

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AMANDA FINZI DE ABREU

**ANÁLISE DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO**

UBERLÂNDIA – MG
2021

AMANDA FINZI DE ABREU

**ANÁLISE DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
das exigências para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

UBERLÂNDIA – MG

2021

AMANDA FINZI DE ABREU

**ANÁLISE DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO**

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes
Universidade Federal de Uberlândia
Orientador

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG

2021

Dedico este trabalho aos meus pais, irmã e a minha família e amigos por todo o apoio para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Quero deixar aqui os meus agradecimentos a todos que me apoiaram nesta etapa tão importante que foi a elaboração do meu Trabalho de Conclusão de Curso e também, durante toda a minha graduação. Em especial a todos meus familiares e amigos, porém, gostaria de citar aqui o nome de três pessoas que fizeram ainda mais, meu pai João Bazilio de Abreu, minha mãe Waleska Alexssandra Finzi e a minha irmã Andrêssa Finzi de Abreu, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram sempre que precisei e entenderam minha ausência para a elaboração deste trabalho e ao longo dos anos de graduação.

Ao Professor Dr. Luciano Coutinho Gomes, meus sinceros agradecimentos por todo o apoio e atenção para o desenvolvimento deste trabalho, executando a função de orientador, me deu o apoio necessário para o melhor resultado deste trabalho. Ao Professor Dr. Carlos Eduardo Tavares, atual Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, o qual sempre se mostrou disponível e atento durante esta caminhada, buscando o melhor para o curso e alunos. Gostaria também, de deixar um agradecimento especial a todos os professores que se dedicam e buscam melhorar o ensino do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, vocês fazem toda a diferença.

Ter tido a oportunidade de participar da Empresa Júnior de Consultoria em Engenharia Elétrica durante a graduação foi a experiência mais incrível que eu pude ter, portanto gostaria de agradecer aos membros que trabalhei junto durante as gestões, pela paciência, pelo ensinamento, pela amizade construída e pelos momentos compartilhados, em especial aos meus amigos Frederico Lucas de Oliveira Benaventana, Camila Prudente M. Machado, Igor Flores Dionísio e Nicolle Ribeiro Vaz por todo companheirismo e parceria, os quais fizeram toda diferença. Por último, mas não menos importante obrigada Giulio Albieri Antonialli por toda a consideração e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

ABREU, A. F. **Análise do Sistema de Bombeamento de uma Estação de Tratamento de Esgoto**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

Os sistemas de esgotamento sanitário, são responsáveis por parte considerável da energia consumida no Brasil e no mundo. Este consumo se baseia nos diferentes processos existentes de esgotamento sanitário, com destaque para as motobombas das estações elevatórias, que são responsáveis pela maior parte da energia consumida. Parte significativa desta energia gasta se deve à ineficiência destes sistemas, derivada principalmente do emprego de equipamentos de bombeamento de baixo rendimento ou mal dimensionados, do excesso de perda de carga e da falta de manutenção dos sistemas. Este trabalho tem como objetivo apresentar alguns fundamentos teóricos, sobre o sistema de bombeamento de uma estação elevatória e dos principais equipamentos utilizados, além de apresentar de forma prática o sistema elétrico e seus principais subgrupos, para o acionamento e controle da estação.

Na primeira parte, após apresentar um breve panorama do consumo de energia elétrica no setor de saneamento no Brasil, é realizada uma análise sobre estações elevatórias e os equipamentos empregados, destacando-se as principais características para este tipo de aplicação. Posteriormente é apresentado, de forma prática, uma aplicação de um sistema elétrico para uma estação de tratamento de esgoto, destacando-se o sistema de bombeamento da estação elevatória, assim como seu acionamento e comunicação.

Palavras-chave: Estações de Tratamento de Esgoto, Sistemas de Bombeamento, Acionamento por Inversores, Controle de Sistemas Elétricos.

ABSTRACT

ABREU, A. F. **Analysis of the Pumping System of a Sewage Treatment Plant.** Monography (Bachelor in Electrical Engineering) - Faculty of Electrical Engineering, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

The sanitary sewage systems are responsible for a significant part of the energy consumed in Brazil and in the world. This consumption is based on the different existing processes of sanitary sewage, with emphasis on the motor pumps of the pumping stations, which are responsible for most of the energy consumed. A significant part of this wasted energy is due to the inefficiency of these systems, derived mainly from the use of low performance or poorly dimensioned pumping equipment, excessive energy loss and lack of maintenance of the systems. This work aims to present some theoretical fundamentals about the pumping system of a pumping station and the main equipment used, as well as to present in a practical way the electrical system and its main subgroups, for the drive and control of the station.

In the first part, after presenting a brief overview of the consumption of electric energy in the sanitation sector in Brazil, an analysis is made about pumping stations and the equipment used, highlighting the main characteristics for this type of application. Afterwards, a practical application of an electrical system for a sewage treatment plant is presented, highlighting the pumping system of the pumping station, as well as its drive and communication.

Keywords: Sewage Treatment Plants, Pumping Systems, Inverter Drive, Electrical Systems Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma ETE.....	13
Figura 2 - Bomba Centrífuga.....	18
Figura 3 - Curvas Características de Bombas Centrífugas	20
Figura 4 - Configuração Sistema de Bombeamento	21
Figura 5 - Ponto de Operação.....	23
Figura 6 - Curva do sistema operado com Inversor de Frequência	25
Figura 7 - Gráfico da variação do Torque com a Frequência.....	26
Figura 8 - Funcionamento Inversor de Frequência Trifásico.....	27
Figura 9 - Ciclo de Varredura CLP	30
Figura 10 - Exemplo de Funcionamento da Lógica Ladder.....	31
Figura 11 – Divisão do Sistema Elétrico	32
Figura 12 - Conexões do Sistema Elétrico.....	33
Figura 13 - Diagrama Elétrico CCM	35
Figura 14 - Esquema de Comunicação.....	39
Figura 15 - Esquema de Conexão Sinais Motobomba.....	40
Figura 16 - Folha 1 - Sistema de Acionamento.....	41
Figura 17 - Folha 2 - Sistema de Acionamento.....	43
Figura 18 - Folha 3 - Sistema de Acionamento.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
H₂S	Gás Sulfídrico
Hm	Altura Manométrica
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
CPU	<i>Central Process Unit</i>
IHM	Interface Homem Máquina
DC	<i>Direct Current</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
CMB	Conjunto Motobomba
PCA	Painel de Corrente Alternada
QTA	Quadro de Transferência Automática
CCM	Centro de Controle de Motores
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
DP	<i>Decentralized Peripheral</i>
PWM	Pulse-Width Modulation

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. JUSTIFICATIVA.....	12
1.2. OBJETIVOS.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA.....	15
2.2. BOMBAS HIDRÁULICAS.....	17
2.3. SISTEMA DE BOMBEAMENTO	20
2.4. MOTORES ELÉTRICOS.....	23
2.5. INVERSORES DE FREQUÊNCIA	24
2.6. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL.....	28
3. PROJETO ELÉTRICO	31
3.1. INFORMAÇÕES GERAIS DO SISTEMA ELÉTRICO	31
3.2. COMUNICAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO	38
3.3. ACIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO.....	41
4. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

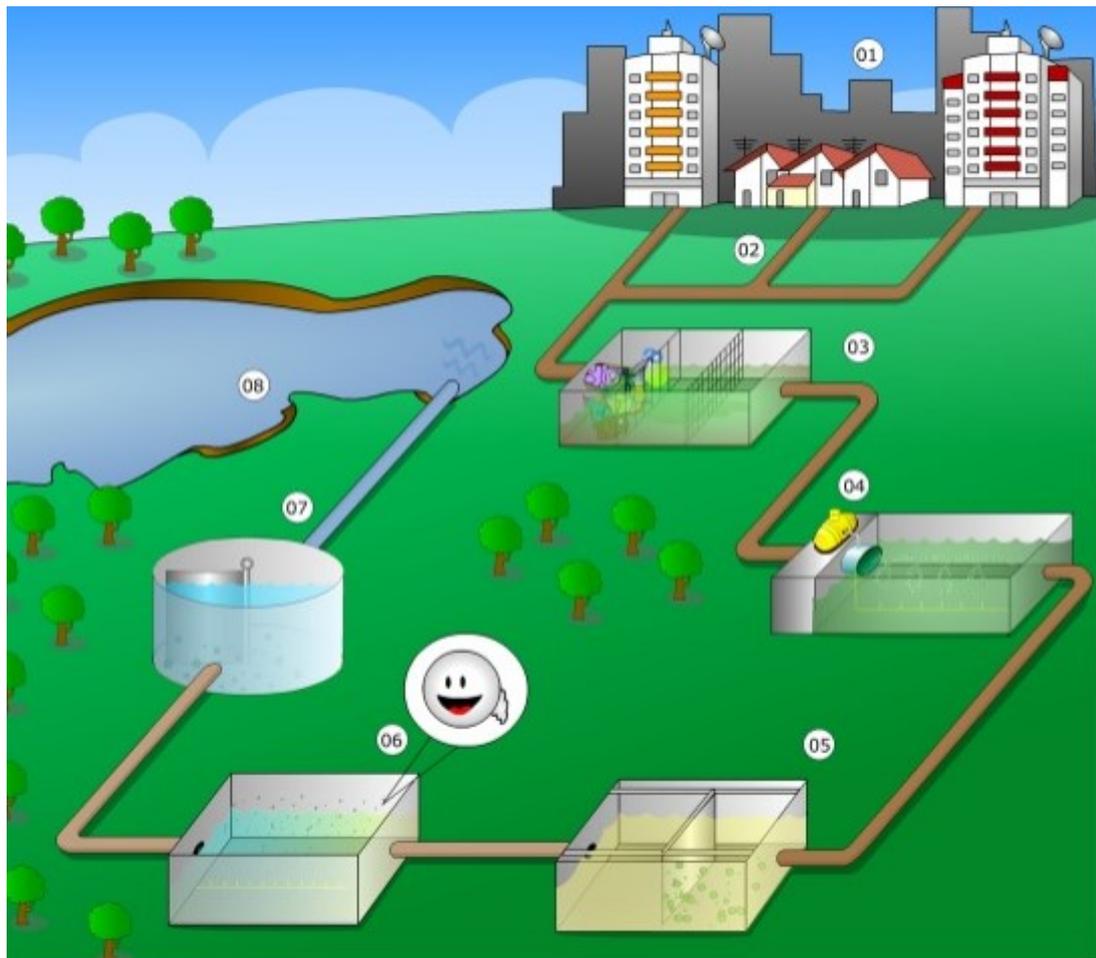
O uso racional de água e de energia na produção é um requisito indispensável para o desenvolvimento econômico e social, pela necessidade urgente da preservação do meio ambiente. Estes insumos estão cada vez mais escassos e, desta forma, mais caros, afetando significativamente os custos de produção no setor industrial. O setor de saneamento é estratégico no que diz respeito ao uso conjunto de água e energia, no tocante à racionalidade da utilização destes insumos, sendo portanto, merecedor de uma atenção especial.

As Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), são fundamentais para garantir que, após a utilização, a água retorne para a natureza despoluída, contribuindo com a prevenção de doenças, a promoção da saúde e a melhora da qualidade de vida da população. O efluente quando chega na estação de tratamento passa por diferentes processos de tratamento. A Figura 1 ilustra as etapas de tratamento do esgoto em uma ETE, sendo:

- Etapa 1: a água tratada após ser utilizada para diferentes fins se transforma em esgoto;
- Etapa 2: o esgoto passa pelas redes coletoras até chegar às Estações de Tratamento de Esgoto;
- Etapa 3: antes de ser tratado, o esgoto passa por grades para retirar a sujeira, este processo é chamado de gradeamento;
- Etapa 4: depois de passar pelas grades, o esgoto passa pelo processo de desarenação, onde é retirada a areia contida nele;
- Etapa 5: o esgoto é enviado para os decantadores primários, onde ocorre a sedimentação das partículas mais pesadas;
- Etapa 6: nesta etapa ocorre o tratamento biológico, de forma que o ar, fornecido nos tanques de aeração, faz com que os organismos ali presentes se multipliquem e consumam a matéria orgânica presente, formando iodo e diminuindo a carga poluidora;

- Etapa 7: o esgoto é enviado para os decantadores secundários, onde o sólido restante será separado da parte líquida;
- Etapa 8: a parte líquida é lançada nos rios ou então reaproveitada para alguma atividade.

Figura 1 - Esquema de uma ETE



Fonte: Página do Esquadrão do Conhecimento¹

Para que todas as etapas citadas anteriormente aconteçam, é necessário que o escoamento possua energia suficiente para promover o movimento desejado, portanto é fundamental o uso de equipamentos capazes de transmitir ao fluido a energia mecânica necessária, sendo as motobombas os equipamentos responsáveis por realizar esta tarefa.

¹ Disponível em: <<https://esquadraodoconhecimento.wordpress.com/ciencias-da-natureza/quim/estacao-de-tratamento-de-esgoto/>> Acesso em: 02 de julho 2021.

Os sistemas de esgotamento sanitário são responsáveis por entre 2 e 3% do consumo total de energia elétrica no nosso país, o equivalente a cerca de 10 bilhões de kWh/ano (PROCEL SANEAR, 2008). Além disto, conforme dados da Companhia de Saneamento de São Paulo (SABESP), o consumo de energia elétrica em uma ETE resulta 90% da operação dos grupos de motobombas, 7,5% de encargos com serviços auxiliares e os restantes 2,5% estão relacionados com a iluminação.

Portanto, é possível concluir quão significativo é o consumo de energia elétrica no setor de saneamento básico, e a importância que a operação das motobombas apresentam neste cenário, sem falar na questão da sustentabilidade, algo que tem sido cada vez mais buscado em virtude dos propósitos organizacionais e da relação com a comunidade.

Entretanto, no mundo, em média, 25% da energia gasta nestes sistemas se deve à ineficiência energética (GOMES, 2009). Esta ineficiência é causada pelo emprego de equipamentos de bombeamento de baixo rendimento e mal projetados, do excesso de perda de carga hidráulica nas tubulações, da ausência de manutenção, dentre outros fatores.

1.2. OBJETIVOS

No setor dos sistemas de tratamento de esgoto, sendo muitas vezes o consumo de energia elétrica das estações elevatórias o maior encargo financeiro das entidades gestoras destas infraestruturas, e diante de problemas relacionados a gestão de recursos e equipamentos mal projetados, com este trabalho procurou-se, analisar o sistema elétrico empregado para realizar o bombeamento do efluente em uma ETE, abordando os principais dispositivos envolvidos e formas para se proporcionar um projeto mais eficiente.

Além disto, é apresentado o sistema elétrico e seus principais subgrupos, com o intuito de realizar um estudo mais efetivo no tocante ao acionamento e ao controle das motobombas para o sistema de bombeamento, de forma completa, detalhada e de acordo com as atuais tecnologias do mercado e as normas para instalações elétricas.

O objetivo deste trabalho é transmitir determinados conhecimentos sobre estações elevatórias para auxiliar no desenvolvimento de projetos simples e eficientes de bombeamento, que é algo extremamente importante em uma ETE e que pode se tornar penoso, caso não seja bem estruturado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

Para que o fluido que chega na ETE seja tratado, é necessário que ele seja deslocado de um local situado a uma determinada cota até outro a uma cota superior, de forma que as forças que se opõem a esse movimento ascendente precisam ser vencidas. Para que o escoamento possua energia suficiente para promover o movimento desejado é fundamental o uso de equipamentos capazes de transmitir ao fluido a energia mecânica necessária.

As estruturas encarregadas em fazer com que o fluido chegue a locais do sistema localizados em cotas mais elevadas são denominadas estações elevatórias, as quais são as maiores responsáveis pelos gastos energéticos de uma ETE. Segundo alguns autores, podem representar 90% dos encargos com energia elétrica (ALMEIDA, 2010).

Basicamente, é possível reduzir os custos com a energia elétrica de uma ETE de diferentes formas, pela redução do consumo de energia elétrica, sem a redução e alterando a política operacional.

Quando se fala em reduzir o custo pela diminuição do consumo de energia elétrica, devemos levar em consideração reduzir a altura manométrica das bombas pela mitigação das perdas de carga contínua do escoamento, em virtude da substituição das tubulações por outras de diâmetro mais favorável. Fisicamente, a altura manométrica é a quantidade de energia hidráulica que a bomba deverá fornecer ao fluido, a fim que o mesmo seja recalcado a uma certa altura, vencendo, inclusive, as perdas de carga. Dessa forma, um estudo das fugas de fluido em todo o sistema

deve ser feito, a fim de evitar perdas desnecessárias, para que os volumes elevados passem a ser inferiores e por conseguinte, o consumo de energia elétrica.

A escolha de um maquinário mais eficiente proporciona maior produtividade para o processo, os gastos com energia tendem a cair consideravelmente, apresentando melhores resultados do ponto de vista energético e explorando por completo o potencial do sistema. A decisão por utilizar equipamentos energeticamente eficientes, mesmo sem ser na fase de projeto, pode ser vantajosa financeiramente, sendo necessário realizar o cálculo do retorno do investimento.

Já as ações operacionais para redução do custo com energia, seriam a melhoria do fator de carga e a coordenação entre os grupos elevatórios. A análise do fator de carga possibilita identificar os pontos de pico de demanda e avaliar a uniformidade da utilização da energia elétrica, visando o melhor aproveitamento da instalação e da demanda contratada.

Manter apenas os grupos elevatórios que sejam imprescindíveis nos períodos do dia em que o preço do kWh é mais elevado, e utilizar inversores de frequência para possibilitar um melhor ajuste entre o efluente elevado e o consumo de água pela rede, são alternativas vinculadas a política operacional da ETE. Outra medida, seria alterar a potência contratada e o tarifário definido com o fornecedor de energia, para isto seria necessário realizar um estudo e verificar qual opção mais se adequaria para a situação.

A boa gestão e a manutenção do sistema são essenciais para prolongar a vida dos equipamentos após a instalação e fazer com que o sistema opere de forma otimizada. Visto que, 90% dos problemas elétricos decorrem de problemas mecânicos e químicos, sendo os principais relacionados a queima do conjunto motobomba (70%) e defeitos em geral de cabo elétrico (30%) (TSUTIYA, 2004). Deve-se tomar um cuidado especial com o gás sulfídrico (H₂S), proveniente da decomposição de material orgânico, pois ele provoca oxidação nos contatos elétricos, o que pode paralisar o sistema.

2.2. BOMBAS HIDRÁULICAS

A bomba hidráulica tem a capacidade de transformar energia elétrica em energia mecânica e transmiti-la ao escoamento, são peças fundamentais em qualquer sistema de tratamento de água. O grau de dependência destes equipamentos em uma ETE é alto.

Em elevatórias, é comum trabalhar-se com duas ou mais bombas operando individualmente ou em paralelo, enviando o líquido bombeado por uma única tubulação de recalque. Para a associação em paralelo, cada bomba é responsável por uma parcela da vazão total recalçada (GURGEL, 2006).

A utilização da bomba correta é importante para que se tenha uma conta de energia compatível com a necessidade. Muitas empresas não costumam realizar os cálculos para a determinação da bomba mais adequada, normalmente as bombas são superdimensionadas, o que acarreta custos elevados na conta de energia e na aquisição das máquinas. Portanto, é importante determinar a escolha da bomba de forma que não utilize mais energia do que o necessário ou menos do que é requerido, sendo o último caso o mais crítico, pois corre-se o risco de o fluido bombeado não conseguir chegar ao seu destino.

Para a determinação da melhor bomba e do melhor motor que atendam as características de acordo com os respectivos rendimentos e a potência necessária, deve-se calcular a perda de carga nas tubulações, levando-se em consideração o comprimento, e identificar a vazão requerida para o sistema, considerando a diferença de altura entre a estação de elevação e as demais bombas.

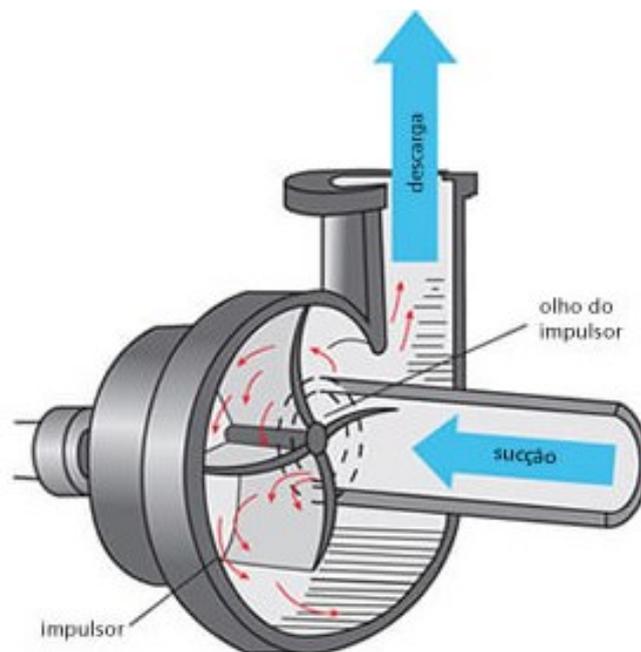
Existem quatro tipos diferentes de bombas hidráulicas: bombas centrífugas, rotativas, de embolo (ou de pistão) e de poço profundo (HAIBARA, 2013). Para instalações para água e esgoto, usualmente utiliza-se bombas centrífugas de eixo vertical, acionadas por motores elétricos, ideais para poços subterrâneos profundos. A força centrífuga transfere energia para o líquido à medida que este escoar continuamente pelo interior da máquina, o que promove uma pressão de sucção, favorecendo um maior volume dos líquidos transportados por esta bomba.

A potência a ser fornecida é externa à bomba, por meio de um motor, podendo este ser um motor elétrico, um motor a diesel ou até mesmo uma turbina a vapor. Do

bocal de sucção o fluido é encaminhado a um ou mais rotores que giram dentro do corpo da bomba, realizando a conversão de energia cinética em energia potencial de pressão. O fluido sai da bomba pelo bocal de recalque.

A energia cedida para realizar a diferença de pressão entre a sucção e o recalque da bomba é conhecida como altura manométrica total, é em função dela que é possível elevar e transferir os fluidos, empregando os conceitos do Princípio de Bernoulli. A Figura 1 representa o caminho percorrido pelo fluido no interior da bomba centrífuga.

Figura 2 - Bomba Centrífuga



Fonte: Loxan Dedraus, 2019

As curvas características servem para descrever as condições operacionais de uma bomba e permitem relacionar a variação de altura manométrica com a vazão a uma velocidade constante. Para o caso de líquidos viscosos a localização da curva característica e da curva de rendimento, sofrem alterações. A seleção da melhor opção é feita de modo que o funcionamento esteja próximo à situação de melhor rendimento.

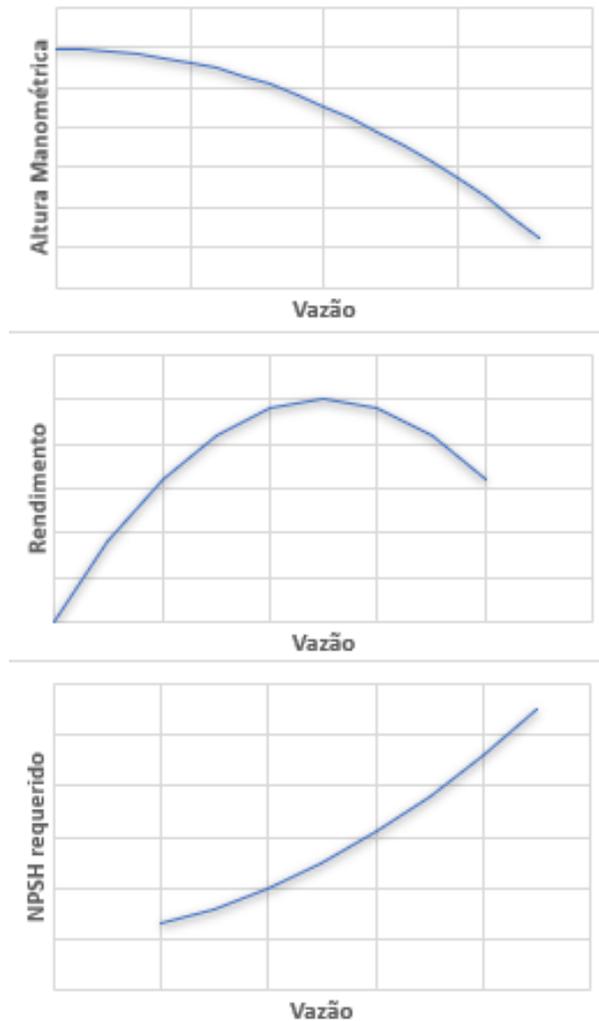
O rendimento de uma bomba é a relação entre o trabalho realizado e a potência cedida ao eixo da bomba, sendo a segunda variável maior do que a primeira por conta das perdas hidráulicas e mecânicas no interior da bomba.

A altura manométrica (H_m) é medida de altura de uma coluna de líquido que a bomba pode criar, resultante da energia cinética que a bomba dá ao fluido. A principal razão para usar altura ao invés de pressão, para medir a energia de uma bomba centrífuga, é que a pressão variaria dependendo da densidade do fluido, mas a altura permanece a mesma.

O NPSH (Net Positive Suction Head) disponível, refere-se à carga energética líquida disponível na instalação para permitir a sucção do fluido, já o NPSH requerido, é a carga energética líquida requerida pela bomba para promover a sucção. Sendo assim, a energia disponível na instalação para sucção deve ser maior que a energia requerida pela bomba, de forma a evitar que haja cavitação, fenômeno em que bolhas, causadas pelo rápido aumento da pressão dentro da bomba, se fundem em uma dada zona com ausência de líquido e podem reduzir a eficiência da bomba, causando ruído, vibrações e fratura do rotor e da carcaça.

As três variáveis explicadas anteriormente caracterizam as condições de funcionamento de uma bomba (MELLO E YANAGI, 2009). Podendo as curvas de rendimento, altura manométrica e NPSH requerido serem criadas em gráficos separados ou em um único gráfico em função da vazão. Para bombas centrífugas, estes gráficos possuem as seguintes formas apresentadas na Figura 2.

Figura 3 - Curvas Características de Bombas Centrífugas



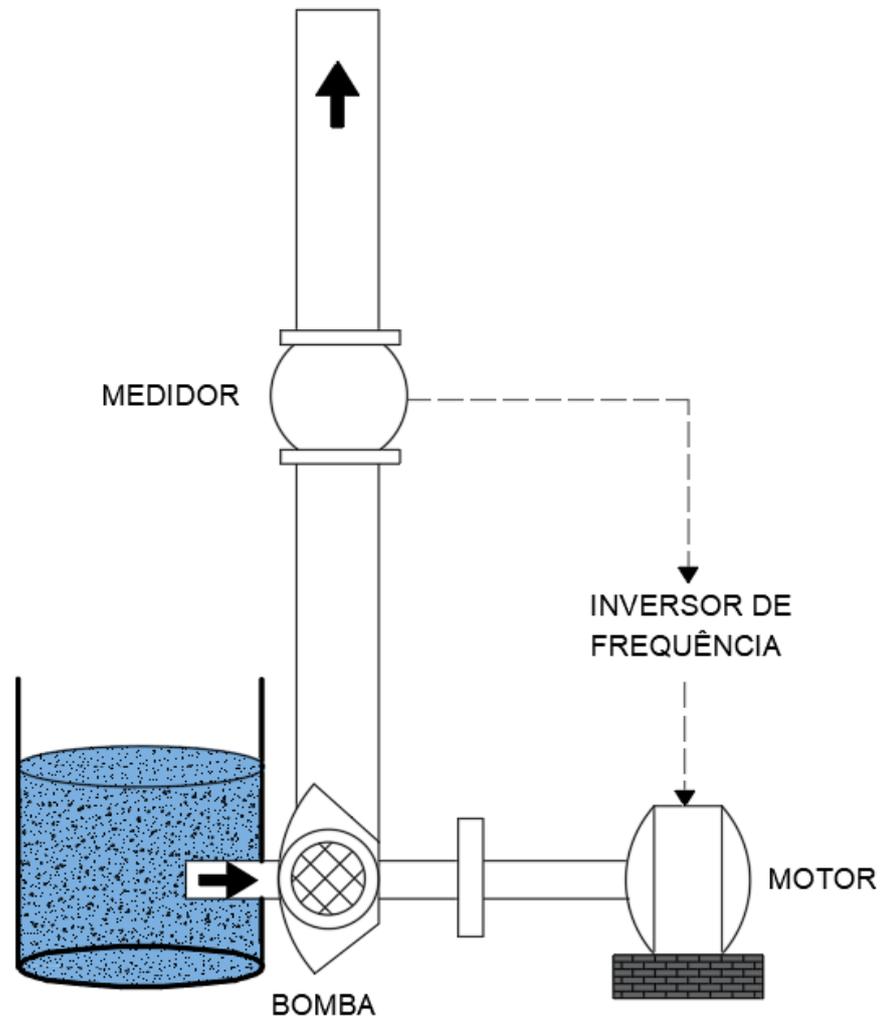
Fonte: Autor, 2021

2.3. SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Utilizar um sistema de bombeamento de esgoto eficiente é fundamental para evitar entupimentos e o odor desagradável derivado da formação de iodo, gerado a partir dos microrganismos decompositores e a própria matéria orgânica digerida do esgoto, que se acumulam no fundo dos poços da ETE.

Em sistemas em que existe a necessidade de controlar a vazão e a pressão em função da demanda, o bombeamento de água por meio de estações elevatórias acionadas por inversores de frequência se apresenta como uma excelente alternativa.

Figura 4 - Configuração Sistema de Bombeamento



Fonte: Autor, 2021

É possível associar um controlador, ao conjunto motobomba, e um sistema de sensores, para medir as grandezas de interesse. Ao perceber a diminuição da necessidade de vazão na rede, esse sistema associado, reduz automaticamente a velocidade de rotação do motor, por meio da atuação do inversor de frequência, e quando a vazão requerida é maior que a estabelecida, o inversor aumenta a velocidade de rotação do motor (CAVALCANTI et al., 2018).

Uma série de fatores devem ser levados em consideração, como por exemplo: a viscosidade do fluido, a vazão requerida, o rendimento global do motor, o rendimento da bomba e a altura manométrica. A primeira exigência para a operação do sistema de bombeamento, é que nenhuma cavitação ocorra ao longo da grande faixa

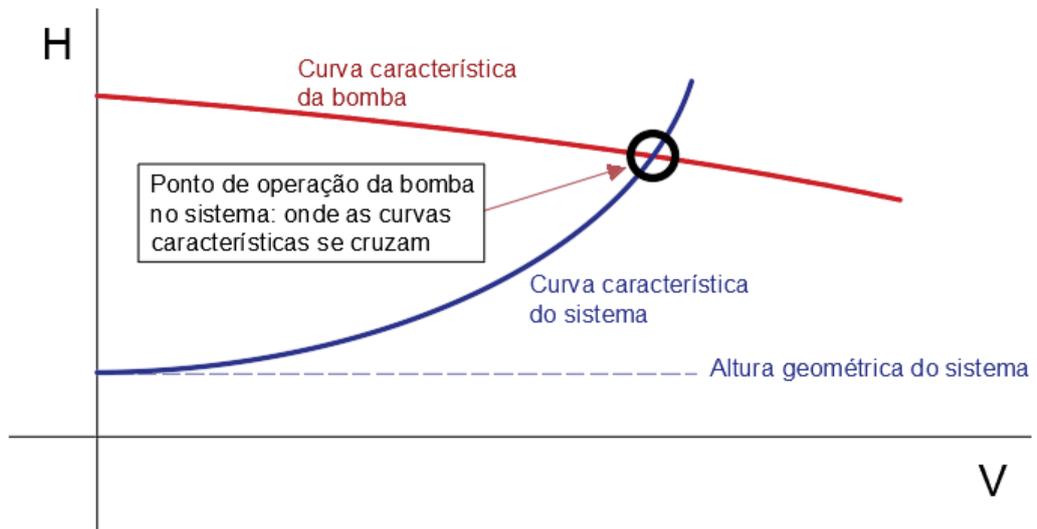
operacional da bomba e a segunda, é que um fluxo contínuo mínimo seja sempre mantido durante a operação.

A eficiência do bombeamento está diretamente associada às perdas, à deterioração do sistema, ao consumo de energia elétrica associado ao funcionamento dos conjuntos motobombas e ao controle de pressão e vazão. A correta parametrização destas variáveis significa manter os custos baixos de operação principalmente quando há variação da demanda a ser bombeada no sistema.

As perdas de carga referem-se à energia perdida pela fluido no seu deslocamento pelas tubulações, sendo estas perdas de energia, provocadas por atritos entre o fluido e as paredes da tubulação, devido à rugosidade da mesma (MELLO E YANAGI, 2009). Portanto, ao projetar um sistema de bombeamento, deve-se considerar as perdas de energia.

A curva característica do sistema de bombeamento representa a relação entre a vazão e as perdas hidráulicas, ela deve ser desenvolvida pelo usuário com base nas condições de serviço, sua importância está na determinação do ponto de operação da bomba, o qual é obtido no encontro da curva característica do sistema com a curva característica da bomba. Para um dado sistema, o ponto de operação da bomba é definido pelo ponto de interseção das curvas características, sendo possível escolher o tipo de bomba a partir da localização do ponto de operação.

Figura 5 - Ponto de Operação



Fonte: Autor, 2021

2.4. MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é o propulsor de todo o sistema, sua função é fornecer energia mecânica aos equipamentos e, conseqüentemente, ao processo. Cerca de 49% do consumo de energia do setor industrial é atribuído aos motores elétricos, sendo 2,3% deste valor da responsabilidade do setor de saneamento básico (PROCEL SANEAR, 2005). No âmbito de saneamento o emprego de motores elétricos está significativamente relacionado aos sistemas de bombeamento.

Fundamentalmente, eles são divididos de forma geral de acordo com a operação, podendo ser em corrente contínua ou corrente alternada. Um motor de corrente contínua necessita de uma fonte de corrente contínua de energia ou de um dispositivo para conversão de corrente alternada em contínua, ele apresenta ótima regulação e precisão no estabelecimento da velocidade operacional.

Os motores de corrente alternada são mais utilizados em função da distribuição de energia ser realizada em corrente alternada, eles podem ser divididos em duas categorias: síncronos e assíncronos. Os síncronos apresentam velocidade constante

e proporcional a frequência da rede, o uso de inversores de frequência para este caso está associado a necessidade de precisão de velocidade aliada à variação de carga.

Já quando se fala de motor assíncrono ou de indução, precisamos entender o conceito de escorregamento. Este fenômeno nada mais é do que a diferença entre a velocidade síncrona do estator e a velocidade do rotor que é medida na ponta do eixo, sendo esta velocidade proporcional e de forma oposta ao conjugado externo.

Os motores assíncronos ou de indução são os mais usados, pois apresentam vantagens como a utilização da energia elétrica com baixo custo, a facilidade de transporte, a limpeza e simplicidade de comando por sua construção simples, o seu custo reduzido e a sua grande versatilidade de adaptação às cargas de diferentes tipos, além de melhores rendimentos (WEG, 2020).

2.5. INVERSORES DE FREQUÊNCIA

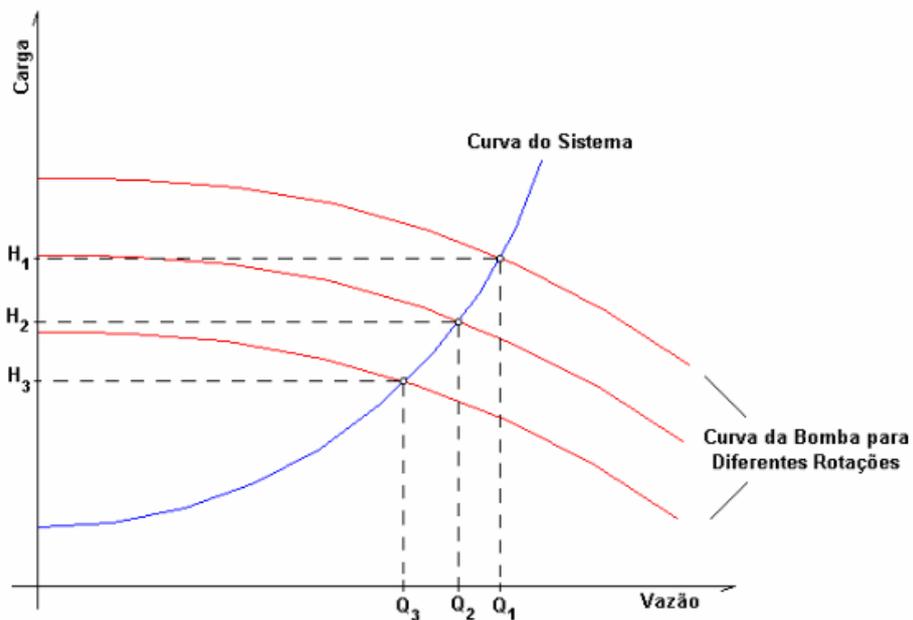
O controle de vazão realizado por meio de uma válvula na saída, acarreta desperdício de energia elétrica e prejuízos a estrutura do sistema. Desta forma, a ação de regulação da vazão por válvula aumenta a perda de carga local e eleva, por conseguinte, a carga a montante da válvula de controle, sendo a potência consumida pela bomba proporcional a vazão e a carga, o que se tem é uma redução gradativa da vazão bombeada com um aumento do consumo (ARMINTOR E CONNORS, 1987). O uso do inversor de frequência em instalações de bombeamento surgiu diante da necessidade de racionalizar o uso da energia elétrica sem afetar o controle e a operação do sistema.

Os sistemas de bombeamento são projetados em função de uma vazão e altura manométrica, tomando como base as curvas de eficiência das bombas, quando se há a mudança desse ponto de operação, um rendimento inferior das bombas e aumento do consumo de energia podem ser esperados.

De acordo Rodrigues (2007) o inversor de frequência, através do controle da rotação do motor, promove a alteração da curva da bomba mantendo constante a curva do sistema, fazendo com que o consumo de energia seja apenas o necessário e proporcional a rotação do motor. Para o melhor aproveitamento do rendimento da

bomba, o ponto referente à demanda máxima deve estar situado à direita da curva de melhor rendimento, pois desta forma, na maior parte do tempo de operação, o sistema de bombeamento funcionará nas máximas possibilidades de eficiência do equipamento.

Figura 6 - Curva do sistema operado com Inversor de Frequência



Fonte: Rodrigues, 2007

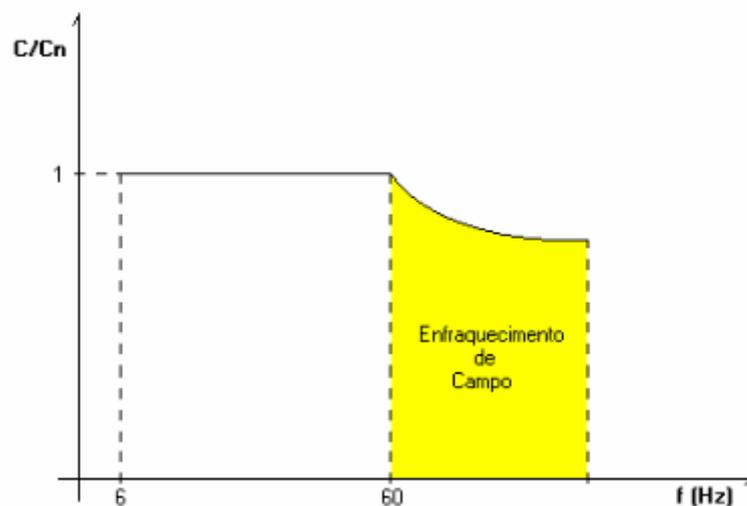
A corrente elétrica é a principal grandeza elétrica limitante no dimensionamento de um inversor, mas é importante notar outros aspectos da aplicação como a demanda de torque, podendo ser constante ou quadrático, a precisão de controle, as necessidades particulares de partidas e frenagens da aplicação do sistema.

Costuma-se utilizar soft-starters quando o acionamento elétrico não exige variação da velocidade do motor e deseja-se apenas uma partida mais suave, evitando quedas de tensão da rede de alimentação. Já para um controle mais eficaz, cujo objetivo é o acionamento com o controle da velocidade de rotação dos motores elétricos a corrente alternada são utilizados inversores de frequência.

A ação se baseia na variação do fluxo magnético que é proporcional à variação da tensão conjuntamente com a frequência, mantendo o fluxo magnético constante e

por conseguinte o torque. Esta variação acontece de forma linear até a frequência nominal do motor, acima deste ponto determina-se uma região chamada de enfraquecimento do campo, em que o torque começa a diminuir.

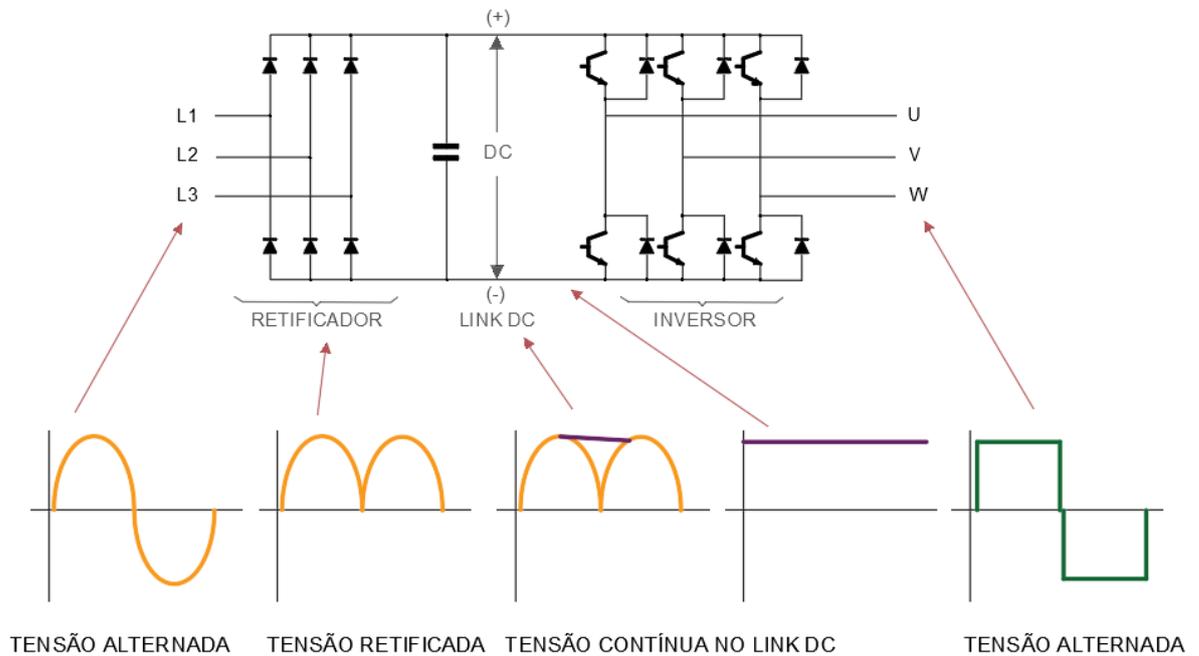
Figura 7 - Gráfico da variação do Torque com a Frequência



Fonte: Rodrigues, 2007

Os inversores de frequência são formados basicamente por uma ponte retificadora e dois capacitores de filtro, que alimentam um barramento DC, que por sua vez alimenta transistores IGBT's que são comandados através de uma lógica de controle, ligando e desligando-os de modo a alternarem o sentido da corrente que circula pelo motor (RODRIGUES, 2007). Analisando o inversor de frequência trifásico da Figura 6, os pulsos são distribuídos pelos 6 transistores IGBT's, quando em operação o que se tem é o acionamento dos transistores associados três a três, alternando assim o sentido da corrente e formando na saída uma tensão alternada defasada de 120° uma da outra.

Figura 8 - Funcionamento Inversor de Frequência Trifásico



Fonte: Autor, 2021

Essa combinação de abertura e fechamento dos IGBT's é controlada a partir da estratégia PWM (*Pulse Width Modulation*), que permite a geração de ondas senoidais de frequência variável (CASADA et. al, 2000). O princípio de controle pode ser escalar ou vetorial. No controle vetorial a onda gerada se aproxima muito mais de uma onda senoidal perfeita, enquanto no escalar não, o que pode fazer com que o motor elétrico produza um ruído.

O inversor escalar opera tendo como referência a curva da tensão pela frequência, permitindo a parametrização da curva. Sendo o torque função direta da corrente de alimentação, este tipo de inversor não oferece altos torques para baixas rotações. É indicado para partidas suaves, operação acima da velocidade nominal do motor e operação com constantes reversões.

O inversor vetorial possui uma curva que varia de acordo com a solicitação de torque, possuindo circuitos que variam a tensão e a frequência do motor, através do controle das correntes de magnetização e do rotor. Este tipo de inversor é indicado para torque elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável (RODRIGUES, 2007).

Os inversores são divididos em quatro blocos:

- Unidade Central de Processamento (CPU): É nesse bloco que as informações como parâmetros e dados do sistema estão armazenadas e executa a geração dos pulsos de disparo para os IGBT's, que alteram o sentido da corrente que circula no motor, por meio de uma lógica de controle, sendo uma função vital para o funcionamento do inversor;
- Interface Homem Máquina (IHM): É o display que permite visualizar o que está ocorrendo no inversor e realizar a parametrização;
- Interfaces: Permite a interação externa com o inversor de frequência para a execução de comandos que podem ser analógicos ou digitais. Para controle da velocidade de rotação é comum utilizar uma tensão analógica de comando, de forma que a velocidade será proporcional a tensão;
- Etapa de Potência: É constituída por um circuito retificador, que alimenta por meio do barramento DC o módulo IGBT do circuito de saída inversor.

Quanto ao dimensionamento dos inversores, é feito a partir dos dados da tensão de alimentação, da corrente nominal do motor elétrico e da carga que ele irá acionar, facilmente combinados com o auxílio do catálogo do fabricante (RODRIGUES, 2007). A capacidade de corrente deve ser igual ou um pouco superior à corrente nominal do motor.

2.6. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

Controlador Lógico Programável (CLP) é um computador responsável por realizar funções específicas por meio das instruções de um programa, concebido para ambientes industriais. Ele pode ser dividido em três partes principais sendo o cartão de entrada, o cartão de saída e o processador. O cartão de entrada é o responsável por receber os sinais externos ao CLP, podendo ser eles digitais ou analógicos. Os sinais digitais são aqueles que representam apenas duas variações de status em seu

funcionamento como por exemplo sinais providos de botoeiras e os analógicos apresentam uma variação da grandeza elétrica em seu sinal, como por exemplo sinais de termopares.

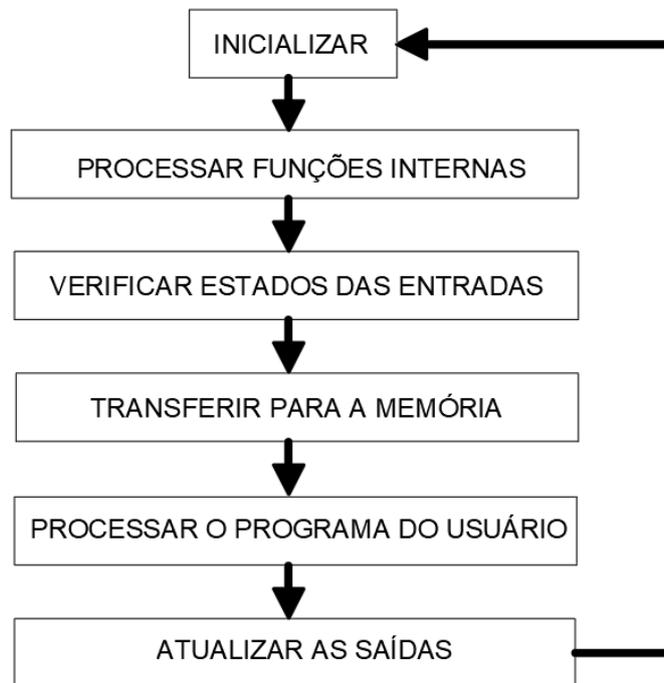
Após a recepção dos sinais externos o processador, que também é chamado de CPU, entra em ação, sendo o responsável por realizar a execução do programa configurado, ou seja, ele realiza a verificação do status das entradas e com base na programação ele atualiza as saídas do CLP. Sendo assim, o cartão de saída é o responsável por acionar as cargas elétricas que processador comanda, podendo também trabalhar de maneira digital ou analógica.

O CLP fornece diversas vantagens como operações matemáticas mais complexas, processamento mais rápido, comunicação com outros dispositivos e redução drástica do tamanho e complexidade dos painéis elétricos.

A primeira geração de CLP possuía programação em Assembly, que é uma linguagem de programação de baixo nível, dessa forma, era necessário conhecer a eletrônica do projeto do CLP. Hoje existem padrões de protocolo de comunicação para facilitar a interface com equipamentos de outros fabricantes e com sistemas supervisórios e redes internas de comunicação.

O CLP funciona de forma sequencial, o tempo total para realizar um ciclo de varredura em etapas é chamado de CLOCK, enquanto cada etapa do ciclo é executada as outras permanecem inativas, dessa forma, o processador deve apresentar alta velocidade. As etapas do ciclo de varredura são apresentadas na Figura 9.

Figura 9 - Ciclo de Varredura CLP



Fonte: Autor, 2021

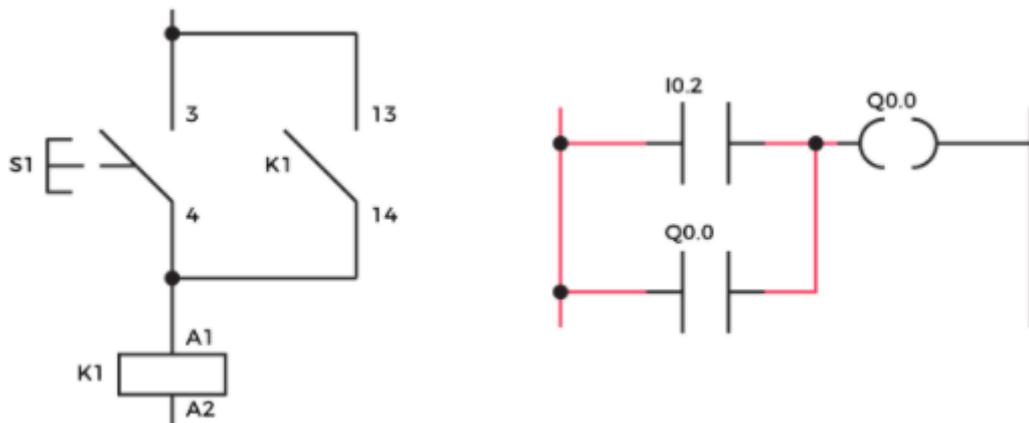
As memórias do CLP podem ser divididas em três, sendo elas a memória de dados, a memória do usuário e a memória do programa supervisor. A memória de dados armazena valores do programa do usuário, a memória do usuário é um espaço reservado ao programa do usuário e a memória do programa supervisor é responsável pelo gerenciamento de todas as atividades do CLP, não podendo ser modificada pelo usuário.

De acordo com a IEC 61131-3 são propostos cinco padrões de linguagem para programação, são elas Diagrama Ladder (gráfica), Diagrama de Blocos (gráfica), Texto Estruturado (textual), Lista de Instruções (textual) e Diagrama de Funções Sequenciais (gráfica). A linguagem Ladder foi a primeira a ser desenvolvida para a programação e é a mais difundida, é uma linguagem de programação gráfica muito semelhante com a lógica de comandos elétricos.

Assim como nos diagramas elétricos o caminho por onde a energia chega aos contatos e atuadores são representadas por linhas, entretanto, são representadas duas linhas verticais, a linha da esquerda possui o estado sempre ligado ou um e a linha da direita possui estado sempre desligado ou zero. A Figura 10 representa a

comparação entre a lógica de comandos elétricos e a lógica Ladder, sendo possível observar a semelhança entre elas.

Figura 10 - Exemplo de Funcionamento da Lógica Ladder



Fonte: Andrade, 2018

Os contatos são elementos que representam as entradas lógicas atuadas externamente ao sistema, podendo ser um contato normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF). As bobinas são elementos que quando atuados mudam seu estado de zero para um, assim como de outros elementos a ela associados, devendo estar alocada na última coluna do diagrama, que corresponde a saída, os elementos a ela interligados devem resultar numa operação lógica verdadeira.

3. PROJETO ELÉTRICO

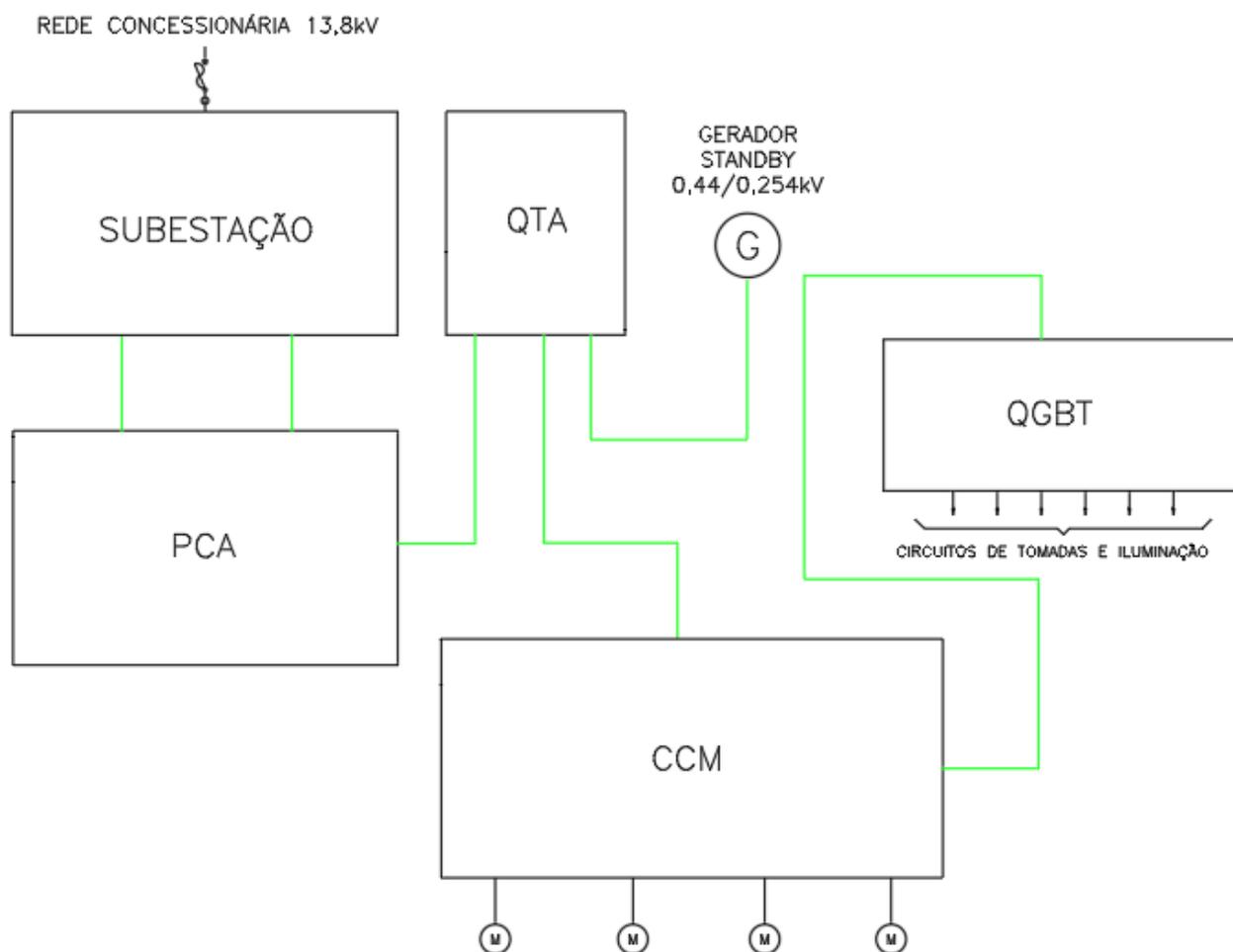
3.1. INFORMAÇÕES GERAIS DO SISTEMA ELÉTRICO

Os sistemas elétricos são acomodados em painéis, os quais são utilizados para administrar, simplificar e verificar a energia elétrica dentro de uma instalação, eles permitem a distribuição da energia para diferentes circuitos de forma organizada, o que facilita a manutenção e a operação. Existem vários modelos de painéis elétricos que atendem diferentes necessidades e todos devem atender plenamente as normas técnicas em vigor e os mais eficientes critérios de engenharia, proporcionando segurança para a instalação, tais como a NBR 5410, a regulamentação para

instalações elétricas em baixa tensão, e a NR-10, regulamentação para instalações e serviços em eletricidade. Dependendo do tipo do painel elétrico, existem outras normas técnicas que devem ser seguidas.

Dessa forma, o sistema elétrico pode ser dividido em conjuntos com diferentes funções acomodados em painéis elétricos específicos. O projeto elétrico real de uma ETE foi representado na Figura 11, a qual divide sistema em blocos, desde a entrada da energia fornecida pela concessionária até a alimentação dos motores, com o intuito de facilitar a compreensão.

Figura 11 – Divisão do Sistema Elétrico



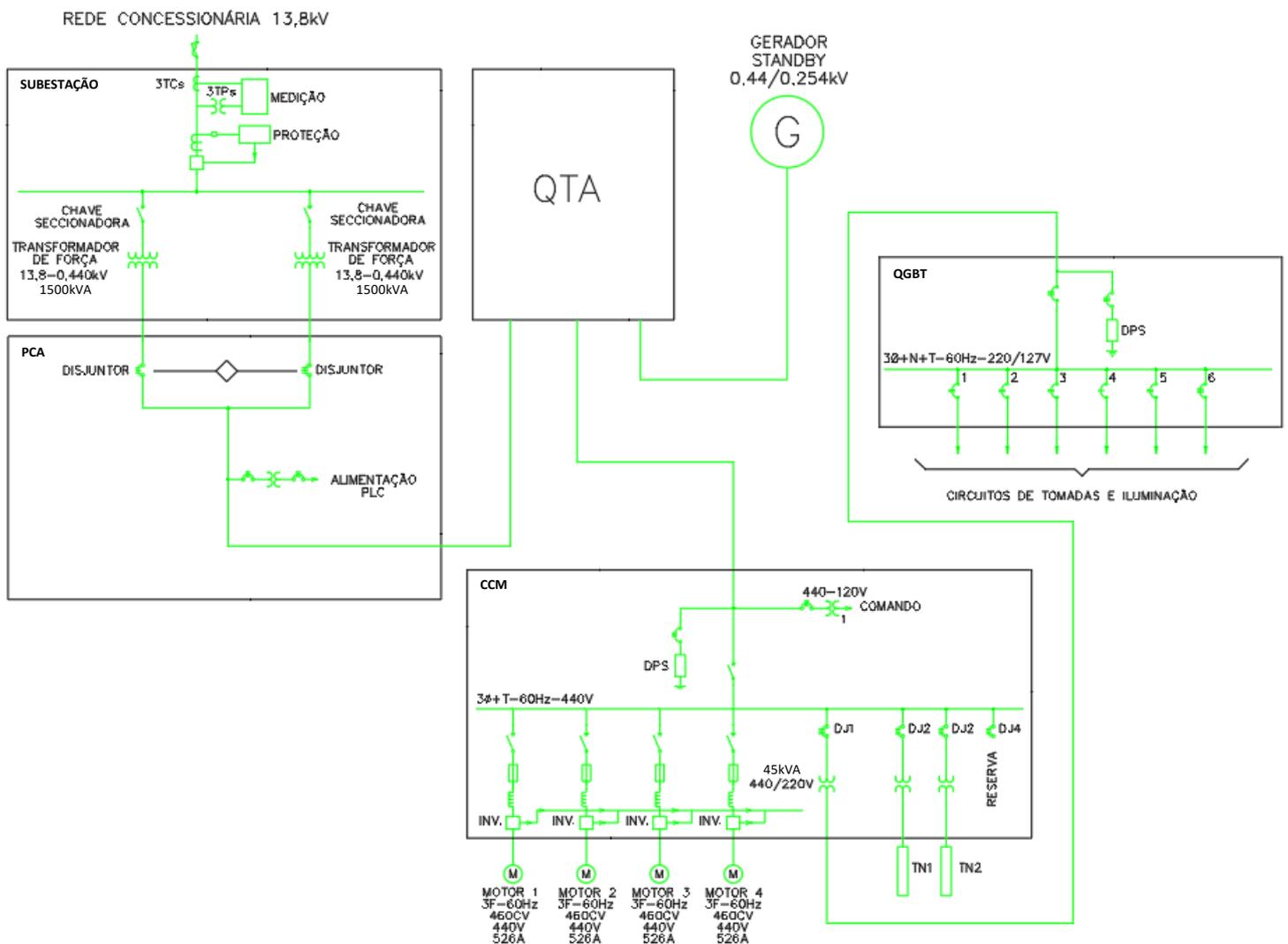
Fonte: Autor, 2021

O sistema foi dividido em cinco conjuntos, o primeiro conjunto é a subestação, a qual possui equipamentos de proteção e dois transformadores que rebaixam a tensão para adequar a energia elétrica às necessidades de consumo, oferecendo

maior fiabilidade ao sistema, de forma que se um falhar o outro pode continuar a alimentar a carga. A subestação também possui o sistema de medição e faturamento que possibilita acompanhar as grandezas de energia e demanda.

No projeto existem quatros painéis, sendo eles o Pannel de Corrente Alternada (PCA), o Quadro de Transferência Automática (QTA), o Centro de Controle de Motores (CCM) e o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT). A Figura 12 mostra o diagrama unifilar do projeto elétrico feito por meio do *software* AutoCAD, as ligações do circuito elétrico estão representadas pelas linhas verdes.

Figura 12 - Conexões do Sistema Elétrico



Fonte: Autor, 2021

O Painel de Corrente Alternada (PCA) é responsável por acomodar os circuitos elétricos de corrente alternada. No caso do projeto em questão ele recebe a energia da subestação realizando sua proteção e distribuindo-a para todos os outros sistemas.

O Quadro de Transferência Automática (QTA) é essencial para se obter energia elétrica de um gerador, ele deve garantir o fornecimento de energia por meio do gerador com qualidade, quando a energia elétrica tradicional para de ser fornecida, sem causar danos às atividades que dependem do fornecimento de energia elétrica. O QTA é fundamental para locais onde as atividades não podem parar por falta de energia. Seu sistema automático ativa o gerador assim que ocorre uma interrupção, ele mantém o gerador funcionando corretamente e bloqueia seu uso em eventuais falhas técnicas. Além disso, restabelece a tensão elétrica e desliga automaticamente o gerador. Este tipo de quadro pode ser adquirido padronizado em diversas fornecedoras, portanto, muitas vezes, não é necessário realizar seu projeto.

O Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), é considerado o tipo de painel mais generalizado. Sua principal finalidade é garantir a proteção dos circuitos de distribuição de uma instalação de baixa tensão e usualmente alimenta circuitos destinados a tomadas e iluminação. A norma técnica fundamental para painéis de baixa tensão é a NBR-IEC-60439-1.

O Centro de Controle de Motores (CCM) é a unidade de controle de um conjunto de motores elétricos, que serve para monitorar e comandar sua operação, além de abrigar os sistemas de acionamento, seja por meio de inversor, soft start, partida estrela triângulo, direta, compensadora ou outro tipo. Além disto, o CCM possibilita a comunicação com outros sistemas de controle. Ele pode possuir interface de rede de dados em diversos padrões como, por exemplo, Ethernet, Profibus, DeviceNet ou Modbus.

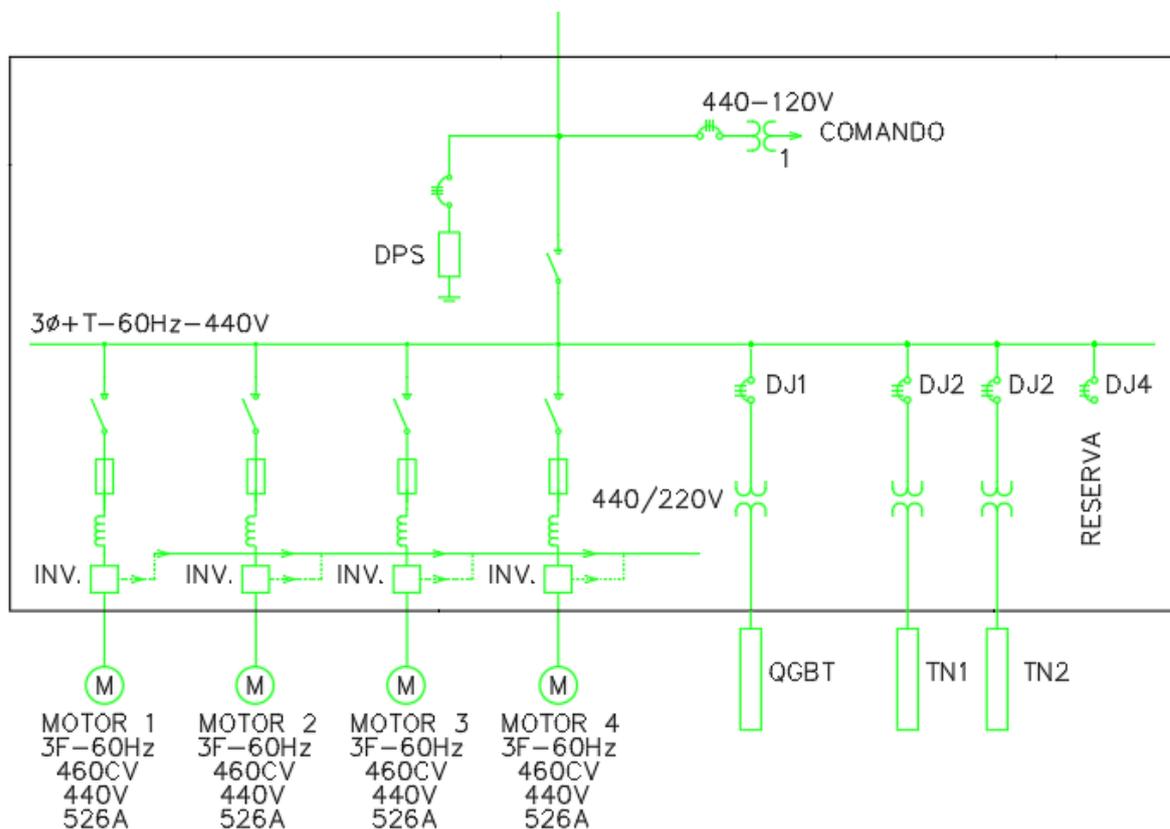
Os componentes de um CCM dependem das máquinas que estão sendo comandadas e do tipo de controle que é necessário, na montagem do painel de comando. Usualmente são utilizadas chaves, inversores, contadores e dispositivos de entrada de sinais, como sensores e medidores, com o objetivo de controlar os dispositivos eletrônicos.

O CCM é utilizado em muitas aplicações industriais e comerciais. Quando são utilizados em processos muito empoeirados ou corrosivos, por exemplo, podem ser

instalados em uma cabine separada, mas muitas vezes um CCM vai estar no chão de fábrica ao lado da máquina controlada. O circuito elétrico presente no CCM da ETE é o foco deste trabalho, pois ele é o responsável por acionar os motores e realizar o controle do sistema elétrico.

No caso do projeto em questão, o CCM recebe alimentação de 440 V e 60Hz para alimentar as suas cargas, dentre elas, os motores da ETE, o QGBT e os transmissores de nível, como pode ser observado no diagrama unifilar presente na Figura 13.

Figura 13 - Diagrama Elétrico CCM



Fonte: Autor, 2021

Os projetos elétricos são necessários para garantir que a energia do local seja utilizada de maneira inteligente, o que consequentemente implica na economia do consumo de energia, além de possibilitar formas de comandos automatizados e inteligentes, para acionamento das bombas hidráulicas e identificação dos possíveis

defeitos, erros e falhas no sistema que possam causar mal desempenho dos aparelhos.

Elevatórias de esgoto com a utilização de conjuntos de motobombas são projetadas, para funcionarem automaticamente, sem a presença de operadores permanentes. Sendo assim, o projeto elétrico realizado é composto de 4 conjuntos de motobombas na configuração de três em utilização e um reserva. Cada motor trifásico possui 4 polos e pertence a categoria N, a qual possui conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento, constitui a maioria dos motores encontrados no mercado e é utilizada para o acionamento de bombas.

A potência nominal de cada motor é 460 cv, ou seja, aproximadamente 338 kW, com uma tensão de 440 Vca, sendo o fator de potência igual a 0,88 e a eficiência de aproximadamente 95,8%. O motor, quando alimentado por um inversor de frequência PWM, tem sua eficiência diminuída, em relação a um motor alimentado por tensão puramente senoidal, por conta do aumento das perdas ocasionado pelas harmônicas (WEG, 2020). Em posse dos dados anteriores e das Equações (1), (2) e (3) é possível obter a corrente nominal do circuito do motor.

$$P = \sqrt{3} \times V_f \times I_f \times FP \times Ef \quad (1)$$

$$I_f = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_f \times FP \times Ef} \quad (2)$$

$$I_f \cong 526 A \quad (3)$$

Foram considerados dois níveis de tensão para o projeto, sendo o de 440 Vca e frequência de 60Hz proveniente do transformador trifásico de força de 1500 kVA, 13,8/0,440 kV em ligação delta-estrela, acomodado na subestação do sistema. A ligação delta na entrada do transformador permite a transmissão em média tensão com três condutores e a ligação estrela na saída fornece a referência de neutro, mantendo a tensão constante, para transmissão em baixa tensão a quatro condutores (3F+1N) a partir do centro da estrela aterrado.

O nível de tensão e os transformadores foram escolhidos devido a elevada potência necessária dos motores para o bombeamento, de forma que a potência do transformador escolhido fosse maior do que a potência aparente dos motores e da

carga geral que será alimentada por ele. Já para os serviços auxiliares tais como iluminação e tomadas, acomodados no QGBT, o nível de tensão adotado foi de 220/127 Vca e frequência de 60Hz, alimentados através de um transformador de 45 kVA, 440/220-127 V em ligação delta-estrela.

O sistema de comando usualmente adotado permite o revezamento automático entre as bombas, sempre que esgote mudar de nível ou no caso de uma das bombas sofrerem uma paralização. O sistema automaticamente liga ou desliga as bombas, quando o líquido atinge os níveis pré-fixados que são definidos pela posição dos medidores de nível, os quais devem ser instalados em uma zona calma dentro do poço de sucção da elevatória. A atuação acontece de acordo com três diferentes níveis, ao atingir os níveis operacionais as bombas serão acionadas e ao atingir o nível mínimo a bomba será desligada, evitando consumo desnecessário de energia.

Foram consideradas também algumas premissas para uma melhor operação do sistema e segurança, dessa forma, cada conjunto motobomba (CMB) possui uma chave de posições local, manutenção e operação CLP. A posição manutenção permite que a bomba seja operada no ambiente de instalação, possibilitando assim a manutenção. A posição local permite que a bomba seja operada via painel, mantendo as proteções de nível, e já a posição CLP permite o controle do sistema automatizado, contendo uma programação para o acionamento de cada bomba de acordo com o nível informado pelo medidor de nível, como também as proteções de nível, de temperatura e de umidade, além do intertravamento para que não haja a partida simultânea dos motores, caso ocorra a queda de energia e volta do sistema.

Os motores são acionados através de inversores de frequência de 460 cv, corrente nominal igual a 526 A, tecnologia PWM e método de controle vetorial, com faixa de controle de frequência de saída de no mínimo 30Hz e no máximo 60Hz. O dimensionamento do inversor de frequência é feito levando em consideração a corrente nominal do motor, devendo ser a corrente do inversor maior ou igual a corrente do motor.

O inversor possui também, um reator acoplado internamente, responsável por reduzir a geração das harmônicas de corrente na rede, devido as características do circuito do inversor, constituído de um retificador a diodos e um banco de capacitores

de filtro. As vantagens são o aumento do fator de potência na entrada do inversor e a diminuição da distorção da tensão na rede de alimentação.

As condições de temperatura onde o motor será instalado e a altitude devem ser observadas, também é importante determinar se o motor vai operar em regime de baixa rotação (abaixo de 60Hz) ou de alta rotação (acima de 60Hz). Para a operação em alta rotação, os inversores do tipo escalar atendem bem a maioria das aplicações, já para a baixa rotação, deve-se considerar a necessidade de alto torque, sendo o inversor do tipo vetorial o ideal para esta aplicação.

Além disto, deve-se analisar o tipo de controle que será empregado, no caso de interfaces especiais, como controle por meio de CLP, o modelo do inversor deve ser apropriado para a aplicação. O uso de inversores possibilita ligamento e desligamento de maneira amenizada, causando menos danos às bombas, além do controle de velocidade.

3.2. COMUNICAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

A capacidade de comunicação entre dispositivos e o uso de mecanismos padronizados são indispensáveis quando falamos de automação nos dias atuais. O CLP cumpre importante papel no sistema, garante uma melhora significativa no desempenho e na qualidade dos processos, além integrá-los e automatizar suas funções, o que possibilita o controle dos equipamentos elétricos diretamente por computadores, características as quais conseqüentemente proporcionam a realização plena das atividades, sendo uma ferramenta importante para o aumento da produtividade e a redução dos custos.

Os protocolos são formatos de dados e regras que são seguidas para manter uma comunicação e interligação na rede, possibilitando o programa conseguir determinar e preparar os dados para serem enviados para as próximas etapas do processo de comunicação. Sem a aplicação destes protocolos a rede não funcionaria.

Existem diversos protocolos que são utilizados para manter a comunicação entre equipamentos eletrônicos e máquinas industriais. Entretanto, cada equipamento possui sua própria linguagem, sendo necessário escolher os protocolos corretamente.

Além disto, cada protocolo possui meios físicos diferentes para transmitir seus sinais de comunicação. Portanto, pode-se encontrar diversos tipos de cabos no mercado para automação, que possibilitam atender a conexão para cada protocolo.

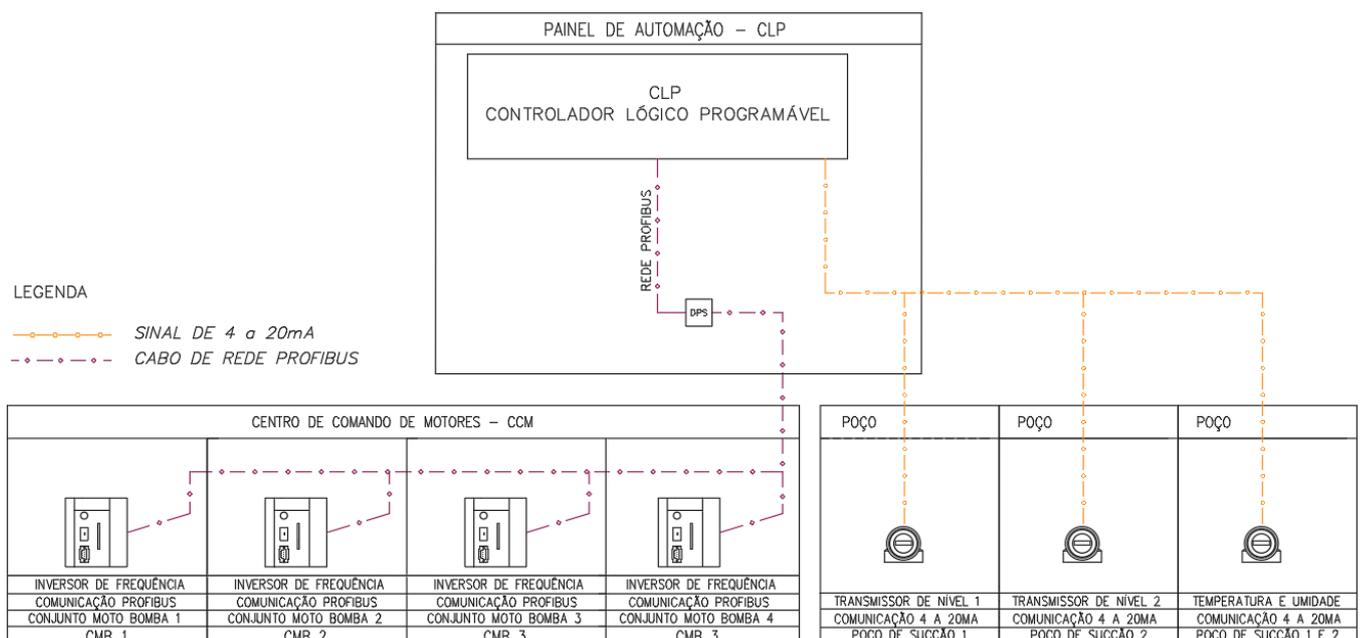
Dentre os vários protocolos de comunicação, foi utilizado neste trabalho o Profibus DP (*Decentralized Peripheral*). Este protocolo é aplicado em uma gama grande dentro da automação de fabricação e processos.

O Profibus DP foi o primeiro e é o mais utilizado dentre os protocolos do Profibus. Ele é mais indicado para o chão de fábrica e possui alta velocidade de comunicação, de forma que em lugares com grande volume de informações ele consegue tratá-las em tempo adequado. Neste trabalho é aplicado o procedimento mestre-escravo. Assim, o mestre acessa seus escravos e determina quando um escravo deve realizar a comunicação.

Para gerar a comunicação do sistema são utilizadas as entradas e saídas do CLP, que recebem as informações dos medidores de nível e dos sensores de temperatura e umidade, e mandam as informações, utilizando a comunicação gerada pelo protocolo Profibus DP, para os inversores do CCM, determinando quando deve ser ligado ou desligado cada CMB, além de realizar o controle de velocidade.

A Figura 14 ilustra a conexão entre os componentes do sistema e o CLP.

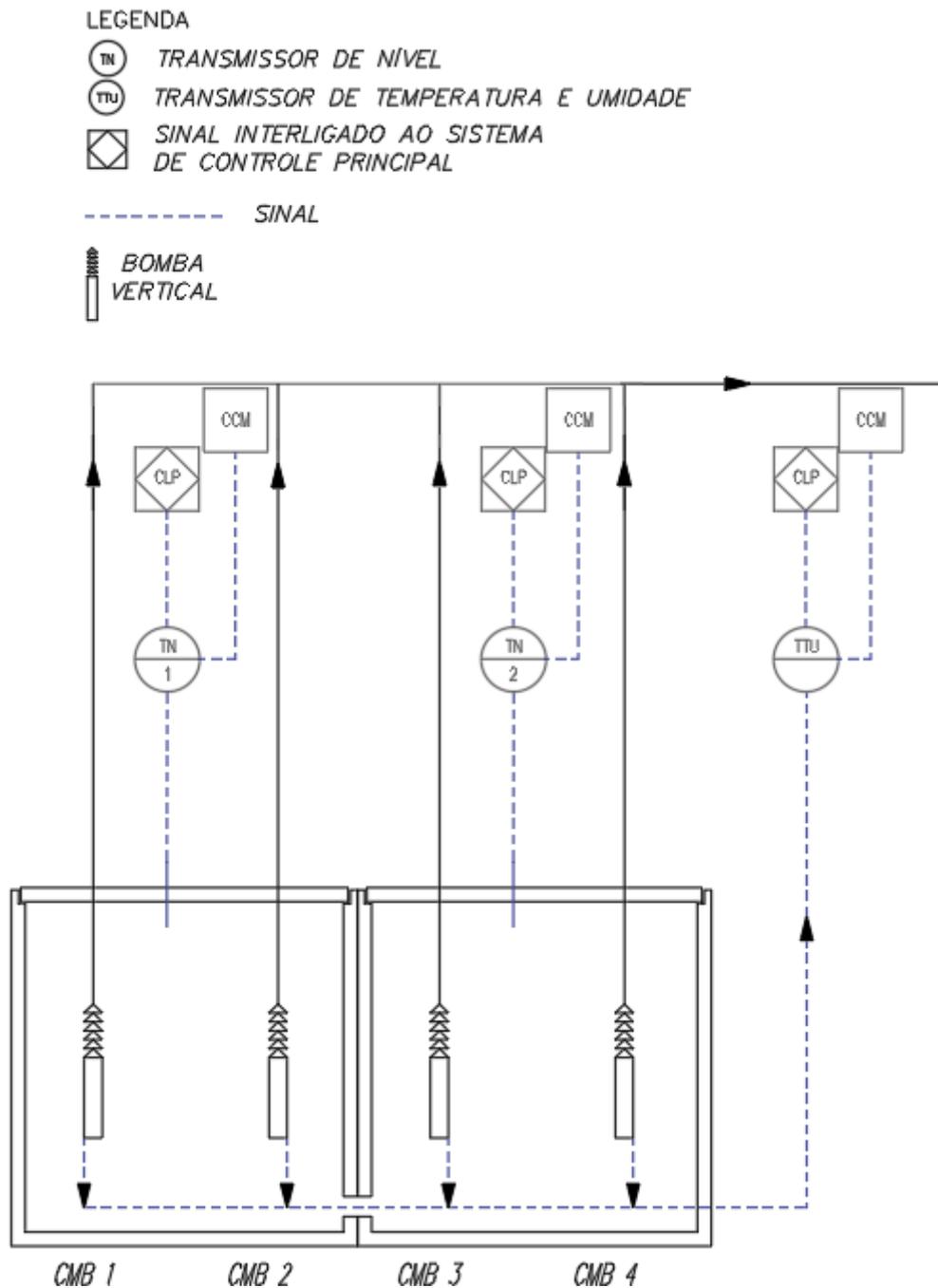
Figura 14 - Esquema de Comunicação



Fonte: Autor, 2021

A Figura 15 mostra a configuração das bombas da ETE e a comunicação com o CCM e o CLP, além dos sinais provenientes de cada medidor de nível e dos sensores de temperatura e umidade, para o controle dos conjuntos de motobombas.

Figura 15 - Esquema de Conexão Sinais Motobomba



Fonte: Autor, 2021

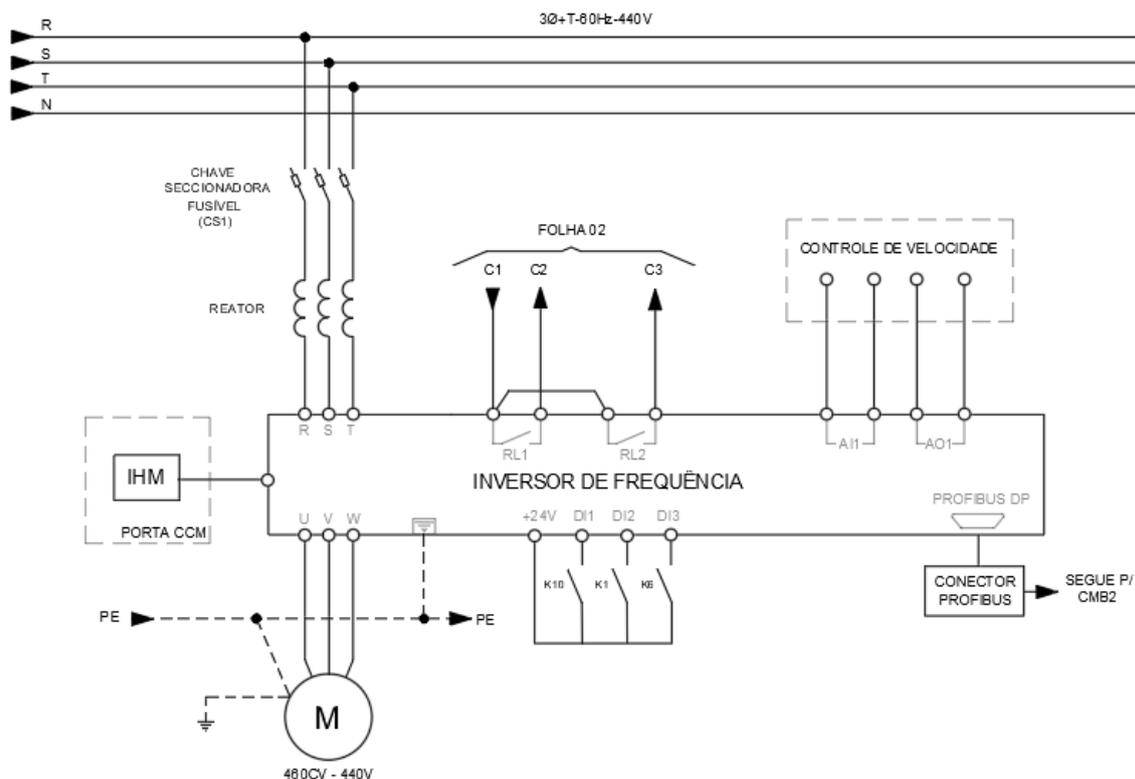
3.3. ACIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO

De fato, para controlar as correntes intensas são necessários interruptores que tenham alta velocidade de fechamento e abertura dos contatos, sendo isto possível por meio de dispositivos denominados contatores. O contator é um dispositivo eletromecânico, que possui como princípio de funcionamento a abertura ou fechamento de contatos mecânicos com as características exigidas para o controle, a partir da energização de uma bobina.

Os contatos podem ser do tipo NA (normalmente abertos) e NF (normalmente fechados). Os contatos NA permanecem abertos enquanto a bobina do contator se encontra desenergizada, e quando a bobina é energizada os contatos se fecham. Para os contatos NF, o comportamento é o inverso.

As três figuras abaixo, Figura 16, Figura 17 e Figura 18, mostram o sistema de acionamento para cada conjunto motobomba, contendo o diagrama elétrico apresentado em três páginas de projeto.

Figura 16 - Folha 1 - Sistema de Acionamento



Fonte: Autor, 2021

O circuito de acionamento é dividido entre o circuito principal e o circuito de comando. O circuito principal ou de força, como também chamado, é o responsável pela alimentação do motor, já o circuito de comando, como o próprio nome já diz, é o responsável por comandar o circuito de força, determinando quando o motor será ligado ou desligado, assim como sua velocidade.

Foi utilizada uma chave seccionadora com fusíveis para a proteção e seccionamento de cada conjunto, garantindo a proteção do inversor e do restante do circuito. A conexão dos condutores acontece por padrão nas entradas chamadas de R, S e T, já as letras U, V e W correspondem as saídas do inversor, onde serão conectados os condutores que irão alimentar o motor.

Além disso, tem-se também o ponto de conexão de aterramento, o qual deve estar ligado ao aterramento da instalação e a estrutura da carcaça do inversor para garantir a proteção e equipotencialização de toda a base estrutural do inversor de frequência. O condutor de aterramento da saída do inversor, que vai até a caixa de ligação do motor, precisa possuir uma malha de blindagem que também deve estar ligada ao sistema de aterramento, para garantir que não existam diferenças de potenciais indesejadas.

A parte estrutural das conexões do inversor compõem tanto a parte de entradas e saídas digitais como de entradas e saídas analógicas. Os conectores de controle fornecem ao inversor todas as informações necessárias de campo, para que o inversor possa realizar a partida, a parada, o controle de velocidade e outras funções relacionadas ao motor e a necessidade do processo. A quantidade de conectores depende da quantidade de recursos do inversor de frequência e do que se usa em campo.

A configuração geral pode ser dividida em três principais partes, as entradas digitais, as entradas analógicas e as saídas. Cada entrada e saída devem estar configurada com os parâmetros corretos para a aplicação desejada no inversor de frequência, tal configuração deve ser realizada de acordo com o manual de programação fornecido pelo fabricante do equipamento.

As funções de operação realizadas pelas entradas e saídas digitais e analógicas também podem ser acessadas pela IHM, porém a utilização das entradas

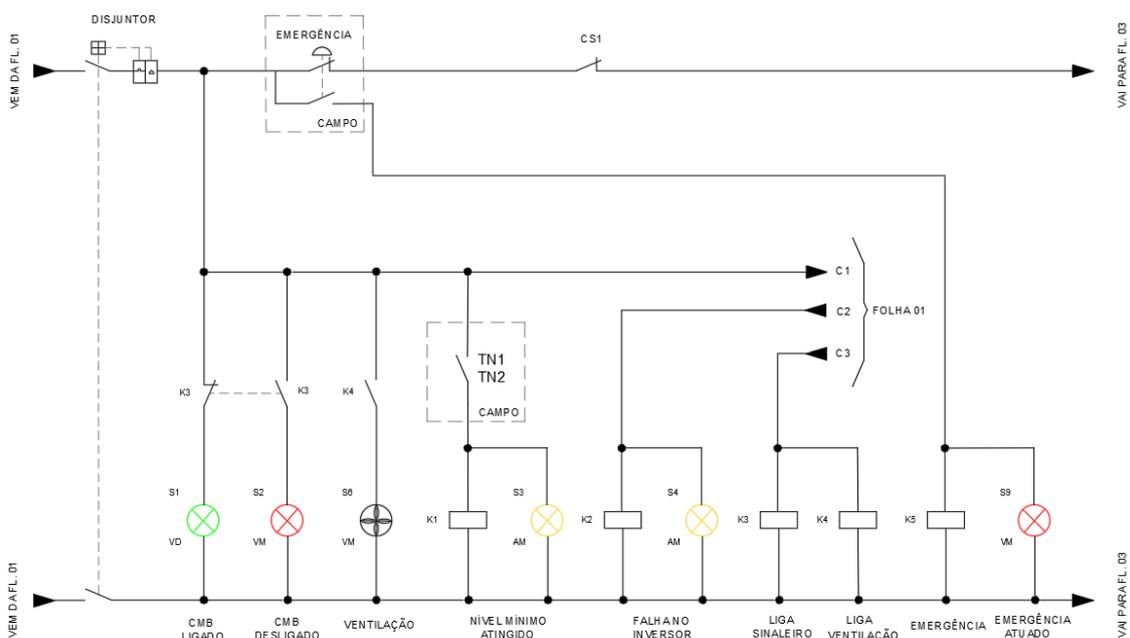
e saídas é necessária para realizar o controle do inversor de forma facilitada e automática.

O formato de configuração do inversor utilizado no projeto foi o PNP, ou seja, a ativação de um comando ocorre por meio de um sinal positivo, que é proveniente de uma fonte interna do próprio inversor.

As entradas digitais utilizadas foram a DI1, a DI2 e a DI3. A entrada DI1 manda o comando para ligar o inversor a partir do fechamento do contato NA do contator K10. As entradas DI2 e DI3 possuem a função de desligar o equipamento, a DI2 desliga o equipamento caso seja atingido o nível mínimo do poço de sucção, o que está associado ao fechamento do contato NA do contator K1 e o sinal é recebido dos transmissores de nível, já a DI3 desliga o equipamento no caso de um defeito no CMB, ação associada ao fechamento do contato NA do contator K6 e o sinal é recebido dos sensores de temperatura e umidade.

A entrada e saída analógica AI1 e AO1 são as responsáveis por realizar o controle da velocidade, esse controle pode ser feito de algumas formas, como por exemplo, através da variação de corrente ou pela variação de tensão por um potenciômetro instalado no painel.

Figura 17 - Folha 2 - Sistema de Acionamento



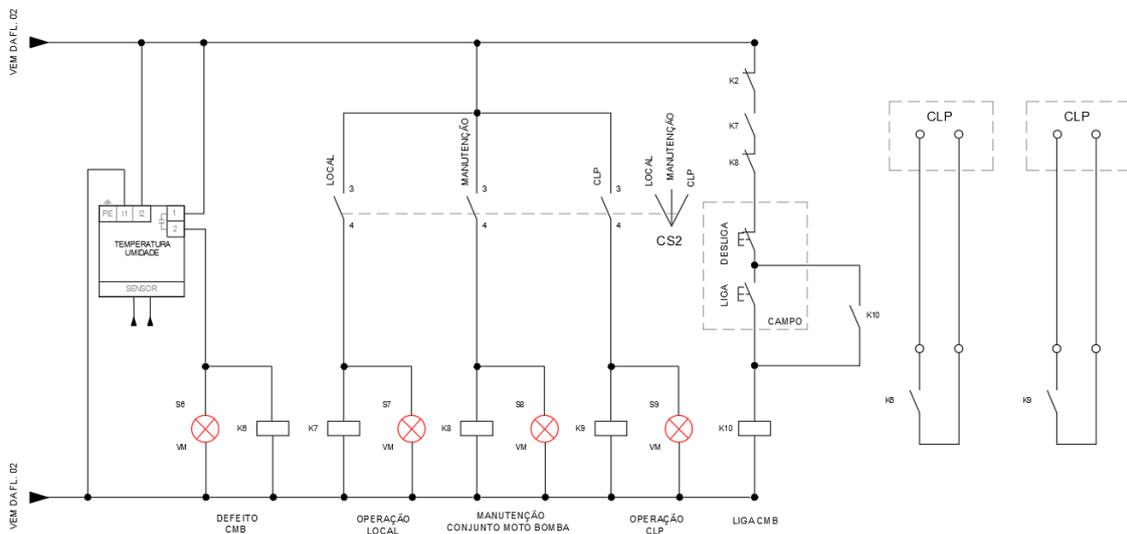
Fonte: Autor, 2021

O contator K1 está relacionado ao nível mínimo do poço de sucção. Conforme pode ser observado na Figura 17, a bobina do contator K1 está conectada aos transmissores de nível. Caso o nível mínimo do poço de sucção seja atingido, a bobina é então energizada e um sinalizador amarelo indicando o acontecimento acende no CCM e o contato NA de K1, representado na Figura 16, se fecha desligando o inversor como foi visto na explicação das entradas digitais do inversor.

O conector C1 está conectado no ponto comum do relé um (R1) e relé dois (R2). Ele é o responsável por alimentar o conector C2 e conector C3 caso ocorra atuação dos relés. O conector C2 está conectado no contato normalmente aberto de R1. No caso de uma falha no inversor, o relé fecha seu contato NA e conduz energia para C2, acendendo sinalizador amarelo no painel e indicando a falha no inversor. O conector C3 está conectado no contato NA de R2, que se fecha quando o inversor for ativado, energizando a bobina do contator K3, que acende o sinalizador verde de ligado e apaga o sinalizador vermelho de desligado, por meio de seus contatos com intertravamento, indicando que o CMB está funcionando. Além disso o C3 também energiza a bobina do contator K4 que fecha o seu contato para ligar a ventilação do painel CCM.

O sistema também foi projetado com um botão cogumelo de emergência com um contato NA e um contato NF, quando pressionado o contato NA se fecha e liga no painel o sinalizador vermelho que indica que a situação de emergência está atuada, já o contato NF se abre e desliga todo o restante do circuito de comando, desligando assim o CMB. Outra situação em que o sistema de comando é todo desligado é no caso de a proteção conectada na entrada do inversor atuar. O contato CS1 conectado no início do sistema de comando se abre desenergizando o circuito.

Figura 18 - Folha 3 - Sistema de Acionamento



Fonte: Autor, 2021

A Figura 18 apresenta uma parte muito importante do diagrama lógico de acionamento da partida do CMB, o qual apresenta a chave seletora de três posições fixas que determina se o conjunto motobomba está operando por meio do CLP, por meio de operação local ou em manutenção. Cada conjunto motobomba apresenta esse mesmo diagrama, ou seja, temos uma chave seletora de três posições fixas para cada conjunto individualmente. Para indicar a operação selecionada pela chave no painel CCM um sinaleiro vermelho referente ao tipo escolhido é aceso.

Caso a opção selecionada seja a operação local, o sinaleiro vermelho indicando que a operação local está ativada é aceso no painel e a bobina do contator K7 se energiza, fazendo com que seu contato NA se feche e então passe a conduzir energia para a bobina do contator K10, caso o botão de pulso para ligar o conjunto motobomba em questão seja pressionado. Sendo assim, uma vez que botão ligar é selecionado, o pulso energiza a bobina do contator K10, seu contato se fecha e dessa forma a bobina do contator K10 passa a ser constantemente energizada até que o botão para desligar o conjunto seja pressionado ou então o contato do contator K2 ou do contator K8 se abram. Sendo o contator K2 relacionado a um defeito originado no inversor e o contator K8 a manutenção do CMB.

Além disso, com a energização da bobina do contator K10, o seu outro contato NA conectado a entrada digital do inversor de frequência se fecha, dando início a

operação do inversor de forma local. Isso significa, que o controle do CMB pelo CLP está desativado e é então realizado localmente no painel do CCM. Uma vez selecionada a opção de operação do CMB de forma local pela chave de três posições, o controle de velocidade é feito pela entrada e saída analógica AI1 e AO1 do inversor.

Para que seja ativada a operação CLP é necessário selecionar a opção de operação CLP pela chave, o controle do sistema passa então a ser realizado pelo CLP. Com a energização da bobina K9 o seu contato NA conectado a uma entrada do CLP se fecha iniciando a ativação do CLP, passando então o controle de velocidade do CMB ser realizado pelo CLP, assim como a função de ligar ou desligar o conjunto. No caso do surgimento de algum defeito relacionado a temperatura e umidade a bobina do contator K9 é energizada e seu contato NA conectado em uma entrada do CLP é fechado, indicando o defeito, além disso as informações sobre temperatura e umidade são enviadas para o CLP.

Caso seja selecionada a opção manutenção a bobina do contator K8 se energiza e seu contato NF que possibilita a ativação do sistema de forma local é aberto.

4. CONCLUSÃO

A objetivo deste trabalho foi o de apresentar alguns fundamentos teóricos sobre estações de tratamento de esgoto, ressaltando a relevância do estudo destes sistemas para a sociedade, visto o consumo significativo de energia que elas apresentam perante outros sistemas industriais, além da importância para o meio ambiente e para manutenção das sociedades humanas atuais. Para isso, foram estudados os equipamentos que representam a maior quantidade de energia consumida e os mais relevantes para que o fluido seja transportado pelo sistema.

Sistemas inteligentes que facilitem os processos existentes tem sido cada vez mais requisitados e aceitos em nossa sociedade, transformar processos complicados e que requerem muitas pessoas para a execução em processos simples e automatizados é uma ideia muito atraente, a evolução da tecnologia e de

equipamentos elétricos permite que as atividades humanas sejam facilitadas a partir da implementação de sistemas elétricos.

Este trabalho apresentou estudos, exemplos e os principais conceitos para um sistema de bombeamento eficiente, ressaltando tópicos importantes como o acionamento e a comunicação para estes sistemas, o qual deve apresentar diferentes formas de operação, a partir do entendimento que complicações possam surgir no dia a dia do processo, e o sistema deve estar preparado para lidar com tais problemas sem que aconteça uma parada na operação. Além disto, deve estar projetado de forma eficiente, para que não haja desperdício de energia e a operação ocorra sem impedimentos, utilizando os equipamentos de forma inteligente, visando que o sistema possua um excelente rendimento e seja econômico.

A partir do trabalho elaborado, conclui-se que a aplicação deste sistema pode ser de alto custo para as empresas do setor de saneamento, portanto cabe a elas avaliar a implementação de sistemas como este e verificar a viabilidade para cada aplicação, sendo este um estudo complementar que auxilie na compreensão e elaboração de projetos de sistemas elétricos de bombeamento.

REFERÊNCIAS

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de Água. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

GURGEL, A. F. B. B. (2006). Proposição de uma Metodologia para Avaliação de Inversores de Frequência em Estações Elevatórias de Água Estudo de Casos no Sistema de Abastecimento de Água de São José dos Campos. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.

HAIBARA, B. J. (2013). Avaliação de Funcionamento das Bombas Hidráulicas do Sistema de Tratamento de Efluentes da Empresa Parker Hannifin. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Brasil.

MELLO, Carlos Rogério de; YANAGI JR, Tadayuki. Escolha de Bombas Centrífugas. Minas Gerais: Universidade Federal de Lavras, 2009.

WEG. Catálogo técnico. Motores elétricos: linhas de produtos, características, especificações, instalações e manutenções. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/c/BR_MT>. Acesso em 05/05/2020.

ARMINTOR, J. K.; CONNORS, D. P. Acionamento de Velocidade Variável em Aplicações de Bombeamento nas Indústrias Petroquímicas, Reliance Electric Co., 1987.

WOOD, D. J.; REDDY, L. S.; Control de Bombas de Velocidad Variable y Modelos en Tiempo Real para Minimizar Fugas y Costes Energéticos: Curso Dictado en la UIMP: Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad en Sistemas de Distribucion de Agua, p. 173-207, Valência: Espanha, 1994.

CESTARI, A. Y.; ANJOS, A. H. G. (2020). Controle De Irrigação Usando Inversor De Frequência Em Rede Modbus. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Católica de Goiás, Brasil.

CASADA, D. A.; KUECK, J. D.; STAUNTON, R. H.; WEBB, M. C. Efficiency Testing of Motors Powered from Pulse-Width Modulated Adjustable Speed Drives: IEEE Transactions on Energy Conversion Magazine, Vol. 15, nº 3, p. 240-244, 2000.

ALBUQUERQUE, A. A. (2007). Análises e métodos de otimização para eficiência energética de estações elevatórias em sistemas de abastecimento de água. Dissertação de Doutorado em Recursos Naturais, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

NETTO, A.; FERNANDEZ, F. M. Manual de Hidráulica. Nona edição. São Paulo: Blucher, 2018.

ALMEIDA, C. L. P. (2010). Otimização da Operação de uma Estação Elevatória. Minimização do Custo da Energia Respeitando Critérios de Qualidade da Água. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

GOMES, P. H. et. al. Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, 2009.

CAVALCANTI, B. D. et. al. (2018). Modelagem de um Sistema de Bombeamento para o Controle de Vazão por Conversor de Frequência Baseado na Teoria de Identificação de Sistemas. Grupo de Inteligência Computacional Aplicada a Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

VALIS D. et. al. (2017). Modelling water distribution network failures and deterioration. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Pages: 924 - 928.

RODRIGUES, W. (2007). Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

ILINSKI, N. Frequency Converters in Water Supply Systems for Energy Saving – Energy Engineering n° 5, Vol. 97, p. 7-20, 2.000.

ALMEIDA, R., BARBOSA, P. Comparação de políticas operativas para a redução de custos de bombeamento em redes de distribuição de água. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE; Variable speed pumping. A guide to successful applications. Bodmin, Cornwall: Elsevier, 2004.

ARIKAWA, K.C.O. Perdas reais em sistemas de distribuição de água: Proposta de metodologia para avaliação de perdas reais e definição das ações de controle. São Paulo, 2005. 200p. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

CASSIANO FILHO, A.; FREITAS, F.V. (1989). Redução do consumo de energia elétrica com utilização de inversor de frequência. Relatório interno, Sabesp, Brasil.

TSUTIYA, M.T. (1989). Redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água de pequeno e médio portes. Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Brasil.

Entenda o Funcionamento de uma Bomba Centrífuga. Loxam Degraus, 2019. Disponível em: <<https://www.degraus.com.br/entenda-o-funcionamento-de-uma-bomba-centrifuga/>>. Acesso em: 20 de maio de 2021.