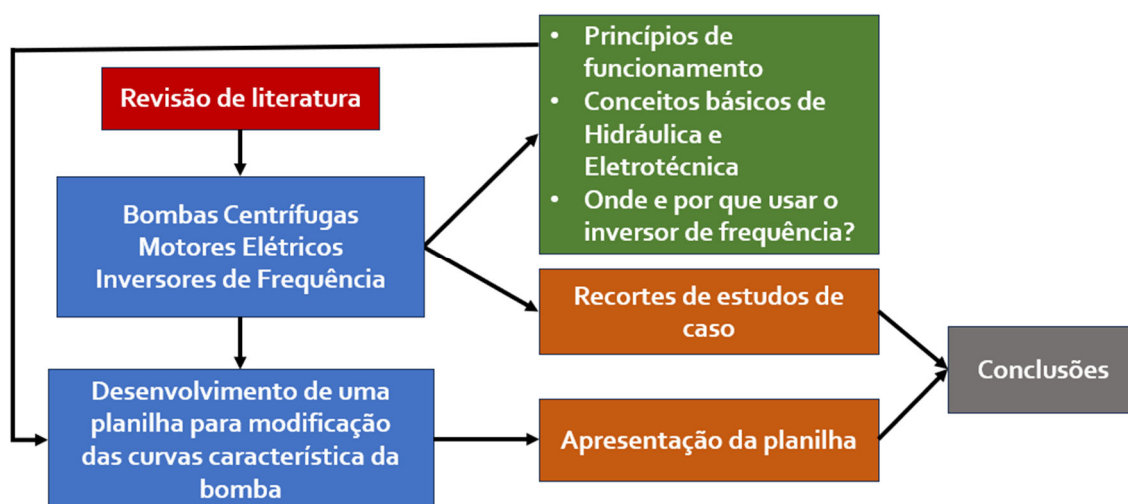
A partir do levantamento bibliográfico do tema em questão, foi apresentando um melhor entendimento sobre os principais componentes de uma estação elevatória, possibilitando assim uma maior compreensão em relação aos princípios de funcionamento dos conjuntos motobomba, seus dispositivos de acionamento e controle, e de forma mais específica, a utilização dos inversores de frequência para ajustes do ponto ideal de operação do sistema.

Foram reunidas no referencial teórico, informações que permitem analisar a aplicação de inversores para redução da demanda de energia elétrica nas estações de bombeamento. Apresentados na seção de resultados e discussão, os trabalhos escolhidos agregam informações acerca das características técnicas e operacionais antes da implantação dos inversores. Posteriormente são apresentados os resultados obtidos com a redução do consumo de energia por metro cúbico de água bombeado, e os dados em relação ao retorno financeiro obtido após a otimização dos sistemas de bombeamento.

Por fim, com o intuito de ilustrar de forma prática princípios do funcionamento do inversor de frequência, foi desenvolvida uma planilha no Excel® para obtenção de novas curvas características para uma família de bombas, mudando sua velocidade de rotação, a partir da variação da frequência de alimentação do motor. Para isso, utilizando as relações de semelhança apresentadas nas equações 10, 11 e 12.

Deste modo, o desenvolvimento deste trabalho está esquematizado na figura 29.

Figura 29: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor (2023).

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados três estudos de caso da literatura, em que foram utilizados inversores de frequência para controle de rotação das bombas, com objetivo de regular a vazão bombeada de acordo com demanda horária, e as respectivas reduções no consumo de energia dos motores, visto que os sistemas passaram a operar em potência inferior à instalada. Também foi desenvolvida uma planilha para obtenção de novas curvas características de uma família de bombas, simulando uma variação de rotação com utilização do inversor de frequência.

8.1. Estudo de caso 1: sistema de eficiência energética através da implantação de inversores de frequência em estação elevatória tipo Booster na cidade de Rio Verde – GO (Dias; et al., 2022).

Esta Ação de Eficiência Energética (AEE) implantada no ano de 2017, objetivou a instalação de inversores de frequência na estação Booster de Rio Verde para equalizar a vazão de água bruta da captação com a vazão de água bruta da estação (Dias; et al., 2022).

Como o nível da torre de equalização de carga deve ser mantido constante, ocorre o estrangulamento frequente do fluxo nas tubulações e consequentemente o aumento de perdas de carga hidráulica, razão da viabilidade do projeto. Desta forma, o controle da vazão do Booster será feito pelos inversores de frequência (Dias; et al., 2022, p.43)

“Antes da instalação dos inversores a equalização era realizada por meio do estrangulamento do registro de recalque da água bruta do Booster, acarretando aumento da perda de carga e energia no ponto, além do aumento do custo de manutenção” (Dias; et al., 2022, p.46). Segundo Dias e Santos (2022) A estação Booster Rio Verde possui as seguintes características técnicas:

- Os motores são a principal carga do Booster, representando quase totalidade de consumo de energia da unidade;
- O sistema é composto por 3 motores trifásicos de 500 cv, 440 V;
- Dois motores atuam de forma contínua na maior parte do dia e uma unidade é reserva;

O subsistema de água bruta do sistema de abastecimento de água de Rio verde é composto por captação, conforme demonstrado na figura 30, elevatória de água bruta, adutora de água bruta, torre de carga e o Booster, mostrado pela figura 31.

Figura 30: Captação do Booster Rio Verde.



Fonte: Diniz (2016).

Figura 31: Motores Booster Rio Verde.

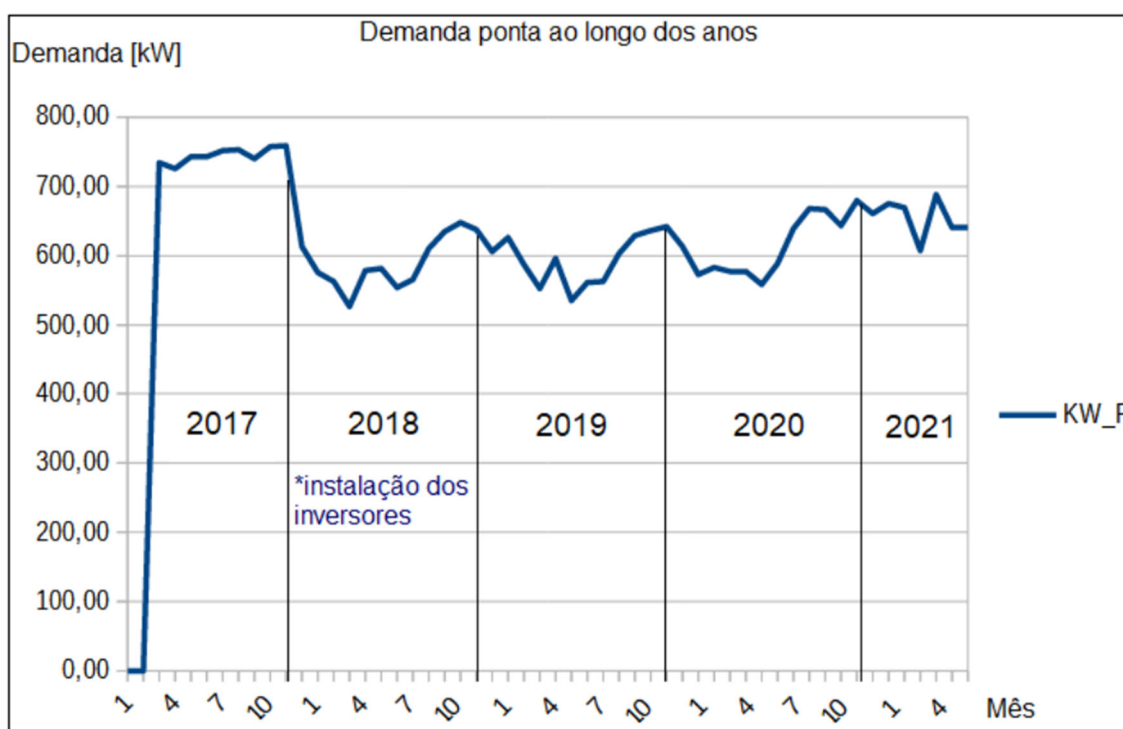


Fonte: Diniz (2016).

Para a implementação do projeto foi realizado o levantamento de parâmetros hidráulicos como pressão de sucção de cada bomba; pressão de recalque na saída de cada bomba; pressão à jusante de cada válvula de controle; vazão de adução (l/s); potências elétricas (kW) de cada conjunto motobomba e potência elétrica total da instalação da unidade Booster.

“A demanda contratada para o Booster no horário de ponta e fora de ponta era de 770 kW no ano de 2017, com tensão de 13,8 kV, e subgrupo tarifário A4, antes da implementação dos inversores de frequência” (Dias; et al., 2022, p.48). A figura 32 mostra o histórico de consumo da estação de bombeamento entre os anos de 2017 e 2021, indicando o ano de instalação dos inversores.

Figura 32: Demanda de ponta de 2017 a 2021 do Booster.



Fonte: P-SEM SANEAGO (2021).

Com a operação dos inversores de frequência junto dos conjuntos moto-bomba no início de 2018, foi obtida uma redução pela demanda de energia elétrica nos anos de 2018 a 2021. Pelo gráfico é possível ver ainda que ocorre uma variação da curva de carga de acordo com o comportamento de consumo de energia elétrica pelo Booster ao longo dos meses, porém, a demanda mantém-se abaixo de 700 kW. Após a redução significativa da demanda do Booster foi realizada uma alteração da demanda contratada junto a Celg (Atual Enel) de 770 kW para 580 kW em 2018. [...] Ao que se pode observar a demanda média utilizada era de 705,10 kW e após a instalação dos inversores passou a ser de 540,20 kW (Dias; et al., 2022, p.48).

A tabela 1 apresenta um comparativo numérico entre os parâmetros de operação antes e depois da implementação dos inversores de frequência.

Tabela 1: Dados do sistema Booster antes e depois do projeto.

Sistema antes do projeto		
	Valores	Unidade
Potência dos motores	735,49	kW
Potência contratada	770,00	kW
Demanda média utilizada	705,10	kW
Consumo anual	5399,00	Mwh/ano
Consumo	0,642	kwh/m3
Rendimento nominal	96,30%	-
Sistema após os inversores		
	Valores	Unidade
Demanda média utilizada	540,20	kW
Consumo anual	4048,90	Mwh/ano
Consumo	0,485	kwh/m3
Rendimento nominal	93,40%	-

Fonte: Adaptado de Júnior (2019).

Com a instalação dos inversores de frequência esperava-se a redução de demanda na ponta de 70,47 kW, o que representaria uma redução de 11,08% no consumo de energia e um valor aproximado de R\$ 186,000,00 anual de economia para a SANEAGO (Dias, et al., 2022).

Após a análise de eficiência energética do sistema com os inversores, a demanda reduzida na ponta foi de 164,90 kW equivalente a um percentual de redução de 23,39% para a demanda de energia elétrica e 25% para o consumo. A redução com o consumo de energia elétrica resultou para o Booster Abóbora uma economia anual de R\$ 705,505.08. [...] Sendo o custo para aquisição dos equipamentos e execução da instalação dos inversores o valor de R\$ 629,318.67. Estimou-se 10 meses para o retorno do valor investido na implantação dos inversores no Booster (Dias; et al., 2022, p.48).

A tabela 2 apresenta os resultados financeiros após a instalação dos inversores, e o tempo de retorno do investimento.

Tabela 2: Resultados financeiros após instalação dos inversores.

Resultados			
	Valores	Unidade	Percentual de redução
Demanda reduzida na ponta	164,90	kW	23,39%
Consumo reduzido	1350,10	Mwh/ano	25%
Custo reduzido mensal	R\$ 58.959,59	-	-
Custo anual reduzido	R\$ 705.505,08	-	-
Custo do projeto	R\$ 629.318,67	-	-
Payback (simples)	10 meses	-	-

Fonte: Adaptado de Júnior (2019).

Vale observar que, mesmo que o rendimento dos conjuntos tenha sido reduzido para 93,4% devido as perdas internas do inversor de frequência, os resultados mostram que as ações operacionais de gestão de energia foram capazes de reduzir significativamente as despesas energéticas do sistema. Uma vez que, após as melhorias realizadas, houve uma redução do consumo de energia da ordem de 25% (Dias; et al., 2022).

Com a ação do inversor de frequência o conjunto motobomba passa a acelerar ou desacelerar, de acordo com a parametrização da rampa, de forma lenta e continua. Isso permite o desaparecimento das perturbações geradas pelos transitórios. As ações de acionamento e parada com o inversor reduzem o “stress” no motor, bomba e acoplamento, aumentando a vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico, redução do nível de ruído, vibração e efeitos de cavitação. Assim, a aplicação de solução de eficiência energética no sistema de bombeamento de água por meio do uso de inversores permitiu alcançar não somente a otimização do consumo de energia elétrica, mas também do sistema hidráulico (Dias; et al., 2022, p.50).

8.2. Estudo de Caso 2: utilização de inversor de frequência para redução do consumo de energia na Unidade de Tratamento Simplificado (UTS) II do município de Palmas – TO (Cheren, 2016).

A região do Taquari, é abastecida exclusivamente pela unidade de tratamento simplificado II, e possui 3.718 ligações cadastradas, com uma rede de distribuição de aproximadamente 73.165 metros. O sistema UTS II conta com uma estação elevatória de água bruta composta por 2 conjuntos motobomba (CMB) de 100 cv, sendo 1 em operação e 1 reserva,

acionados por chave de partida *soft starter*. O objeto de análise deste trabalho foi desenvolvido na etapa de bombeamento de água bruta, com a substituição da chave *soft starter* por um inversor de frequência (Cheren, 2016). A figura 33 apresenta a caixa de reunião, os conjuntos de bombeamento e o barrilete do sistema.

Figura 33: Caixa de reunião, CMB e barrilete.



Fonte: Cheren (2016).

“O equipamento responsável pelo recalque é uma bomba KSB Meganorm modelo 125-400, [...] com um rotor de diâmetro igual a 377mm acoplada mecanicamente a um motor Weg W22 Plus de 100cv de potência” (Cheren, 2016, p.46). Os equipamentos podem ser vistos nas figuras 34 e 35.

Figura 34: Bomba KSB Meganorm modelo 125-400.



Fonte: Cherem (2016).

Figura 35: Motor WEG W22 Plus.

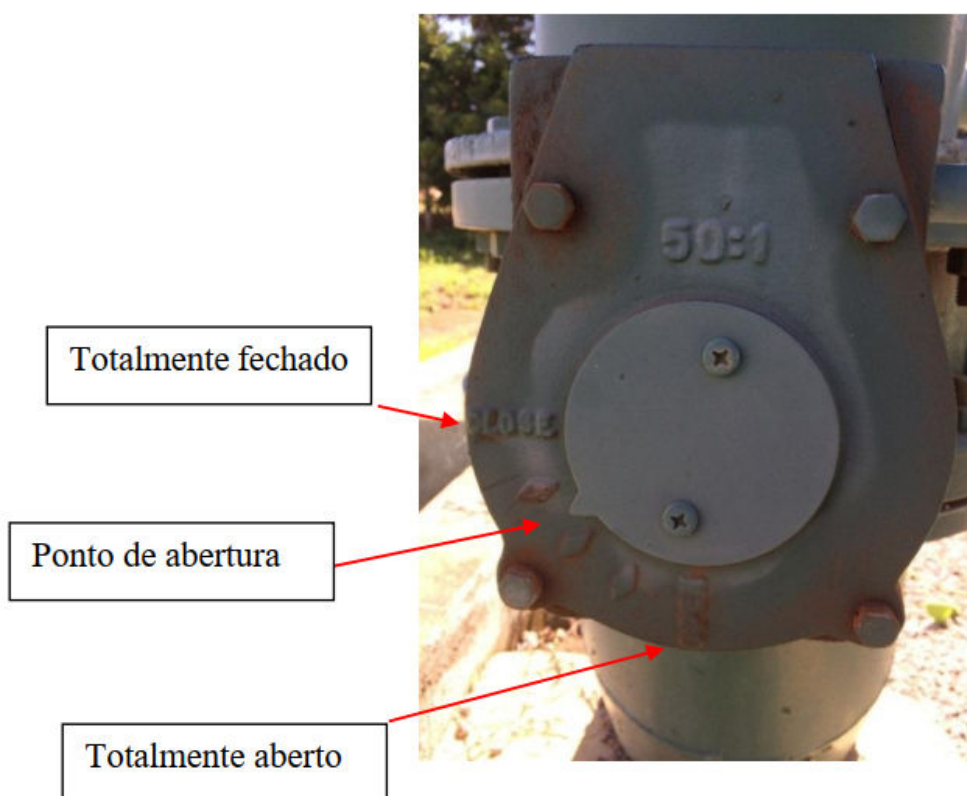


Fonte: Cherem (2016).

A fim de determinar a curva do sistema e seu consumo de energia foram monitorados *in loco*, por 3 (três) horas consecutivas, a potência elétrica, a vazão e a pressão, com o armazenamento dos dados nos equipamentos e em planilhas. A cada intervalo de 1 (uma) hora foram coletados os dados de volume bombeado e consumo de energia. Em um primeiro momento os dados foram coletados para o CMB sendo acionados por uma chave *soft starter* tendo sua vazão controlada por uma válvula reguladora de vazão [...] (Cherem, 2016, p.50).

O antigo sistema utilizava uma válvula reguladora de vazão, com diferentes pontos de abertura, como representado pela figura 36.

Figura 36: Válvula controladora de vazão.



Fonte: Cherem (2016).

Após medições anteriores foi feita a substituição da chave *soft starter* por um inversor de frequência, a válvula foi totalmente aberta e a rotação do motor foi controlada via a IHM (Interface Homem Máquina) do inversor, de modo que a vazão de bombeamento não fosse alterada (Cheren, 2016).

Com o novo sistema instalado pela equipe de manutenção eletromecânica e validado pela equipe operacional, foram realizadas medições para o novo sistema de operação nos mesmos moldes realizados anteriormente (medição de vazão, pressão e potência elétrica dos equipamentos a cada 3 minutos durante 3 horas). Vale lembrar que não

foram realizadas alterações no modo operacional do sistema de distribuição e produção de água. Nenhum parâmetro operacional foi modificado durante os ensaios (Cherem, 2016, p.51).

Conhecidas as vazões e a pressão de trabalho foi possível avaliar e comparar os dois sistemas, o antigo usando *soft starter*, e o sistema atual utilizando inversor de frequência. A tabela 3 apresenta todas as medições realizadas durante o estudo.

Tabela 3: Medições de vazão e pressão no estudo de caso.

Tempo (min)	Sistema antigo		Sistema atual		Tempo (min)	Sistema antigo		Sistema atual	
	Vazão (m³)	Pressão (m.c.a)	Vazão (m³)	Pressão (m.c.a)		Vazão (m³)	Pressão (m.c.a)	Vazão (m³)	Pressão (m.c.a)
0	306,56	45	284,5	42,9	90	300,88	45,2	293,85	43,4
3	296,22	44,8	281,23	43	93	299,21	45,3	302,02	43,4
6	295,34	44,9	288,49	42,8	96	300,15	45	290,53	43,6
9	292,83	45,1	285,27	42,8	99	310,7	45,1	287,21	43,4
12	297,44	45,1	289,51	42,6	102	299,57	45,3	283,69	43,4
15	296,37	44,9	281,16	42,8	105	298,81	45,1	282,87	43,5
18	300,62	44,8	277,14	42,7	108	299,4	45,2	278,56	41,7
21	295,79	45,4	284,47	42,8	111	296,57	44,9	285,21	41,8
24	293,22	46,8	282,15	42,6	114	293,12	45,3	287,3	42,1
27	294,62	45	276,97	42,7	117	300,44	45,1	290	41,9
30	293,22	44,9	274,76	40	120	299,76	45	298,01	42,3
33	293,44	44,9	266,11	43,1	123	297,09	45	285,45	43,8
36	295,21	44,9	268,49	44	126	304,44	45	270,51	44,3
39	287,41	44,7	276,19	44,9	129	298,04	45,2	318,57	44,1
42	292,59	45	268,66	42,4	132	298	45,1	351,37	44
45	298,26	45	275,03	41,5	135	292,25	44,8	341,2	43,9
48	293,5	44,9	269,96	43	138	289,25	45	333,44	44,1
51	295,09	44,8	261,13	44,1	141	299,23	45	270,57	43,6
54	294,72	44,7	287,14	42,6	144	294	44,9	273,61	43,5
57	293,02	44,7	284,03	42,7	147	289,12	44,6	280,71	43,1
60	286,19	44,7	0	31	150	291,22	45	262,6	43,2
63	290,53	44,7	3	29,7	153	297,64	45	287,14	43,2
66	0	30,2	7,42	30	156	294,72	43,9	284,03	44,1
69	0	35,4	0	30	159	294,67	44,8	283,97	43,7
72	10,42	31,8	4,59	30	162	295,09	45	274,76	43,4
75	7,2	30,7	306,73	45,7	165	289,04	44,7	287,66	44
78	10,3	31,6	313,78	45	168	286,52	44,7	271,08	43,9
81	309,15	45,5	302,71	43,5	171	287,92	44,7	301,14	43,2
84	292,45	45,3	297,9	43,8	174	292,6	44,9	284,52	42,9
87	297,35	45,4	297,01	43,1	177	286,55	45,1	298,77	43,1

Fonte: Cherem (2016).

“A média das vazões durante o primeiro ensaio foi de 295,58m³/h e uma pressão de 45m.c.a. Ao utilizar o inversor de frequência a vazão média foi de 287,65m³/h e a pressão reduziu para 43,2m.c.a.” (Cherem, 2016, p.56). A tabela 4 apresenta os resultados da potência requerida pelo sistema antigo e após a instalação do inversor de frequência.

Tabela 4: Medições de potência no estudo de caso.

Medição	Sistema antigo Potência (kW)	Sistema atual Potência (kW)	Medição	Sistema antigo Potência (kW)	Sistema atual Potência (kW)
0	77	58	90	77	60
3	77	57	93	77	59
6	77	57	96	77	59
9	77	57	99	77	59
12	77	56	102	77	59
15	77	58	105	77	59
18	77	56	108	77	59
21	77	56	111	77	59
24	77	56	114	77	59
27	77	56	117	77	59
30	77	53	120	77	59
33	77	53	123	77	59
36	77	53	126	77	59
39	77	58	129	77	59
42	77	55	132	77	61
45	77	56	135	77	59
48	77	53	138	77	60
51	77	61	141	77	57
54	77	56	144	77	58
57	77	56	147	77	57
60	77	0	150	77	56
63	77	0	153	77	59
66	0	0	156	77	59
69	0	0	159	77	59
72	0	0	162	75	59
75	0	65	165	76	59
78	0	66	168	77	59
81	77	59	171	75	59
84	77	59	174	75	59
87	77	59	177	75	59

Fonte: Cherem (2016).

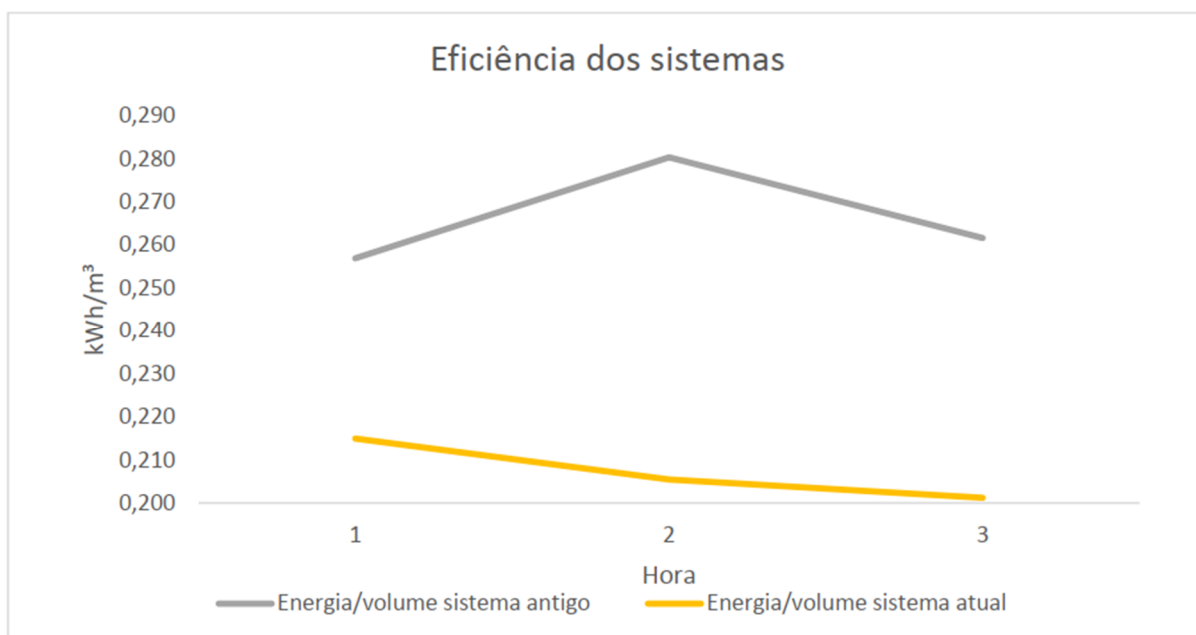
“Analisando as informações anterior, onde a média da potência consumida no modelo anterior foi de 77 kW e para o novo sistema (com inversor de frequência) foi 58,09kW é possível fazer uma análise comparativa entre os dois sistemas” (Cherem, 2016, p.57). “Durante as 3 horas em que cada sistema foi monitorado foram adquiridos dados de volume de água bombeada em m³ e o consumo de energia elétrica requerida pelo CMB para executar esse bombeamento” (Cherem, 2016, p.58). A tabela 5 apresenta os resultados da medição de energia em função do volume bombeado ao longo do estudo.

Tabela 5: Medições de energia no estudo de caso.

Tempo (h)	Sistema antigo		Sistema atual	
	Volume (m ³)	Consumo (kWh)	Volume (m ³)	Consumo (kWh)
1	291	74,75	263	56,52
2	212	59,43	217	44,57
3	298	77,95	297	59,76
Total	801	212,13	777	160,85

Fonte: Cherem (2016).

Para comparação entre as duas situações de operação, optou-se em usar o indicador da quantidade de energia gasta para bombear um m³ de água (kWh/m³) sendo o principal parâmetro utilizado para medir a eficiência do novo sistema após a instalação do inversor de frequência (Cherem, 2016). A relações de funcionamento são apresentadas na figura 37.

Figura 37: Comparativo da relação energia por volume entre os dois sistemas.

Fonte: Cherem (2016).

“O sistema antigo com uma média de 0,266kWh/m³ bombeado o apresentou um consumo de 0,059 kWh a mais que o sistema atual com o inversor de frequência que consumiu 0,207 kWh de energia para bombear 1 m³ de água” (Cherem, 2016, p.60). Comparando então a eficiência dos dois sistemas, foi possível uma redução no consumo de energia elétrica da ordem de 22%. A tabela 6 apresenta o balanço financeiro após a otimização do sistema.

Tabela 6: Resultado financeiro da substituição do sistema de partida.

Valor investido	R\$ 29.500,00
Economia de energia anual (kWh)	118.136
Economia de demanda mensal (kWh)	19
Tarifa de energia com impostos	R\$ 0,272/kWh
Tarifa de demanda com impostos	R\$ 26,775/kW
Economia com redução de energia	R\$ 32.168,76
Economia anual com redução de demanda	R\$ 6.104,70
Economia total	R\$ 38,273,46

Fonte: Adaptado de Cherem (2016).

A economia anual com essa substituição é de R\$ 32.168,76. Outra economia que é alcançada através da redução na demanda contratada de 19 kW, uma vez que a potência exigida pelo motor reduziu de 77kW em média para 58kW. Como o custo do kW de demanda contratada para essa categoria (A4 Horosazonal Verde) já aplicado impostos para uma unidade de serviço público no saneamento é de R\$ 26,775/kW, e a economia anual com essa redução é de R\$ 6.104,70. O custo de aquisição do inversor de frequência pela empresa no ano de 2015 foi de R\$ 28.150,00. Os custos para implementação (mão de obra, cabos e conexões) foram orçados em torno de R\$ 1.000,00, totalizando um custo de R\$ 29.150,00 (Cherem, 2016, p.61).

Segundo Cherem (2016), a vida útil do sistema de acionamento por inversor de frequência foi limitada em 10 anos, uma vez que alguns dos componentes dos quadros elétricos tem vida útil entre 9 e 11 anos.

8.3. Estudo de caso 3: Utilização de inversores de frequência para otimização da estação elevatória do Pirapama, município de Cabo de Santo Agostinho, região metropolitana de Recife – PE (Pedrosa, 2015).

Segundo Pedrosa (2015) O Sistema Pirapama é Atualmente a maior estrutura de abastecimento de água do estado do Pernambuco. “O sistema produz aproximadamente 4.500 litros por segundo de água, que representa 50% da produção de água da Região Metropolitana do Recife” [...] (Pedrosa, 2015, p.56). A representação do sistema pode ser vista na figura 38.

Figura 38: Sistema de Abastecimento de Água de Pirapama.



Fonte: Pedrosa (2015).

A estação elevatória de água bruta do sistema Pirapama, [...] tem capacidade máxima de produção de 5.130 L/s. É composta por seis conjuntos motor-bomba, sendo um destinado para reserva, com vazão nominal de 1.026 L/s cada e potência de 1.600 CV. O recalque da água bruta é feito para a ETA Pirapama, ao longo de 4.200 m (Pedrosa, 2015, p.63).

A figura 39 apresenta o interior das instalações de bombeamento da EEAB do sistema Pirapama.

Figura 39: Estação Elevatória de Água Bruta de Pirapama.



Fonte: Pedrosa (2015).

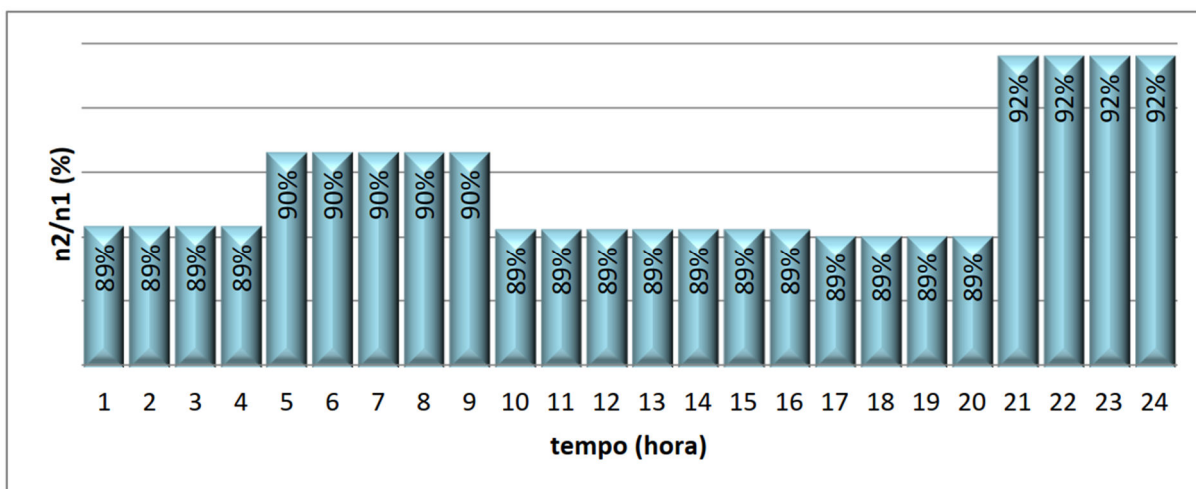
O objetivo do trabalho foi minimizar os custos com energia elétrica da elevatória de água bruta, buscando o melhor ponto de operação para as bombas que funcionam em regime intermitente. A tabela 7 apresenta as especificações técnicas das bombas e motores da estação elevatória de Pirapama.

Tabela 7: Dados da Estação Elevatória de Pirapama.

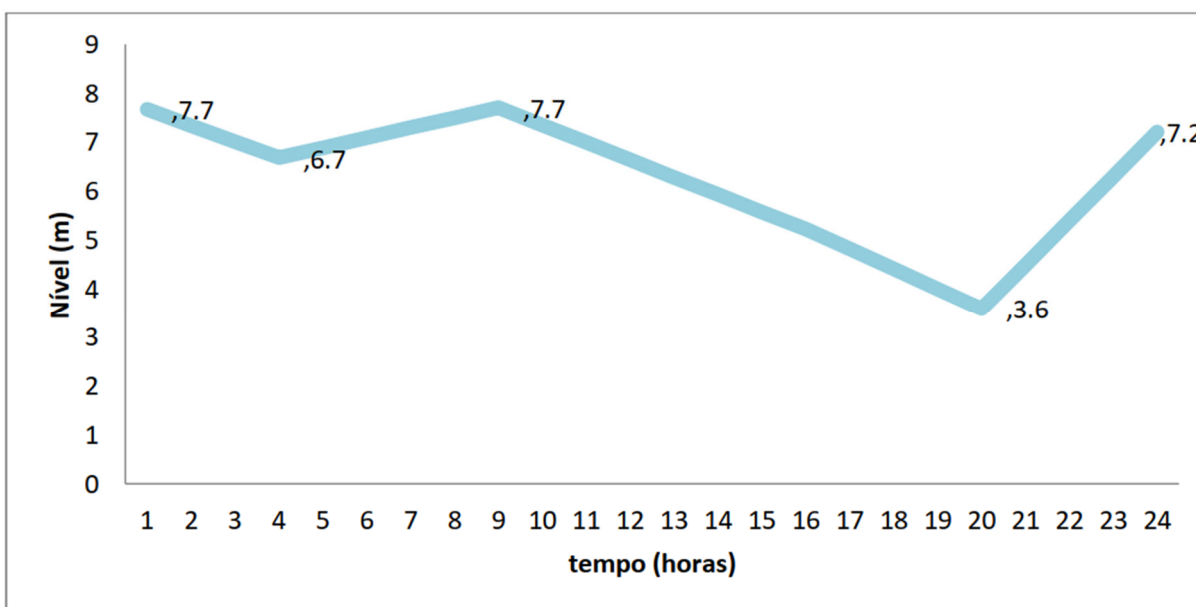
Bombas	
Tipo	Centrífuga
Posição do Eixo	Horizontal
Associação	Paralelo
Marca	KSB
Modelo	RDL0500-685A
Vazão Nominal (m ³ /h)	3693,6
Altura Manométrica (mca)	78,9
Rotação (rpm)	1180
Ano Fabricação	2008
Quantidade (un)	1
Motores Elétricos	
Tipo	Trifásico
Marca	GE MOTORS
Modelo	5PK450G1496501
Tipo de Corrente	Alternada
Tensão (V)	4160
Corrente Nominal (A)	196
Frequência (Hz)	60
Potência (CV)	1600
Rotação (rpm)	1186
Nº de Polos	6
Tipo de Rotor	Gaiola
Rendimento (%)	95,8

Fonte: Pedrosa (2015).

Para otimização do sistema, foi utilizado um modelo de funcionamento no qual o dia foi dividido em cinco períodos para variar a rotação das bombas à vazão demandada, sendo que os intervalos de tempo foram escolhidos com base nas vazões médias de consumo aproximadas, considerando o horário de pico de energia elétrica das 16:00 as 20:00 horas. “Pode-se observar que a otimização propõe velocidades de rotação entre 89 e 92% da nominal, a depender do horário. A maior redução, que leva a 89% do valor nominal, é proposta inclusive no período de 16 às 20 horas, quando a tarifa tem seu maior custo” (Pedrosa, 2015, p.69). As figuras 40 e 41 apresentam respectivamente, a porcentagem da velocidade nominal que foi utilizada e o nível do reservatório de chegada em cada hora do dia.

Figura 40: Variação da velocidade ao longo do dia.

Fonte: Pedrosa (2015).

Figura 41: Variação do nível do reservatório ao longo do dia.

Fonte: Pedrosa (2015).

[...] O custo de energia da elevatória de Pirapama é aproximadamente R\$ 30.000,00 por dia. Com a rotina ótima originada pelo modelo, ocorreria redução de custo para aproximadamente R\$ 28.000,00 por dia, alcançando-se uma economia de R\$ 2.000 reais por dia, aproximadamente R\$ 60.000 por mês. (Pedrosa, 2015, p.70).

Diferente das outras situações apresentadas, o objetivo desse estudo foi prever qual seria a velocidade ideal de funcionamento das bombas para cada demanda horária, pois os motores já eram acionados por inversores. A tabela 8 apresenta o consumo de energia elétrica na Estação Elevatória de Pirapama, após a adequação do funcionamento das bombas.

Tabela 8: Resumo EE Pirapama.

ESTAÇÃO ELEVATÓRIA	Custo Atual (R\$/dia)	Custo Otimizado (R\$/dia)	Economia(R\$ /dia)	Economia(R\$ /Mês)	% de Economia
Pirapama	30.127,43	28.043,78	2.083,65	62.509,50	6,91%

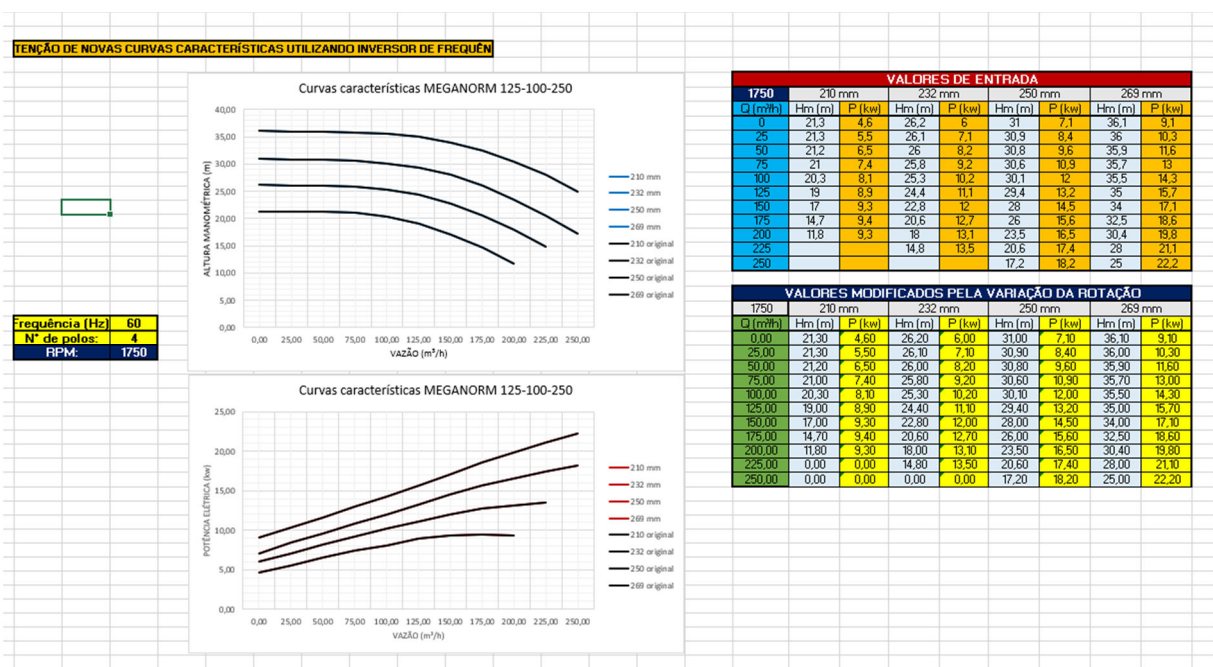
Fonte: Pedrosa (2015).

Diferente dos outros estudos de caso, os motores utilizados já eram acionados por inversores de frequência ligados em alta tensão, sendo o objetivo do trabalho apenas adequar a rotação das bombas de acordo com as vazões médias de cada intervalo de tempo.

8.4. Desenvolvimento de uma planilha para obtenção de novas curvas características para uma família de bombas.

Com objetivo de observar a mudança da curva característica da bomba provocada pela variação da sua rotação de funcionamento através da utilização de um inversor de frequência, foi desenvolvida uma planilha utilizando o Excel® para simular o comportamento das curvas características de uma determinada família de bombas. A interface da planilha pode ser vista na figura 42.

Figura 42: Interface da planilha desenvolvida para variar as curvas características para determinada família de bombas.



Fonte: Autor (2023).

Inicialmente deve-se inserir os valores de altura manométrica e potência, em função da vazão para cada diâmetro de rotor da família de bombas. O modelo escolhido para estudo foi uma bomba KSB Meganorm modelo 125-100-250 de 1750 RPM. Os valores fornecidos pelo fabricante são inseridos na tabela de entrada, apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Dados das curvas características fornecidas pelo fabricante da bomba.

VALORES DE ENTRADA								
1750	210 mm		232 mm		250 mm		269 mm	
Q (m³/h)	Hm (m)	P (kw)	Hm (m)	P (kw)	Hm (m)	P (kw)	Hm (m)	P (kw)
0	21,3	4,6	26,2	6	31	7,1	36,1	9,1
25	21,3	5,5	26,1	7,1	30,9	8,4	36	10,3
50	21,2	6,5	26	8,2	30,8	9,6	35,9	11,6
75	21	7,4	25,8	9,2	30,6	10,9	35,7	13
100	20,3	8,1	25,3	10,2	30,1	12	35,5	14,3
125	19	8,9	24,4	11,1	29,4	13,2	35	15,7
150	17	9,3	22,8	12	28	14,5	34	17,1
175	14,7	9,4	20,6	12,7	26	15,6	32,5	18,6
200	11,8	9,3	18	13,1	23,5	16,5	30,4	19,8
225			14,8	13,5	20,6	17,4	28	21,1
250					17,2	18,2	25	22,2

Fonte: Autor (2023).

Para encontrar as novas curvas características da bomba e as curvas de potência, a planilha utiliza as relações de semelhança apresentadas nas equações 10, 11 e 12. Como o objetivo é simular a utilização de uma IHM, o parâmetro de variação escolhido foi a frequência de operação do motor elétrico utilizado, onde o valor inicial é de 60 Hz (frequência da rede elétrica utilizada no Brasil). A rotação da bomba é calculada em função da frequência de alimentação e do número de polos (que é um valor fixo) do motor, a partir da equação 16. como mostra a tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros de variação do sistema.

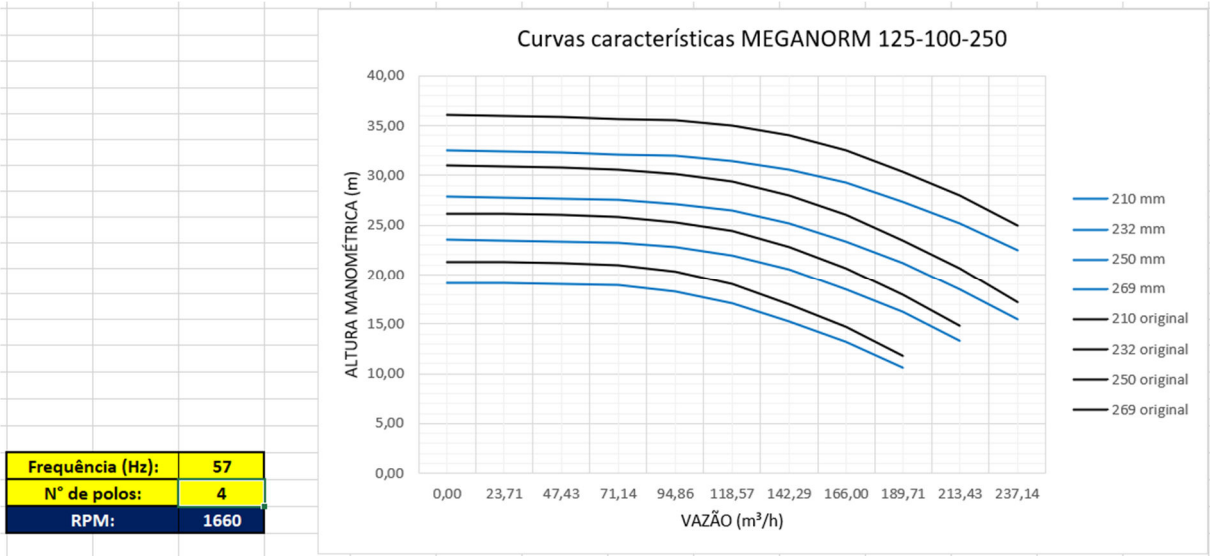
Frequência (Hz):	60
Nº de polos:	4
RPM:	1750

Fonte: Autor (2023).

Como o escorregamento (que é calculado a partir da equação 17) varia para cada tipo de motor e fabricante, adotamos um valor usual encontrado nas placas de identificação, que é de aproximadamente 50 RPM, ou seja, cerca de 2,78%. Variando a frequência de

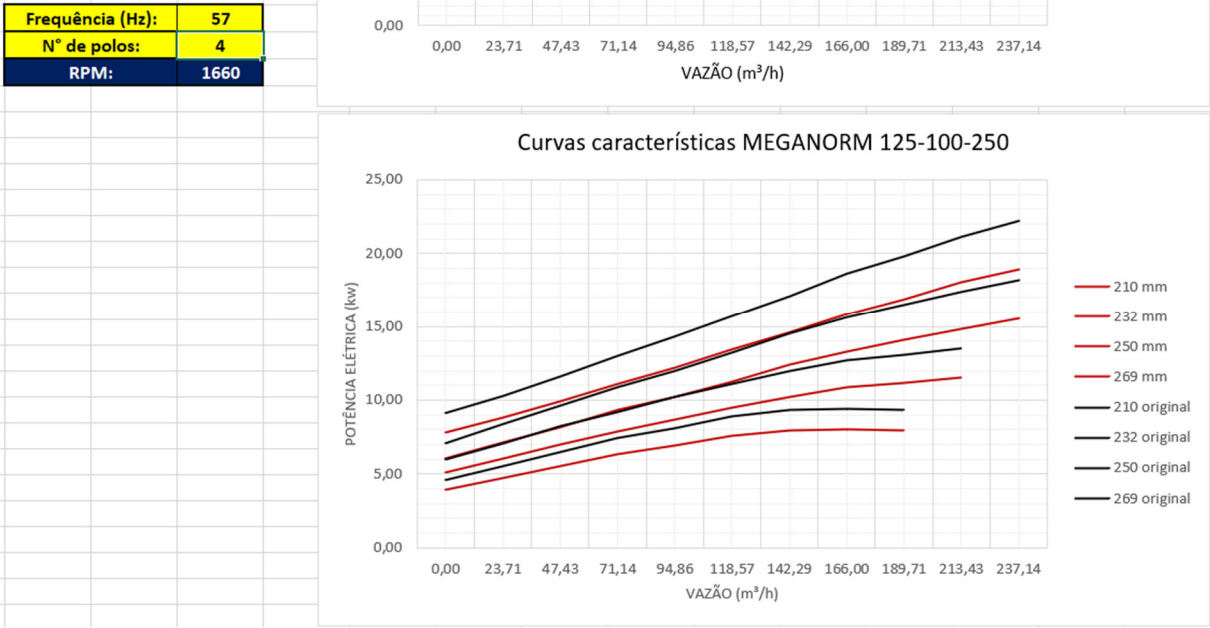
funcionamento, a planilha fornece os gráficos comparativos entre as novas curvas da bomba e as originais, como mostram a figuras 43 e 44, que apresentam respectivamente, curvas referentes à altura manométrica e à potência do motor, obtidas para a frequência de 57 Hz com respectiva rotação de 1660 rpm.

Figura 43: Novas curvas características de altura manométrica (em azul) para frequência de 57 Hz e rotação de 1660 RPM.



Fonte: Autor (2023).

Figura 44: Curvas de potência (em vermelho) para frequência de 57 Hz e rotação de 1660 RPM.



Fonte: Autor (2023).

Além da representação gráfica apresentada nas figuras 43 e 44, a planilha também fornece uma tabela (Tabela 11) com os novos valores de altura manométrica, potência e vazão em função da rotação da bomba.

Tabela 11: Dados das curvas características fornecidas pelo fabricante da bomba.

VALORES MODIFICADOS PELA VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO								
1660	210 mm		232 mm		250 mm		269 mm	
Q (m ³ /h)	Hm (m)	P (kw)	Hm (m)	P (kw)	Hm (m)	P (kw)	Hm (m)	P (kw)
0,00	19,17	3,93	23,57	5,12	27,89	6,06	32,48	7,77
23,71	19,17	4,69	23,48	6,06	27,80	7,17	32,39	8,79
47,43	19,08	5,55	23,39	7,00	27,71	8,19	32,30	9,90
71,14	18,90	6,32	23,21	7,85	27,53	9,30	32,12	11,10
94,86	18,27	6,91	22,76	8,71	27,08	10,24	31,94	12,21
118,57	17,10	7,60	21,95	9,47	26,45	11,27	31,49	13,40
142,29	15,30	7,94	20,52	10,24	25,19	12,38	30,59	14,60
166,00	13,23	8,02	18,54	10,84	23,39	13,31	29,24	15,88
189,71	10,62	7,94	16,20	11,18	21,15	14,08	27,35	16,90
213,43	0,00	0,00	13,32	11,52	18,54	14,85	25,19	18,01
237,14	0,00	0,00	0,00	0,00	15,48	15,53	22,49	18,95

Fonte: Autor (2023).

9. CONCLUSÃO

Os resultados da literatura apresentaram dados consideráveis de economia de energia elétrica nas estações elevatórias, isso mostra grande viabilidade econômica para implantação dos inversores de frequência, em sistemas de grande porte que operam de forma intermitente. Os trabalhos mostraram que os SAA necessitam, além das obras de infraestrutura geral (captação, ETAs, reservatórios...), de dispositivos de automação e controle, como exemplo os inversores de frequência, possibilitando um controle preciso da vazão em função da demanda horária.

A utilização dos inversores possibilita um controle de aceleração durante o acionamento e parada dos conjuntos motobomba, eliminando assim a maioria dos transientes hidráulicos do sistema. Do ponto de vista econômico, com a variação da rotação dos motores, a potência consumida pelos conjuntos é reduzida significativamente, da ordem de aproximadamente 20% em relação à potência instalada, além disso, é possível programar a vazão do sistema em função da demanda horária de consumo, evitando problemas como extravasamento de reservatórios e sobrepressões na rede de distribuição, para o caso de utilização em Boosters.

Do ponto de vista financeiro, os resultados da literatura mostram que a implantação do inversor de frequência tem seu custo amortizado em aproximadamente um ano de funcionamento, isso claro, dependendo da variação da demanda em função da capacidade máxima de vazão do sistema. Além disso, com o uso desses dispositivos, é possível projetar conjuntos elevatórios com capacidade de suprir demandas de futuros horizontes de projeto, sendo que em seu início de operação os mesmos trabalhem com demanda bastante reduzida, mas que podem ser aumentadas de acordo com as necessidades do sistema.

Por fim, com o desenvolvimento de uma planilha, foi possível a realização de ensaios prévios em relação à variação de rotação dos motores, servindo como modelo teórico para estudos de concepção, e a possibilidade de utilização dos inversores para adequação da curva de uma bomba à demanda de um sistema em termos de vazão e altura manométrica, considerando uma determinada bomba escolhida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12214: Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015.

BARROS, M. **Ciclo de vida de inversores de frequência História dos Inversores ABB**. ABB. 2012.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Bookman, 2013.

CHEREM, L. B. **Avaliação do uso de inversor de frequência em estação elevatória de água**. Dissertação de mestrado profissional em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Tocantins. Palmas. 2016.

DIAS, L. L. **Inversores de Frequência: Aspectos Construtivos e Aplicação na Mineração**. Trabalho de conclusão de curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2015.

DIAS, L. V. R.; SANTOS, W. S. **Ações de eficiência hidráulica e energética em estudo de caso de estação Booster na cidade de Rio Verde - GO**. Trabalho de conclusão de curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Aparecida de Goiânia. 2022.

DINIZ, L. C. **Diagnóstico energético sistema de eficiência energética através do uso de inversores de frequência no Booster rio verde**. Tecnia Engenharia. Belo Horizonte. 2016.

DUTRA, J. B. A. **Eficiência Energética no Controle da Vazão em Sistemas de Bombeamento de Água**. Paraíba do Sul, 2005.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica LTDA, 2008.

GOMES, H. P. **Sistemas de Bombeamento-Eficiência Energética**. 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2012.

KSB, Bombas Hidráulicas S.A. **Catálogo Eletrônico, Versão 1.1**. Várzea Paulista, 2000.

NASCIMENTO JÚNIOR, G. C. **Máquinas elétricas: teorias e ensaios**. São Paulo: Érica, 2006.

PEDRA, C. **Inversor de frequência: o que é e como funciona?** Blog Schneider Eletric. 22 de outubro de 2020. Acessado em 23/09/2023.

PEDROSA, H. T. S. **Otimização em estação elevatória de sistemas de abastecimento de água buscando a eficiência energética.** Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2015.

PINHEIRO, H. **Motores Trifásicos de Corrente Alternada.** Módulo 2, Disciplina de Máquinas e Acionamentos Elétricos. Natal: IFRN, 2007.

PLANALTO, **Direito humano à água.** 2014. Disponível em: <
[http://www4.planalto.gov.br/consea/comunicacao/artigos/2014/direito-humano-a-
agua#:~:text=Somente%20em%202010%20a%20Assembleia,de%20todos%20os%20direitos
%20humanos.](http://www4.planalto.gov.br/consea/comunicacao/artigos/2014/direito-humano-a-agua#:~:text=Somente%20em%202010%20a%20Assembleia,de%20todos%20os%20direitos%20humanos.)> Acesso em: 28 de setembro de 2023.

P-SEM/SANEAGO. **Histórico de Consumo Energético Booster Rio Verde.** Goiás. 2021.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica.** 2. ed. São Carlos: Projeto REENGE-EESC/USP, 2006.

SANTOS, M. B. **Benefícios da utilização do inversor de frequência no controle de nível em sistemas de abastecimento de água.** Revista Mecatrone, vol 4, nº1, São Paulo. 2019.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Abastecimento de água: gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento: nível 2.** Salvador: ReCESA, 2008.

WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos.** Jaraguá do Sul. 2021.

WEG. **Catálogo de *Soft Starters*.** Jaraguá do Sul. 2023.