

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BERNARDO SANTIAGO DE SOUZA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
MÉTODOS DE CONTROLE DAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE
ESGOTO DE ITAJAÍ/SC**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ITAJAÍ
2022

BERNARDO SANTIAGO DE SOUZA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
MÉTODOS DE CONTROLE DAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE
ESGOTO DE ITAJAÍ/SC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de graduação em Engenharia Elétrica da Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Dr. Saimon Miranda Fagundes

Coorientador: Eng. Gilnei Almeida de Souza

**ITAJAÍ
2022**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca do IFSC.

Souza, Bernardo Santiago de

Análise comparativa de eficiência energética em métodos de controles das estações elevatórias de esgoto de Itajaí/SC / Bernardo Santiago de Souza ; orientador, Saimon Miranda Fagundes, coorientador, Gilnei Almeida de Souza, 2022.

45 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Itajaí, Graduação em Engenharia Elétrica , Itajaí, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica . 2. Eficiência Energética. 3. Estação Elevatória de Esgoto. 4. Automação. 5. Controle. I. Fagundes, Saimon Miranda. II. Souza, Gilnei Almeida de. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica . IV. Título.

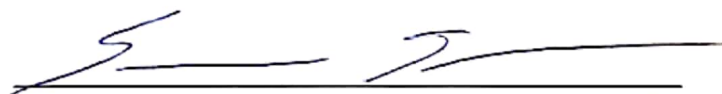
**ANÁLISE COMPARATIVA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE
MÉTODOS DE CONTROLE DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE
ESGOTO DE ITAJAÍ/SC**

BERNARDO SANTIAGO DE SOUZA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso de engenharia elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Itajaí, 24 de Outubro de 2022

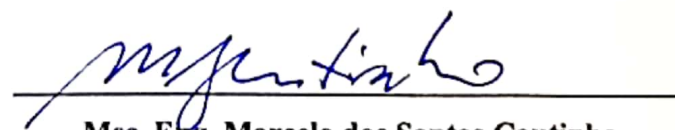
BANCA EXAMINADORA:



Dr. Eng. Saimon Miranda Fagundes
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC



Msc. Eng. Guilherme Ranzolin Piazzetta
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC



Msc. Eng. Marcelo dos Santos Coutinho
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

RESUMO

O presente trabalho aborda a implementação e a análise comparativa de três diferentes métodos de controle encontrados no sistema de automação de várias Estações Elevatórias de Esgoto - EEE - do SES do município de Itajaí/SC. Os três métodos de controle foram aplicados em uma única EEE, onde foram desenvolvidos ensaios para cada método de controle de motobombas submersíveis acionadas por conversores de frequência. O primeiro método é o controle liga-desliga de motobombas em velocidade constante, por bateladas. O segundo, é o método de controle por nível constante tradicional, com um sistema de controle proporcional integral derivativo, e o terceiro método sendo uma adaptação otimizada do segundo, com uma redução da faixa de frequência aplicada pelo inversor no motor da bomba, denominado método de controle de nível constante otimizado. A partir da coleta de dados obtidos em testes de um dia para cada método ensaiado, comparando o consumo de energia elétrica por volume de esgoto bombeado, observa-se que os métodos de controle de nível constante apresentaram uma eficiência de pelo menos 40% maior em relação ao método de controle de nível à batelada. Após a substituição do método de controle de nível anterior pelo identificado como mais eficiente, a unidade testada reduziu seu consumo específico em 18,82% e sua demanda em 26,50% em relação à média dos últimos 3 meses.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Estações Elevatórias de Esgoto. Controle. Automação.

ABSTRACT

The present work addresses the implementation and comparative analysis of three different control methods applied in the automation system of several Wastewater Pumping Stations in the city of Itajaí/SC. In the studied wastewater station, tests were developed for three different control methods of pumps driven by frequency converters. Among the control methods tested and analyzed, the first is the control method with discontinuous driving of pumps, by batches. The second, being a traditional constant level control method, with a proportional integral derivative (PID) control system, and the third method being an optimized adaptation of the second, with a reduction in the adjustable frequency range, called optimized constant level control method. From the collection of data obtained in one-day tests for each method tested, comparing the specific consumption per volume of pressurized effluent, it is observed that the constant level control methods presented an efficiency up to 40% higher in relation to the on-off level control method. After replacing the previous level control method with the one identified as more efficient, the tested unit reduced its specific energy by 18.82% and its power demand by 26.50% in relation to the average of the last 3 months.

Keywords: Energy Efficiency. Wastewater Pumping Station. Control. Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do SES de Itajaí/SC	5
Figura 2 – Desenho de uma EEE com poço úmido com motobombas submersíveis. . .	6
Figura 3 – Representação de um Conjunto Motor-Bomba submersível.	7
Figura 4 – Curva característica de uma bomba centrífuga.	8
Figura 5 – Interseção da curva do sistema hidráulico e da curva da bomba.	9
Figura 6 – Controle do ponto de operação: pelo aumento de perda de carga (esquerda) e pela diminuição da velocidade de rotação (direita).	10
Figura 7 – Fluxo de perda de potência no conjunto motor-bomba.	10
Figura 8 – Sistema de controle em malha aberta de uma planta.	12
Figura 9 – Sistema de controle em malha fechada em um sistema de bombeamento. . .	13
Figura 10 – Diagrama base de um conversor de um conversor de frequência	14
Figura 11 – Bloco de controlador PID no software TIA Portal da marca Siemens	15
Figura 12 – Representação de consumo específico.	19
Figura 13 – EEE 21 do SES de Itajaí/SC.	20
Figura 14 – Painel de comando da EEE 21.	21
Figura 15 – Interface de monitoramento da EEE 21.	22
Figura 16 – Interface de controle dos CMBs da EEE 21.	22
Figura 17 – Medidor de grandezas elétricas instalado no painel da EEE 21.	23
Figura 18 – Janela do MGE da EEE 21 no sistema supervisório do SEMASA Itajaí . . .	24
Figura 19 – Calha Parshall utilizada para medição de vazão da EEE 21.	25
Figura 20 – Central eletrônica de monitoramento do medidor de vazão de entrada da ETE.	25
Figura 21 – Parâmetros operacionais de nível da Motobomba 200 DL.	28
Figura 22 – Funcionamento do método de controle de nível tradicional.	29
Figura 23 – Funcionamento do método de controle de nível tradicional.	30
Figura 24 – Nível (m) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método à batelada.	35
Figura 25 – Vazão de Recalque (L/s) e potência Ativa (kW) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método à batelada.	35
Figura 26 – Nível (m) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método constante tradicional.	36
Figura 27 – Vazão (L/s) e potência Ativa (kW) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método constante tradicional.	37
Figura 28 – Nível (m) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método de controle de nível constante otimizado.	38
Figura 29 – Vazão (L/s) e potência Ativa (kW) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método de controle de nível constante otimizado.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do método de controle de nível à batelada.	28
Tabela 2 – Parâmetros método de controle por nível constante tradicional para EEE 21.	30
Tabela 3 – Parâmetros método de controle por nível constante otimizado para EEE 21..	31
Tabela 4 – Resultado do teste de frequências com um CMB	33
Tabela 5 – Resultado do teste de frequências com duas CMBs	34
Tabela 6 – Comparativo entre os resultados de cada método de controle de nível de EEE ensaiado	40
Tabela 7 – Comparativo entre a demanda registrada no horário de ponta e fora-ponta em cada método de controle de nível de EEE ensaiado	40
Tabela 8 – Dados históricos da fatura de energia da EEE21 de 2022	42
Tabela 9 – Histórico de consumo específico da EEE21 em 2022	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AMT	Altura Manométrica Total
CLP	Controlador Logico Programável
CMB	Conjunto Motor-Bomba
EEE	Estação Elevatória de Esgoto
ERAT	Estação de Recalque de Água Tratada
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MGE	Medidor de Grandezas Elétricas
PID	Proporcional Integral e Derivativo
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
SEMASA	Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SC	Santa Catarina
TC	Transformador de Corrente
RMS	<i>Root Mean Square</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potência
Q	Vazão
H_{man}	Altura Manométrica
η_{global}	Rendimento Global
η_{motor}	Rendimento do motor
η_{bomba}	Rendimento da bomba
$e(t)$	Erro em função do tempo t
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integrativo
K_d	Ganho derivativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	JUSTIFICATIVA	3
4	REVISÃO DA LITERATURA	5
4.1	O SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE ITAJAÍ/SC	5
4.2	SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	7
4.2.1	Curvas características	8
4.2.2	Perdas em sistemas de bombeamento	10
4.3	AUTOMAÇÃO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ESGOTO	12
4.3.1	Sistema de Controle	12
4.3.2	Conversores de frequência	14
4.3.3	Controlador lógico programável	15
4.4	PRINCÍPIOS GERAIS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	16
4.4.1	Estrutura Tarifária Brasileira	16
4.4.1.1	Estrutura tarifária horo-sazonal verde	17
4.4.1.2	Estrutura tarifária horo-sazonal azul	18
4.4.2	Indicadores de eficiência energética	18
5	METODOLOGIA	20
5.1	DESCRIÇÃO DA UNIDADE SOB TESTE	20
5.1.1	Sistema Supervisório	21
5.1.2	Multimedidor de grandezas elétricas	23
5.1.3	Medidor de Vazão	24
5.2	TESTE DE FREQUÊNCIAS	26
5.3	MÉTODOS DE CONTROLE DE EEES	27
5.3.1	Método 1: Controle de nível à batelada	27
5.3.2	Método 2: Controle por nível constante tradicional	28
5.3.3	Método 3: Controle por nível constante otimizado	30
5.3.4	Metodologia de aquisição de dados	31
6	RESULTADOS	33
6.1	RESULTADOS DO TESTE DE FREQUÊNCIAS	33

6.2	RESULTADOS DO MÉTODO DE CONTROLE DE NÍVEL À BATELADA .	34
6.3	RESULTADOS DO MÉTODO DE CONTROLE DE NÍVEL CONSTANTE TRADICIONAL	36
6.4	RESULTADOS DO MÉTODO DE CONTROLE POR NÍVEL CONSTANTE OTIMIZADO	37
6.5	DISCUSSÃO	39
7	CONCLUSÃO	42
7.1	TRABALHOS FUTUROS	43
	Referências	44

1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Esgotamento Sanitário - SES - de uma cidade é constituído de quatro etapas: coleta, transporte, tratamento e disposição final. A coleta de efluentes é realizada por uma malha de emissários¹ e o transporte ocorre por gravidade até pontos mais baixos, onde se localizam as Estações Elevatórias de Esgoto - EEEs - para novamente pressurizar as águas residuais e manter o seu escoamento em direção ao tratamento (CIDADES, 2008).

Segundo Gomes (2009), os sistemas de abastecimento e de esgotamento sanitário no Brasil são responsáveis pelo consumo de energia elétrica de aproximadamente 10 bilhões de kWh/ano, conforme os dados do Programa Nacional de Conservação de Energia - Procel Sanear - o que representa entre 2 e 3% do consumo total de energia elétrica do país.

Unido a isto, a utilização de motobombas nos sistemas de abastecimento e esgotamento sanitário, são responsáveis por 90% da energia consumida em estações elevatórias (GOMES; CARVALHO, 2012). Por este motivo, alternativas que garantam um melhor rendimento das motobombas de estações elevatórias, possuem grande potencial na redução do consumo de energia elétrica do setor de saneamento.

De forma geral, existem duas principais maneiras de reduzir o consumo de energia de motobombas em elevatórias. A primeira está relacionada com projetar ou adquirir motobombas mais eficientes para o sistema hidráulico e a segunda, foco deste estudo, é aprimorar a performance da bomba com estratégias de controle mais eficientes (DUBEY, 2018). Nesse caso, conforme Rodrigues (2007), é vantajosa a utilização de conversores de frequência, que aplicam um controle da velocidade de rotação da bomba a partir da frequência ajustada, evitando desperdícios ao proporcionar um melhor controle operacional.

A partir da parametrização dos conversores de frequência, diferentes métodos de controle e acionamento das motobombas são programados para controlar o nível de efluentes no poço de sucção de EEEs. Os métodos de controle de nível mais simples preveem a utilização de boias ou sensores de nível para o acionamento à bateladas² das motobombas, entre um nível máximo e mínimo ajustados. Já em métodos mais atuais, as motobombas são acionadas de forma contínua, com velocidade de rotação reguladas por controladores proporcional-integral-derivativo (PID), considerando o nível do poço como variável controlada (SEBASTIÃO, 2017).

O presente trabalho compara três métodos de controle de EEEs encontrados em unidades do SES de Itajaí/SC em uma única estação, com objetivo de identificar qual método de controle apresenta o menor consumo de energia elétrica por volume de esgoto pressurizado. Assim, o método de controle considerado como mais eficiente será padronizado e instalado em outras unidades do SEMASA Itajaí.

¹Parte integrante de uma rede de esgotamento sanitário e/ou pluvial destinada a conduzir os materiais recolhidos pela rede.

²O processo à batelada é o modo de operação em que o sistema é operado de maneira descontínua (liga-desliga).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar o método de controle de estações elevatórias de esgoto mais eficiente dentre três métodos ensaiados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter os parâmetros de ajuste para cada método de controle de estação elevatória testado;
- Ensaiar o método de controle liga/desliga;
- Ensaiar o método de controle por nível tradicional;
- Ensaiar o método de controle por nível otimizado;
- Comparar o consumo específico dos efluentes pressurizados pela estação elevatória durante os períodos de ensaio de cada método de acionamento.

3 JUSTIFICATIVA

O Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura, ou SEMASA Itajaí, é uma autarquia municipal responsável pelo tratamento e distribuição de água e esgoto da cidade de Itajaí. O SES do SEMASA Itajaí atualmente conta 21 EEES em funcionamento, as quais não possuem um método padrão de controle entre si. Além disso, essas estações, conforme Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (2021, p.35), são responsáveis pela coleta de esgoto de 29,06% da população itajaiense e totalizaram R\$ 793.885,68 de gastos com energia elétrica no ano de 2021.

A atualização no marco legal do Saneamento, como posta na Lei nº 14.026/2020, estipula uma meta para que os serviços de saneamento garantam o atendimento de 90% da população na coleta de esgoto até 2033. Ou seja, tal meta impacta em triplicar a cobertura atual do sistema de esgotamento sanitário de Itajaí, e conseqüentemente triplicar o consumo de energia elétrica atual das estações elevatórias de esgoto.

Assim, a partir da iminência do aumento da cobertura da rede coletora de esgoto, somado com a falta de um método de controle padronizado entre as EEES do SEMASA Itajaí, o seguinte trabalho procura identificar um método eficiente de funcionamento de EEES, para que este possa ser replicado em todas as unidades elevatórias do SES de Itajaí/SC.

Em relação à eficiência energética, diferentes métodos de controle das motobombas irão produzir diferentes níveis de rendimento do conjunto e de eficiência do processo. O estudo irá testar três diferentes métodos de acionamento de motobombas em uma das EEES do SEMASA, coletando e posteriormente analisando os resultados, para assim, quantificar e comparar o rendimento das diferentes formas de controle.

A unidade utilizada durante o estudo é a EEE 21, a qual está conectada ao emissário final do SES de Itajaí e realiza a coleta e pressurização de todo o volume de efluentes do sistema atualmente em funcionamento. A escolha da elevatória foi devido ao fato de que esta unidade conta com um medidor de vazão localizado na entrada da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Itajaí, com suas medições monitoradas no sistema supervisorio do SEMASA. A elevatória suporta o funcionamento de até três motobombas de 45 kW simultaneamente, todas acionadas por conversores de frequência. A unidade foi responsável por um custo anual de R\$ 337.683,14 no ano de 2021, com uma demanda contratada na fatura de 120 kW.

A partir do processamento e comparação dos dados obtidos, o método de controle testado que obter o melhor resultado em termos de eficiência energética, não somente será mantido como o método de funcionamento padrão da unidade testada, mas também será implementado em outras EEES do SEMASA Itajaí, para assim, estudar o impacto dessa modificação a partir das faturas de energia.

Entre as referências bibliográficas pesquisadas que abordam o tema de métodos de controle de EEES eficientes, em sua maioria, ou utilizavam de ambientes de testes simulados

em laboratórios, ou não possuíam o enfoque em comparar a eficiência energética destes métodos. Assim, este trabalho procura contribuir para que estudos próximos busquem formas mais eficientes de funcionamento de EEEs, a partir de testes realizados em ambientes reais.

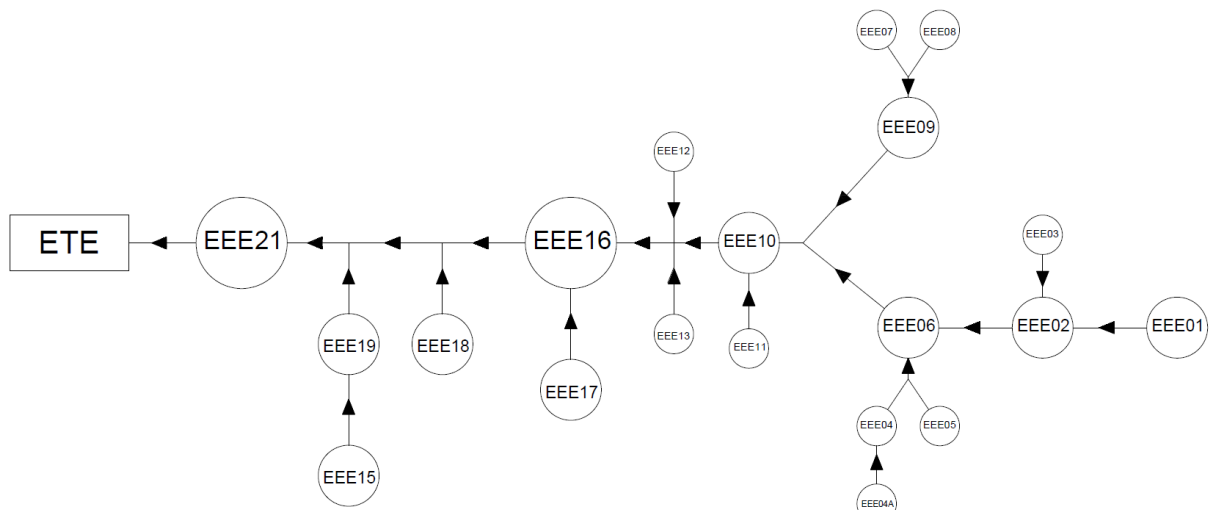
4 REVISÃO DA LITERATURA

Este trabalho trata sobre análises de eficiência energética no contexto de sistema de bombeamento de água residual, estudando o impacto que diferentes configurações do sistema de automação de uma EEE tem sobre o rendimento global da elevatória. Considerando a multidisciplinaridade do assunto estudado, este capítulo servirá para embasar os termos e métodos que serão utilizados, assim como o próprio sistema sob estudo, nos capítulos a seguir.

4.1 O SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE ITAJAÍ/SC

Um SES convencional, conforme Cidades (2008), é o sistema que compreende a coleta, transporte, tratamento e o correto descarte de resíduos provenientes do esgoto. A coleta de efluentes, conforme a norma NBR 8160, é realizada por gravidade, por meio de emissários declinados, onde os efluentes adquirem desnível conforme são transportados. Assim, quando o desnível é demasiado, se inserem as estações elevatórias de esgoto, com a função de pressurizar e transportar a água residual coletada para a Estação de Tratamento de Esgoto - ETE - para que possa ser devidamente tratada e descartada (SEBASTIÃO, 2017). Um sistema de esgotamento sanitário mais complexo, como é o caso do SES do município de Itajaí/SC representado na Figura 1, depende de várias EEEs interligadas em formato de rede, onde as elevatórias menores distribuídas escoam para elevatórias maiores, até eventualmente chegar na ETE.

Figura 1 – Fluxograma do SES de Itajaí/SC



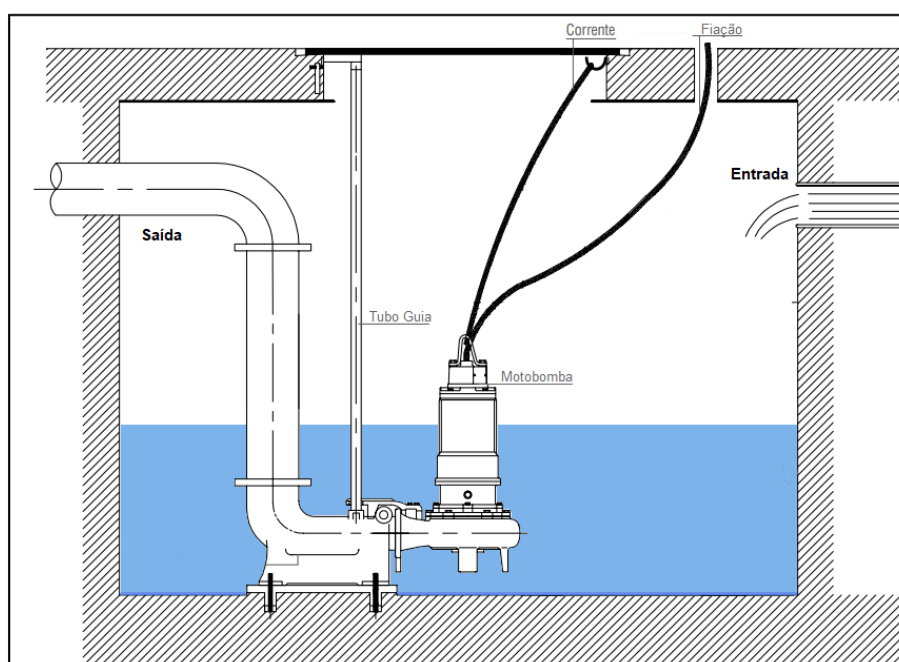
Fonte: Autor.

As EEEs são compostas por um poço de sucção que consiste em uma estrutura de armazenamento temporário do efluente, utilizada para que o bombeamento ocorra de forma

adequada. De maneira geral, os poços de sucção se dividem em dois tipos: as elevatórias com poços secos e as de poços úmidos.

As estações elevatórias de poços secos, ganham este nome, pois os sistemas de bombeamento ficam instalados em uma casa de bombas, fora do poço de sucção. Já nas EEEs de poços úmidos, como é o caso das unidades do SES de Itajaí, os sistemas de bombeamento são submergidos dentro dos poços de sucção, com a finalidade de garantir um ganho de altura manométrica¹ adequada para transportar o volume de efluente armazenado, evitando o enchimento do poço (CIDADES, 2008). A Figura 2 representa uma estação elevatória de esgoto, com um poço de sucção úmido, onde a motobomba é submergida em efluentes para realizar o bombeamento.

Figura 2 – Desenho de uma EEE com poço úmido com motobombas submersíveis.



Fonte: (EBARA, 2021) (Adaptado).

Um dos elementos presentes em todas as EEEs de Itajaí é o extravasor, uma tubulação localizada no topo do poço de sucção para o escoamento emergencial quando o nível de efluentes ultrapassa a capacidade de armazenamento. Sendo assim, os efluentes descartados pelo extravasor são lançados diretamente no meio ambiente sem o devido tratamento. Por este motivo, os sistemas de bombeamento devem evitar que o nível suba demasiadamente, por mais que a ocorrência de extravasamento em dias chuvosos ser praticamente inevitável pela invasão de água pluvial na rede (SEBASTIÃO, 2017).

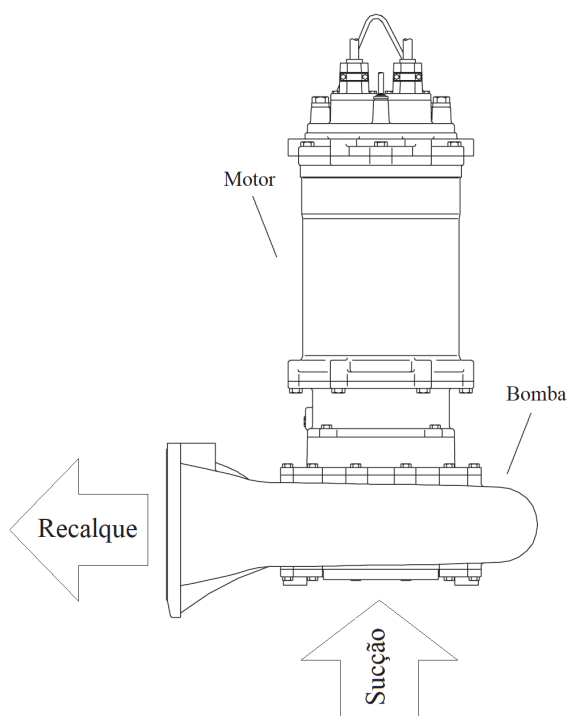
¹A altura manométrica é uma medida em metros, que define a quantidade de energia necessária para realizar o transporte de líquidos, de um local para outro, sem depender da densidade do líquido.

4.2 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Conforme Gomes (2009), um sistema de bombeamento é composto basicamente de uma tubulação de entrada (sucção), um Conjunto Motor-Bomba - CMB - e uma tubulação de saída (recalque). Para ocorrer o transporte de líquido, o CMB deve fornecer a energia necessária para o líquido superar a diferença de nível e as perdas de carga² em todo o percurso. A energia transferida ao fluido por unidade de vazão, chamada altura manométrica, é a diferença da energia potencial e cinética entre entrada e saída da bomba, expressa em metros.

Os CMBs utilizadas nas EEEs de Itajaí/SC possuem características semelhantes. Nas vinte elevatórias atualmente em funcionamento, são utilizadas bombas centrífugas submersíveis como representada na Figura 3, com motores trifásicos de quatro polos e potências distintas de acordo com o porte da estação elevatória.

Figura 3 – Representação de um Conjunto Motor-Bomba submersível.



Fonte: (EBARA, 2021) (Adaptado)

Nos casos em que a altura manométrica necessária para o recalque é grande, assim como quando a demanda de vazão é elevada, é comum se utilizar de associação de bombas para obter parâmetros maiores de sistemas de bombeamento. De maneira geral, se a associação das bombas for em série, soma-se o ganho de altura manométrica de cada bomba, mantendo a mesma vazão. Caso for realizada uma associação em paralelo com bombas idênticas, se somaria

²As perdas de carga são as perdas por atrito ao longo da tubulação e perdas localizadas devido a utilização de peças especiais como curvas e válvulas.

as contribuições de vazão de cada bomba, mantendo fixa a elevação da altura manométrica (GOMES, 2009).

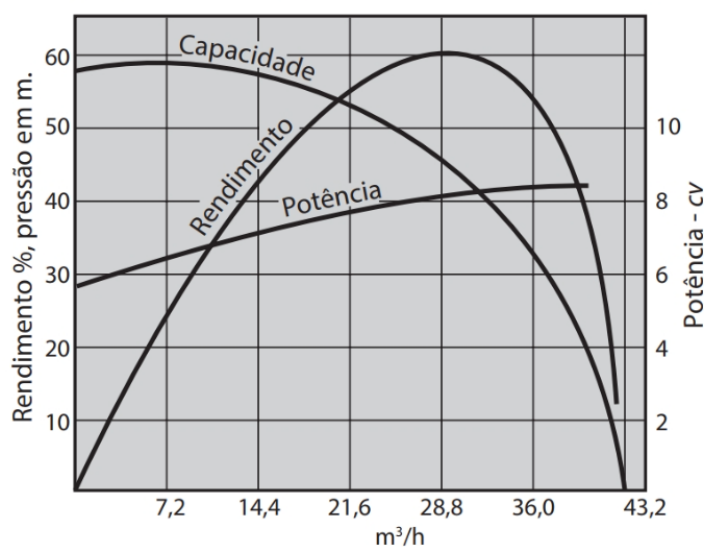
Nas EEEs de grande porte do SES de Itajaí, como é o caso da elevatória analisada pelo estudo, a associação de bombas é utilizada em paralelo, para garantir maior vazão de esgotamento nos períodos de alta demanda da rede. Essa manobra traz grandes benefícios ao rendimento do processo, visto que tal associação pode ser desfeita em momentos de baixa demanda, readequando o ponto de operação, com um simples sistema de automação da estação elevatória.

O funcionamento das bombas de EEEs é geralmente controlado automaticamente, baseado na variação de nível de líquido no poço de sucção, que aumenta ou diminui conforme a relação entre a vazão de entrada e de saída varia. A variação de nível das EEEs é monitorada por sensores de nível do tipo boia e/ou sensores elétricos (ultrassônicos e hidrostáticos), principalmente para o acionamento e interrupção do funcionamento das bombas, como também em alarmes do sistema supervisorio (CIDADES, 2008).

4.2.1 Curvas características

Em geral, como posto por SEBASTIÃO (2017), os fabricantes de motobombas disponibilizam curvas características específicas de cada modelo, para auxiliar os projetistas a escolherem qual motobomba é mais apropriada a sua aplicação. Estas curvas características informam a capacidade de bombeamento do CMB, indicando uma relação entre altura manométrica fornecida pela bomba e a vazão de recalque, em diferentes pontos hidráulicos do sistema. A Figura 4 representa uma curva característica genérica de motobombas, próxima daquelas que são disponibilizadas pelos fabricantes.

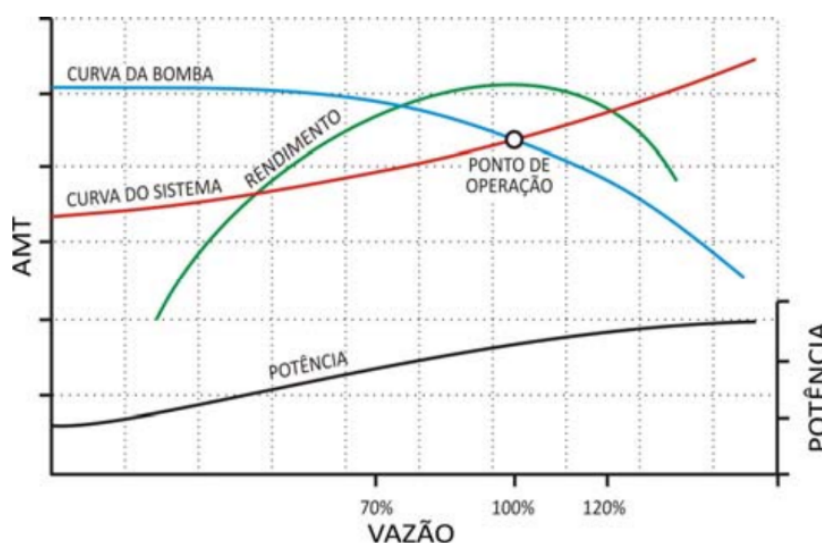
Figura 4 – Curva característica de uma bomba centrífuga.



Fonte: (GOMES, 2009).

A especificação e escolha das motobombas está relacionada à etapa de projeto de um sistema de bombeamento, onde é necessário levantar a curva do sistema hidráulico, que por sua vez, descreve o aumento das perdas de carga na tubulação recalque em função da vazão de saída. O sistema de bombeamento, neste caso, opera onde a curva do sistema hidráulico e a curva da bomba se interseccionam, como representado na Figura 5. O ponto de operação, corresponde aos valores nominais de altura manométrica total - AMT - e de vazão de recalque do sistema de bombeamento (SEBASTIÃO, 2017; GOMES, 2009; ARANTO, 2008).

Figura 5 – Interseção da curva do sistema hidráulico e da curva da bomba.

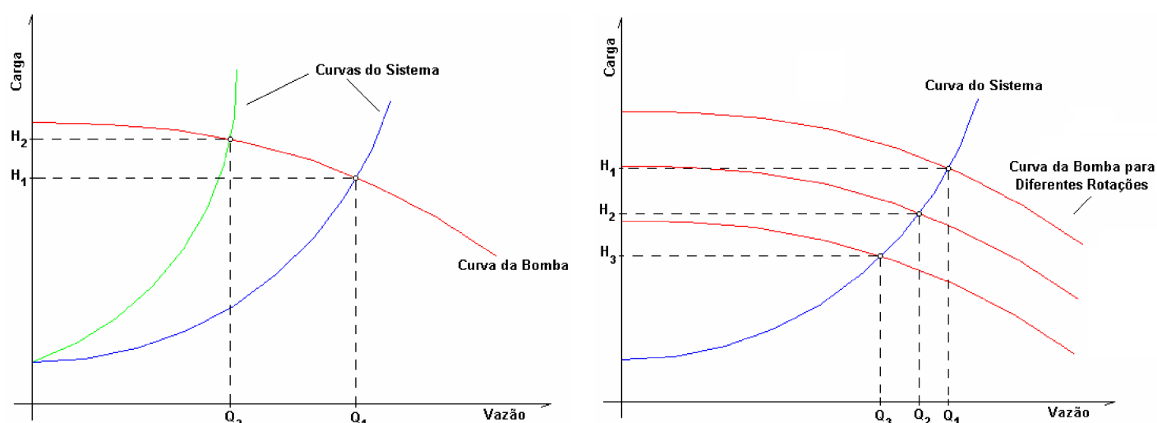


Fonte: (GOMES, 2009).

Idealmente, o ponto de operação do sistema de bombeamento deve ser o mais próximo possível do ponto de maior rendimento da bomba. Uma motobomba não adequada ao ponto de operação hidráulico pode até cumprir com os valores de projeto de vazão e altura manométrica, mas com rendimento menor do que uma bomba mais adequada àquelas condições.

Para controlar o ponto de operação, sistemas mais antigos utilizam válvulas e registros, alterando a curva do sistema hidráulico ao adicionar uma perda de carga (e conseqüentemente perda de energia) para ajustar os parâmetros de vazão e altura manométrica (GOMES, 2009). Atualmente, a alternativa mais recomendada é a utilização de conversores de frequência para o acionamento de bombas, possibilitando a variação da velocidade de rotação da bomba, e assim, alterar a curva característica da bomba para controlar do ponto de operação. Ambas as formas de controlar o ponto de operação estão representadas na Figura 6. (RODRIGUES, 2007)

Figura 6 – Controle do ponto de operação: pelo aumento de perda de carga (esquerda) e pela diminuição da velocidade de rotação (direita).



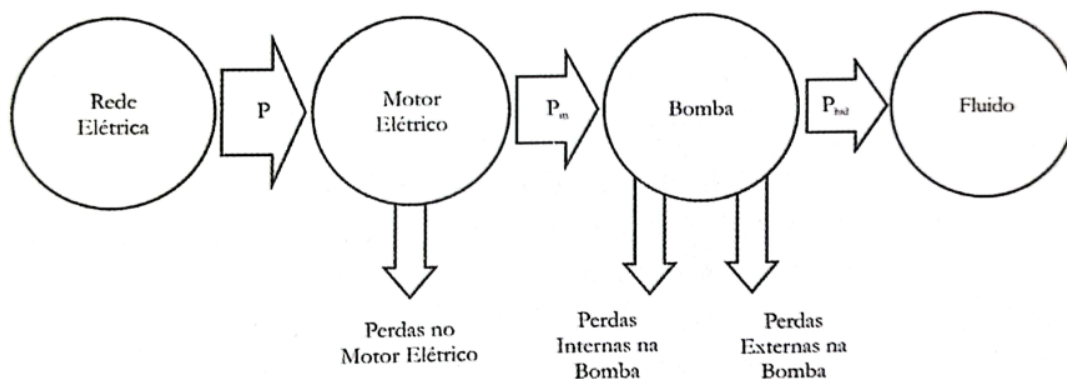
Fonte: (RODRIGUES, 2007) (Adaptado).

O ponto operação de um sistema de bombeamento, de maneira geral, deve ser projetado para o ponto de maior rendimento do conjunto motor-bomba, porém as condições reais de vazão de recalque, altura manométrica e consequente o rendimento dos CMBs, variam conforme a velocidade de rotação das bombas, que podem ser alteradas ao utilizar conversores de frequência de controle.

4.2.2 Perdas em sistemas de bombeamento

Parte do processo de procurar meios para aumentar a eficiência energética de um sistema, é identificar as perdas que este sistema está sujeito. A Figura 7 representa um bom exemplo de fluxo de perda de potência entre as diferentes etapas de conversão de energia de um CMB, distintos entre a rede de energia, motor, bomba e o produto final.

Figura 7 – Fluxo de perda de potência no conjunto motor-bomba.



Fonte: (GOMES, 2009).

Conforme Gomes (2009), quando uma bomba converte a potência que recebe através do eixo do motor para pressurizar o líquido, torna-se evidente que a potência fornecida para

motor é maior que a potência no fluido, devido a perdas no processo de conversão da energia. Estas perdas, são expressas através do conceito de rendimento, definido como sendo a razão entre a energia fornecida pela motobomba e a energia consumida por ela. A potência de uma motobomba é definida na Equação 1:

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H_{man}}{75 \times \eta_{global}} \quad (1)$$

Onde,

P = potência do CMB em CV;

γ = peso específico do líquido a ser elevado (água ou esgoto: 1.000 kgf/m³);

Q = vazão, em m³/s;

H_{man} = altura manométrica em m.c.a (metros coluna de água);

η_{global} = rendimento global do “conjunto motobomba”.

De forma geral, o rendimento de um CMB seria a razão entre a energia convertida e a fornecida ao conjunto. O rendimento global de um conjunto motor-bomba é composto de duas partes, definidas pelo produto entre o rendimento elétrico do motor e hidráulico da bomba, como posto na Equação 2:

$$\eta_{global} = \eta_{motor} \times \eta_{bomba} \quad (2)$$

O rendimento hidráulico nominal de uma bomba pode ser determinado pela velocidade, formato ou tamanho da bomba. Tipicamente, o rendimento é de 85% para bombas de grande porte, 60% para bombas de médio porte, e 40% para as de pequeno porte. Quando se trata do rendimento do motor, as perdas vão de 5 a 20% dependendo do porte do motor, pois parte da potência elétrica ativa é perdida no processo de transformação da energia elétrica para cinética (GOMES, 2009; ARANTO, 2008). Nos caso de estações elevatórias que se utilizem de conversores de frequência para o acionamento do CMB, de acordo com FLYGT (2013), também deve-se considerar de 3 a 4% de energia perdida como calor.

Assim, o rendimento total de um sistema de bombeamento de uma estação elevatória de esgoto, não depende apenas dos rendimentos do CMB e do conversor de frequência. Outro fator que contribui para um menor rendimento de sistemas de bombeamento são as perdas de carga, que no contexto de hidráulica, são as perdas de energia por fricção em tubulações e conexões especiais. (FLYGT, 2013; SEBASTIÃO, 2017).

As perdas de carga, conforme FLYGT (2013), são diretamente proporcionais ao quadrado da vazão de recalque, por este motivo, os métodos de controle de estações elevatórias mais eficientes procuram diminuir a vazão de operação de uma estação elevatória, o que consequentemente reduz a energia perdida.

4.3 AUTOMAÇÃO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ESGOTO

Atualmente, os sistemas de automação e controle são necessários em aplicações de saneamento considerando uma série de requisitos deste setor, tais como, a operação agilizada, o monitoramento remoto em tempo real e a possibilidade de diagnóstico de eventos. Responsáveis por possibilitar a supervisão e controle simultânea de diversas unidades em tempo real, os sistemas de automação proporcionam uma melhoria na agilidade operacional, além da possibilidade da redução dos custos (GOMES, 2009).

Em todas as EEEs de Itajaí/SC, painéis elétricos abrigam os sistemas de automação e controle da unidade, contendo conversores de frequência, responsáveis pelo acionamento das CMBs, como também Controladores Lógico Programáveis (CLPs) e Interfaces Homem-Máquinas (IHMs), encarregados pela leitura de sensores e a configuração dos parâmetros de funcionamento.

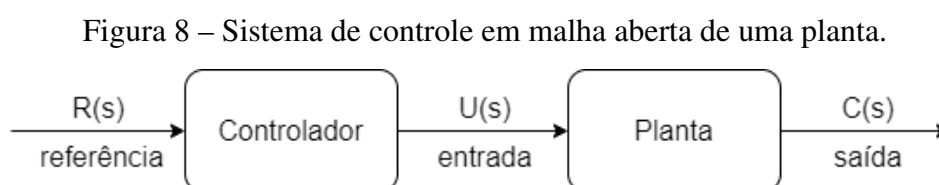
Nos painéis elétricos das EEEs, também constam os sistemas de comunicação das unidades, como rádios, antenas e módulos de comunicação para a interligação da unidade com o sistema supervisor do SEMASA Itajaí.

Nessa seção será referenciada a teoria que acerca os equipamentos utilizados para o controle e supervisão das EEEs de Itajaí, bem como, os sistemas que viabilizaram os ensaios de aquisição dos dados.

4.3.1 Sistema de Controle

De acordo com Gomes (2009), um sistema de controle é um arranjo de dispositivos conectados de tal forma a comandar, monitorar ou regular, manualmente ou automaticamente, a si próprio ou a outros sistemas. Os sistemas de controle podem ser divididos quanto a utilização ou não da realimentação das condições do processo, entre sistemas de malha aberta e malha fechada.

O sistema de controle em malha aberta, como representado na Figura 8, são os sistemas que não se utilizam das condições medidas do sistema para alterar a referência de controle (OGATA, 2014).

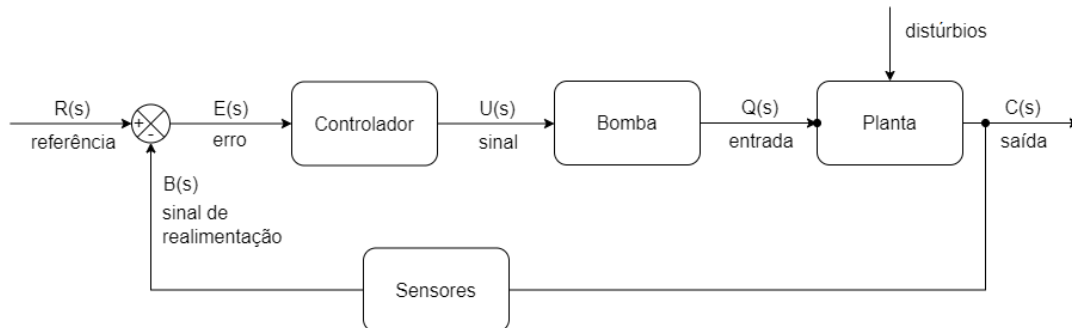


Fonte: (GOMES, 2009) (adaptado).

Já no caso dos sistemas de malha fechada, como representado na Figura 9, a ação de controle depende de alguma maneira da saída do processo, pois utiliza-se da diferença entre um

valor de referência do sistema e do sinal de realimentação, conhecido como erro, para efetuar um ajuste da ação do controlador no processo (OGATA, 2014; GOMES, 2009).

Figura 9 – Sistema de controle em malha fechada em um sistema de bombeamento.



Fonte: (SEBASTIÃO, 2017) (adaptado).

Como exemplo de um sistema de malha fechada em sistemas de bombeamento, pode-se citar o controle de nível de um tanque a partir da velocidade de rotação dos CMBs. Nesse caso, o bloco "bomba" corresponderá ao conjunto do conversor de frequência com o CMB, pois o controlador ao receber as informações do medidor de nível irá alterar a frequência de acionamento da motobomba (SEBASTIÃO, 2017; GOMES, 2009).

Dos vários tipos de controladores encontrados em ambientes industriais, o mais recorrente em aplicações de saneamento é o controlador PID, que consiste em um controlador temporal dinâmico composto pelas ações proporcional, integrativa e derivativa. A ação proporcional é a correção proporcional ao erro, enquanto a ação integrativa é a correção proporcional a magnitude e a duração do erro, já a ação derivativa, é a correção proporcional a taxa de variação do erro. A saída do controlador PID, descrito pela Equação 3, é o resultado da soma ponderada das correções de cada ação.

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Onde,

$e(t)$: Erro em função do tempo t ;

K_p : Ganho proporcional;

K_i : Ganho integrativo;

K_d : Ganho derivativo.

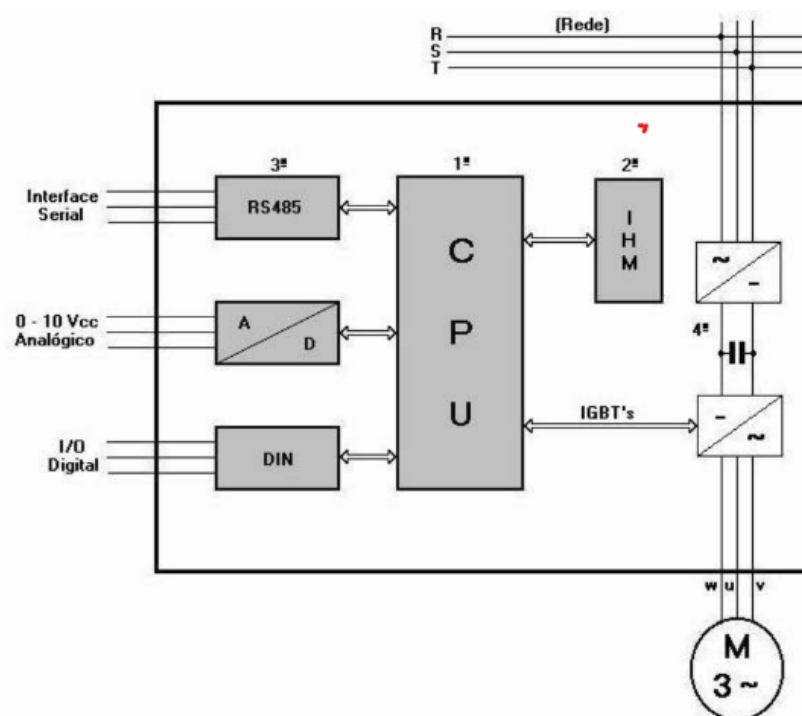
Os controladores PID necessitam de um valor de referência para controlar uma variável, porém, a maioria dos processos que envolvem saneamento são de natureza multivariável, e devido a isto, cada controlador requer seu próprio valor de referência e variável controlada. Assim, para que seja possível parametrizar o controlador, é necessário conectá-lo a um monitor capaz de ajustar o seu valor de referência, seja por meio de uma Interface Homem-Máquina (IHM), ou remotamente, por meio de sistemas supervisórios.

4.3.2 Conversores de frequência

O conversor de frequência, também popularmente chamado de inversor de frequência, é um equipamento eletrônico microprocessado que varia a velocidade de rotação de motores de indução (consequentemente de motobombas), de forma proporcional a frequência da tensão de alimentação (GOMES; CARVALHO, 2012). Considerando que o ponto de operação é a intersecção da curva da bomba e do sistema hidráulico, o conversor de frequência controla o processo de bombeamento a partir da alteração da curva característica da bomba.

Como representado na Figura 10, Rodrigues (2007) divide o funcionamento de um conversor de frequência em quatro blocos: a unidade central de processamento (CPU), IHM, interfaces de entrada e saída, assim como a etapa de potência do conversor. Entre as funcionalidades dos blocos, é possível mencionar o processamento e armazenamento dos parâmetros ajustados pelo usuário através da IHM, e o monitoramento de dados de sensores, para o controle dos sinais de comandos dos IGBTs da etapa de potência.

Figura 10 – Diagrama base de um conversor de frequência



Fonte: Rodrigues (2007) apud Capelli (2002).

Entre as funcionalidades de conversores de frequência comercializados para aplicações de saneamento, existem equipamentos com controladores PID embutidos e possibilitam o controle diretamente pelo equipamento, como é o caso dos conversores de frequência instalados na EEE 21 de Itajaí/SC, da marca Mitsubshi Electric modelo FR-F800.

Apesar de ser possível de controlar um CMB unicamente pelo conversor de frequência, as aplicações que exigem o controle de várias bombas simultaneamente necessitam de

uma topologia de controle mais sofisticada, desta forma utilizam-se de CLPs para controlar o funcionamento do sistema de bombeamento.

4.3.3 Controlador lógico programável

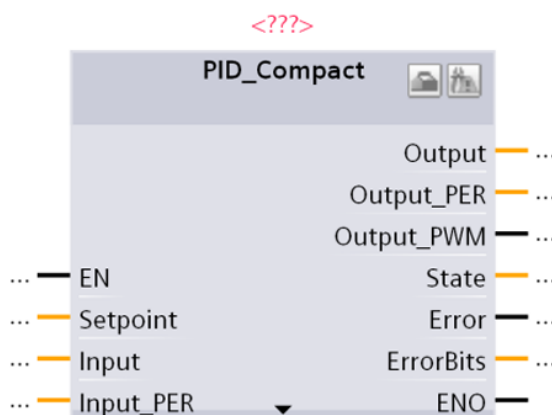
Os sistemas de controle são responsáveis por controlar processos de diferentes graus de complexidade, que podem envolver diversos equipamentos mecânicos, elétricos, hidráulicos, bem como dispositivos eletrônicos. Esses componentes trabalham juntos para manter o processo de produção estável e preciso, eliminando quaisquer estados de transição perigosos no processo (MACHADO, 2020). Nesse contexto, os CLPs são utilizados como parte central de um sistema de controle, capazes de serem programados para executar instruções de controle (PETRUZELLA, 2016).

A lógica dos CLPs envolvem quatro principais etapas: a unidade central de processamento (CPU), as entradas e saídas, a memória e a interface homem-máquina (IHM). Essas etapas fazem a leituras e o armazenamento de informações de sensores e equipamentos, bem como, o controle de processos a partir de uma lógica de programação aplicada pelo usuário (PETRUZELLA, 2016; JÚNIOR et al., 2005).

Os CLPs são recorrentemente programados em diagrama de escada, ou *Ladder*, linguagem que utiliza da representação simbólica de circuitos elétricos, para tornar a linguagem acessível para o corpo técnico (PETRUZELLA, 2016). Apesar das linguagens de CLPs serem comuns a todos os modelos, segundo Machado (2020), os fabricantes costumam desenvolver seus próprios softwares de programação para seus respectivos CLPs.

Assim como nos conversores de frequência, alguns fabricantes de CLPs disponibilizam softwares de programação com blocos de controladores PID, onde se inserem as variáveis de entrada, saída e *setpoints*, como representado pela figura 11.

Figura 11 – Bloco de controlador PID no software TIA Portal da marca Siemens



Fonte: (SIEMENS, 2017).

4.4 PRINCÍPIOS GERAIS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Uma ação de eficiência energética, conforme Moreira (2021), pode ser definida como qualquer ação que promova a redução do consumo de energia, mantendo o mesmo nível de serviço prestado. Essas medidas de eficiência energética normalmente se concentram nas fases de operação e manutenção de um sistema e podem contribuir para a redução dos custos operacionais (melhoria do rendimento de equipamentos e/ou sistemas) em conjunto com a redução do consumo de insumos (energia, água, gás, etc.). Assim, numa perspectiva geral, as ações de melhoria da eficiência energética promovem o aumento da relação entre o nível de produção de energia e o nível de consumo de energia, e por este motivo, são promovidas por diversos programas governamentais

Entre os tópicos relevantes ao estudo da eficiência energética, desenvolvidos nas subseções a seguir, é a estrutura tarifária brasileira, com o faturamento do consumo de energia elétrica no Brasil, assim como os indicadores de eficiência energética, que possibilitam a comparação do desempenho energético de uma unidade consumidora.

4.4.1 Estrutura Tarifária Brasileira

Em uma análise de desempenho energético, o aspecto de custo é um dos fatores decisivos na tomada de decisões para as ações de eficiência energética. Para isto, é necessário o entendimento da estrutura tarifária brasileira e seus conceitos fundamentais, a seguir, de acordo com ANEEL (2021a):

- Consumo: energia elétrica gasta durante um intervalo, calculada pela potência ativa da carga por tempo, expressa usualmente em kWh.
- Demanda: média das potências elétricas ativas (kW) ou reativas (kVAr), requerida pela carga ou injetada no sistema elétrico de distribuição pela geração, durante um intervalo de tempo especificado.
- Demanda medida: é o maior valor de demanda requerido do sistema elétrico de distribuição pela unidade consumidora, integralizada em intervalos de 15 minutos, durante um período de faturamento;
- Demanda contratada: demanda de potência ativa, definida em contrato, a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, expressa em quilowatts (kW);
- Tempo de Integração: é o período entre medições, utilizado para questões de faturamento das concessionárias, como o cálculo da demanda;
- Fator de carga: razão entre a demanda média e a demanda máxima da unidade consumidora, ocorridas no mesmo intervalo de tempo;
- Fator de Potência: é o valor da relação entre a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas em um mesmo período especificado.

Assim, define-se a estrutura tarifária, como o conjunto de tarifas aplicáveis ao consumo

de energia elétrica e/ou demanda de potência ativa, de acordo com a modalidade de fornecimento.

Na estrutura tarifária brasileira, os consumidores são classificados como grupos A e B, dependendo da tensão de fornecimento de energia, tipo de ligação e carga total instalada. No grupo B, os consumidores são atendidos em tensão inferior a 2,3 kV, taxados sobre o consumo somente, sem a cobrança de demanda. Geralmente se enquadram nessa categoria as residências, pequenas indústrias e pequenos estabelecimentos comerciais (ANEEL, 2021b; PROCEL, 2001).

De maneira geral, são classificados como grupo A, os consumidores de média e alta tensão que recebem energia elétrica em tensão igual ou superior a 2,3 kV. Conforme a ANEEL (2021b), para que uma unidade consumidora se encaixe no grupo A, ela deve somar mais de 75 kW de carga instalada, e a partir deste valor, não há mais como o consumidor optar por uma taxa convencional, com valor único.

Os consumidores do grupo A possuem tarifação binomia, ou seja, são responsáveis tanto por pagar o consumo, como também por contratar uma quantidade de demanda que se espera utilizar da infraestrutura da concessionária de energia (PROCEL, 2001). Assim, a demanda contratada é o valor limite de demanda de uma unidade consumidora, entretanto, caso o valor registrado exceda o contratado, haverá uma multa, sob forma de uma tarifa aumentada apenas sobre a demanda de ultrapassagem. Em relação as questões de faturamento de energia no Brasil, conforme Gomes e Carvalho (2012), a demanda energética é registrada a partir de um intervalo de integração de 15 minutos.

Outro fator importante para consumidores do grupo A, é a medição de fator de potência, que apesar de não ser faturada, pode gerar multas caso o limite estabelecido não seja respeitado. Esse tipo de cobrança, até pouco tempo, não era autorizada à consumidores do grupo B mesmo quando o limite era excedido, panorama este que pode futuramente mudar (PROCEL, 2001).

A partir da demanda ativa e reativa de uma instalação elétrica, o fator de potência é registrado de hora em hora, com valor de referência de 0,92 (capacitivo ou indutivo) em território brasileiro de acordo com ANEEL (2021b). Assim, se o valor do fator de potência registrado de uma unidade consumidora estiver abaixo do valor de referência, a concessionária aplica uma multa por baixo fator de potência (CAPELLI, 2013; PROCEL, 2001).

A EEE 21 do SES de Itajaí/SC, se encaixa como uma unidade consumidora do grupo A, por este motivo, para uma análise de desempenho que leva em conta a tarifação, é necessário entender a forma do faturamento da conta de energia elétrica. Para isto, a tarifação de consumidores do grupo A é constituída de duas estruturas tarifárias, a escolha do consumidor, relacionadas e descritas nas subseções a seguir.

4.4.1.1 Estrutura tarifária horo-sazonal verde

Os dois principais conceitos da modalidade de tarifação verde, é a contratação de demanda e a divisão da tarifação de consumo por postos tarifários³ (horário de ponta e fora de ponta).

³Período em horas para aplicação das tarifas de forma diferenciada ao longo do dia (ANEEL, 2021a).

A estrutura tarifária verde é caracterizada por uma tarifa única sobre a demanda sem segmentação horária (assim como a convencional) e duas tarifas sobre o consumo de energia, uma para o posto tarifário de ponta e outra para o posto tarifário fora de ponta.

O horário de ponta, compreende o período de três horas consecutivas do dia, adotado entre 18:30h a 21:30h em Santa Catarina (CELESC, 2021). Nesse período, o valor da tarifa sobre o consumo é maior, em comparação que o valor da tarifa convencional, com o intuito de desincentivar o consumo excessivo durante o horário de ponta. Conseqüentemente, o horário fora de ponta, é o período de 21 horas diárias complementares ao horário de ponta, onde a tarifa de consumo é reduzida em relação à tarifa convencional (CAPELLI, 2013).

4.4.1.2 Estrutura tarifária horo-sazonal azul

A estrutura tarifária horo-sazonal azul, é a modalidade onde se divide a contratação de demanda, assim como a tarifação sobre consumo, entre postos tarifários de ponta e fora de ponta. Assim, a conta de energia elétrica dos consumidores nesta modalidade é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e a demanda ultrapassada, com tarifas distintas para o horário de ponta e horário fora de ponta (ANEEL, 2021b; PROCEL, 2001). Esta modalidade, apesar de obrigatória para algum dos subgrupos de consumidores de alta tensão do grupo A, para unidades consumidoras de média tensão é opcional (PROCEL, 2001). Assim, é comum que se realizem estudos em unidades consumidores para identificar qual estrutura tarifária é a mais benéfica.

4.4.2 Indicadores de eficiência energética

Os indicadores de eficiência energética são valores quantitativos, que permitem extrair informações relevantes sobre o desempenho energético de algum sistema, para assim, poder concluir se a eficiência energética do processo é satisfatório, ou se é necessária alguma intervenção. Logo, indicadores de eficiência energética são, de maneira geral, uma relação entre o consumo de energia elétrica com algo que se deseja comparar, como o produto final de um determinado processo.

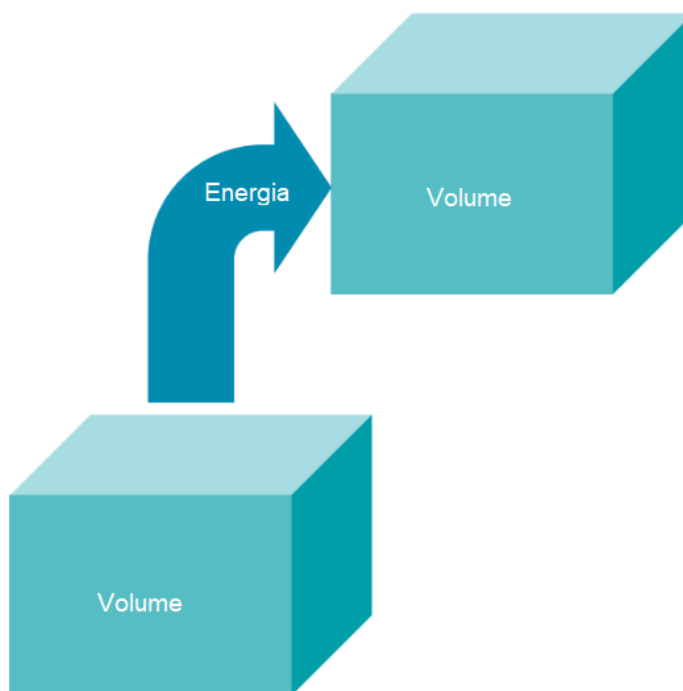
Conforme Monachesi e Monteiro (2011) entre os indicadores de eficiência energética mais recorrentes nos serviços de saneamento estão aqueles que relacionam a energia consumida com o volume de água ou esgoto bombeado (consumo específico) e aqueles relacionados ao custo unitário da energia adquirida pela concessionária (custo específico).

O consumo específico, é considerado o principal indicador de eficiência energética utilizado para comparar o desempenho de sistemas de bombeamento. Expresso em kWh/m³ (quilowatt hora por metro cúbico), o consumo específico é calculado pela Equação 4 a seguir:

$$\text{Consumo Específico} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Volume Bombeado}} \quad (4)$$

Como representado pela Figura 12, o consumo específico pode ser definido como a quantidade de energia necessária para transportar um metro cúbico de algum líquido. Nessa perspectiva, quanto menor o consumo específico, menor o consumo de energia elétrica de um sistema de bombeamento para transportar o mesmo metro cúbico (GOMES, 2009; FLYGT, 2013; MONACHESI; MONTEIRO, 2011).

Figura 12 – Representação de consumo específico.



Fonte: (FLYGT, 2013) (ADAPTADO).

Outro indicador de eficiência energética é custo específico, utilizado para identificar com qual eficiência a energia está sendo adquirida pelo consumidor. No cálculo do custo específico utiliza-se o valor total da fatura em reais, dividido pelo consumo total faturado em kWh. Desta forma, pode-se comparar o custo da aquisição de energia de diferentes unidades, sob diferentes modalidades tarifárias, até mesmo, o impacto financeiro de modificar o padrão de consumo de uma unidade consumidora, como por exemplo, diminuir o consumo energético em horário de ponta (MONACHESI; MONTEIRO, 2011).

Como o foco do estudo é comparar o desempenho do sistema de bombeamento, o estudo se limita a utilizar apenas o consumo específico. O custo específico não será analisado, pois, durante o período de execução do estudo houveram mudanças nas bandeiras tarifárias, o que impacta na análise de custo específico.

5 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada para obtenção dos indicativos de desempenho de cada método de controle testado. Para isto, é necessário descrever a unidade sob teste, seus equipamentos e os procedimentos que serão utilizados durante a etapa de aquisição de dados. Apresenta-se nesta seção, os métodos de controle que serão ensaiados, dentre eles, o método atual de funcionamento da unidade.

5.1 DESCRIÇÃO DA UNIDADE SOB TESTE

A unidade utilizada durante o estudo foi a EEE 21, representada na Figura 13, cuja tubulação de saída do poço de sucção é o emissário final do SES de Itajaí/SC, com conexão direta com a ETE em uma tubulação com aproximadamente 3300 metros de distância. Considerando isto, a utilização da estação elevatória como unidade sob teste, deve-se principalmente pela disponibilidade de um medidor de vazão conectado ao sistema supervisorio da autarquia na entrada da estação de tratamento, ao final do emissário, utilizado para indicar o volume de efluentes pressurizados pela EEE 21.

Figura 13 – EEE 21 do SES de Itajaí/SC.



Fonte: Autor.

O poço de sucção da elevatória, com nível máximo de 5,5 metros de altura, comporta até quatro motobombas instaladas, porém é restrita ao funcionamento simultâneo de até duas motobombas, sob risco de ultrapassagem de demanda contratada. A operação contínua, no entanto, é realizada comumente por dois CMBs em momentos de alta demanda (tarde e noite) e apenas uma bomba nos períodos de baixas demanda (madrugada e manhã) sob regime de revezamento.

A unidade conta com um painel de comando, representado pela Figura 14, onde estão instalados quatro conversores de frequência para o acionamento de cada CMB. Todos os conversores de frequência são controlados por um único CLP, que por sua vez funciona como a interface das indicações de sensores e dos comandos do sistema supervisorio. O CLP é responsável pela lógica de funcionamento geral da unidade, porém pode ser controlado remotamente por telemetria e manualmente pelo painel de comando da unidade.

Figura 14 – Painel de comando da EEE 21.



Fonte: Autor.

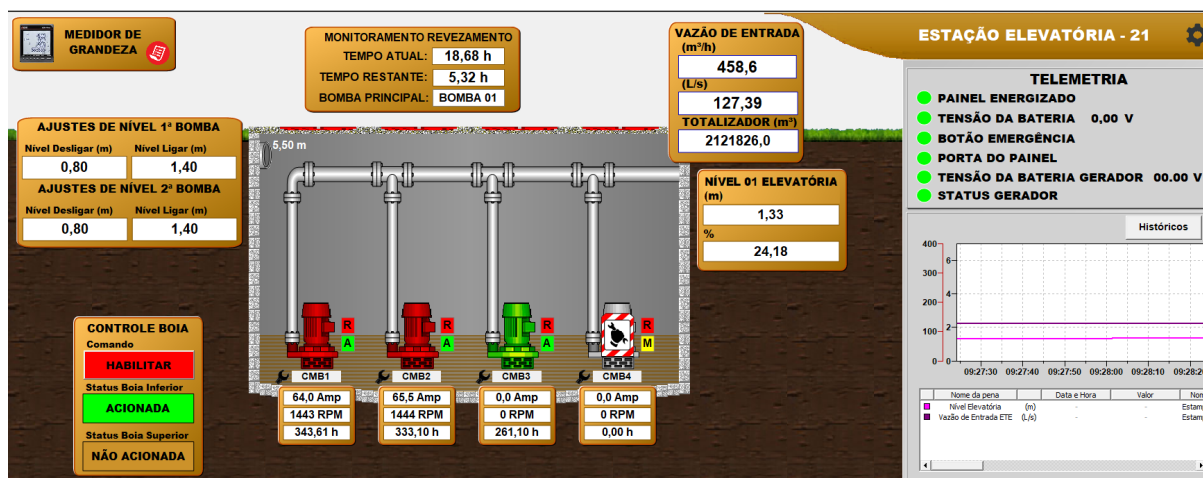
5.1.1 Sistema Supervisorio

O sistema supervisorio do SEMASA Itajaí é conectado aos equipamentos de telemetria das unidades por meio de radioenlaces¹, indicando as informações operacionais das unidades. O supervisorio, configura como a principal ferramenta utilizada para a aquisição de dados, considerando que todos os parâmetros necessários para a comparação dos métodos de controle são indicados e armazenados por este sistema.

A interface da unidade sob teste dentro do sistema supervisorio, representada na Figura 15, possui as informações das CMBs, o nível de efluentes e a vazão de saída do poço de sucção, com um totalizador que integraliza o volume de esgoto bombeado (vazão de entrada da ETE). Estas informações que constam na interface da unidade são atualizadas em tempo real, porém uma amostra das indicações é armazenada no histórico a cada dez minutos.

¹Radioenlace é o tipo de sistema de comunicação que contempla a transmissão de dados por ondas de rádio frequência.

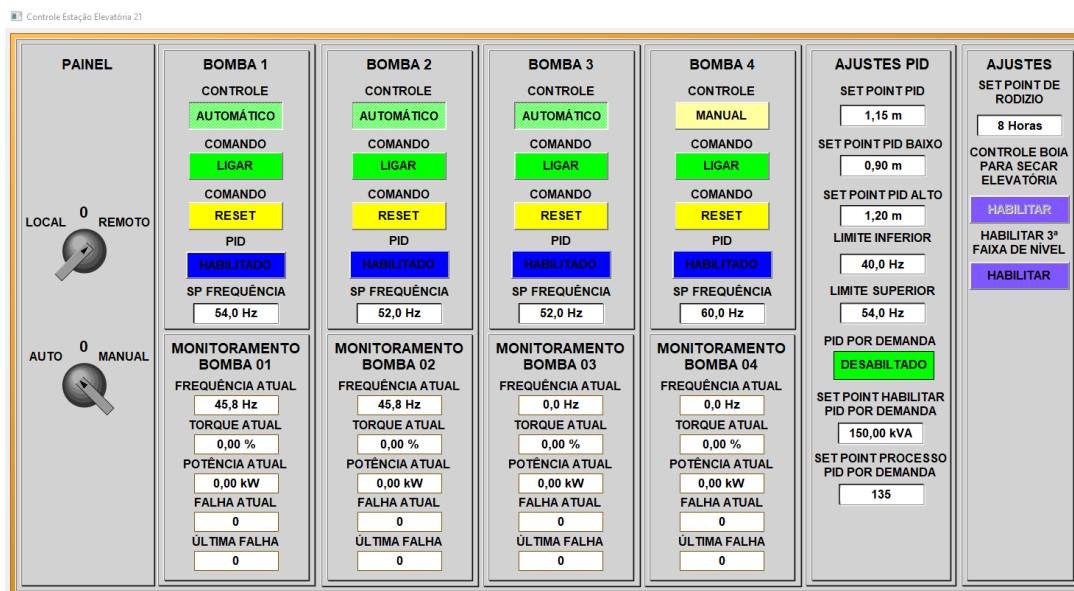
Figura 15 – Interface de monitoramento da EEE 21.



Fonte: Autoria Própria.

Além de mostrar as indicações dos parâmetros das EEE 21, a interface conta com uma janela para o controle das CMBs, representada nas Figura 16. Na interface de controle dos CMBs, é possível alterar o regime de funcionamento da CMBs de automático, para manual, além de ajustar uma série de parâmetros da unidade.

Figura 16 – Interface de controle dos CMBs da EEE 21.



Fonte: Autor.

No regime de controle automático, o sistema permite que o CLP da unidade realize a operação completa do CMB, desde ligar ou desligar os CMBs, como também, ajustar a frequência de acionamento de cada CMB individualmente. Entre os parâmetros ajustáveis que alteram o regime funcionamento automático, está o *setpoint* de nível do controlador PID, assim como os valores máximos e mínimos de frequência, que o controlador pode atribuir às CMBs.

No caso do regime de controle manual, todo o controle de nível fica sobre responsabilidade do operador, habilitando o comando de ligar/desligar as bombas, assim como o ajuste da velocidade de rotação das bombas, a partir da frequência de chaveamento.

Por fim, para monitorar a demanda de potência ativa da unidade, o sistema conta com um medidor de grandezas implementado em sua interface, possibilitando também o registro do consumo de energia, como a aferição de parâmetros como corrente, tensão e fator de potência.

5.1.2 Multimetro de grandezas elétricas

A fim de monitorar os parâmetros elétricos da EEE 21 e integrar esses parâmetros no sistema supervisor do SEMASA Itajaí, foi instalado um Multimetro de Grandezas Elétricas - MGE - na porta do painel de comando da unidade. O MGE utilizado foi da marca Mitsubishi Electric modelo ME956SSEB-MB, representado na figura 17.

Figura 17 – Medidor de grandezas elétricas instalado no painel da EEE 21.



Fonte: Autor.

O MGE foi instalado para a medição trifásica, antes do disjuntor geral da unidade, em um sistema de ligação com três transformadores de corrente (TC) para medição de corrente e ligação direta para tensão. Desta forma, os valores medidos irão refletir o consumo total da unidade e poderão ser comparadas com a medição da concessionária de energia.

O medidor instalado possui as seguintes medições: tensão e corrente de fase (F-N), tensão e corrente de linha (F-F), corrente de neutro, fator de potência, potência ativa, potência reativa, potência aparente e o consumo acumulado. Essas indicações do MGE são transmitidas ao sistema supervisor do SEMASA Itajaí, onde podem ser monitoradas remotamente, como

representado na figura 18.

Figura 18 – Janela do MGE da EEE 21 no sistema supervisório do SEMASA Itajaí



Fonte: Autor.

Com a inserção dos parâmetros no sistema supervisório, os parâmetros de grandezas elétricas são indicados em tempo real, porém, uma amostra é armazenada a cada dez minutos. Estas informações podem ser exportadas do histórico e utilizadas para a comparação dos métodos de controle.

5.1.3 Medidor de Vazão

A fim de medir a vazão de recalque e volume bombeado pela EEE 21, foi utilizado um medidor de vazão do tipo Calha Parshall, representado pela Figura 19. O medidor de vazão fica localizado entrada da ETE, porém, possui ligação direta e exclusiva com a EEE 21, em uma tubulação de mais de três quilômetros de distância.

Em medidores tipo Calha Parshall, a variação da velocidade do fluido resulta na variação da altura do líquido ao longo da calha, logo, a partir de um sensor de nível posicionado acima da calha, pode-se calcular a vazão de efluentes que passa pelo equipamento (ASSIS; ARMELIN, 2021).

A Calha Parshall é um equipamento de medição de vazão que pode medir grandes quantidades de vazão, porém, conforme Assis e Armelin (2021) é um equipamento sensível a turbulências e pode chegar a erros de medição de até 8,5%.

Figura 19 – Calha Parshall utilizada para medição de vazão da EEE 21.



Fonte: Autor.

O sensor de nível utilizado na Calha Parshall transmite seus dados para uma central eletrônica de monitoramento, representada na Figura 20, que realiza a conversão de nível para vazão e indica as medições de vazão momentâneas. A partir da comunicação à rádio, a central eletrônica de monitoramento envia os dados do medidor de vazão para o sistema supervisor do SEMASA Itajaí.

Figura 20 – Central eletrônica de monitoramento do medidor de vazão de entrada da ETE.



Fonte: Autor.

Entre os dados enviados do medidor de vazão para o sistema supervisorio do SEMASA Itajaí, estão a vazão e o volume totalizado, como consta na interface da EEE 21, representado na Figura 15, na parte superior da janela². A partir da diferença do volume totalizado entre duas datas distintas, adquiridas através do histórico armazenado no sistema supervisorio, obtém-se o volume bombeado pela EEE 21 no período correspondente.

5.2 TESTE DE FREQUÊNCIAS

O teste de frequências é o primeiro ensaio a ser realizado na EEE 21, ele tem como objetivo descrever o comportamento da vazão de recalque do sistema de bombeamento, em vários níveis de frequência de acionamento dos CMBs. Com este teste é possível identificar os *setpoints* de frequência para os métodos de controle que exigem a personalização da faixa de frequência.

Além de descrever a vazão de recalque, com o teste de frequências, também é medido o valor eficaz (RMS) da potência ativa da unidade sob vários níveis de frequência. Desta forma, possibilita obter o valor de demanda a ser contratada em métodos de controle que possuem uma limitação na frequência máxima de acionamento das motobombas.

Os testes foram realizados durante um dia de alta demanda da rede de esgoto, para assim, simular momentos de alta vazão de entrada no poço de sucção da elevatória. A partir disto, o menor valor de frequência de acionamento das CMBs capaz de reduzir o nível da elevatória pode ser utilizado como frequência máxima dos métodos de controle.

A EEE 21, no método anterior de funcionamento, alternava o funcionamento do sistema de bombeamento entre uma e duas bombas de acordo com o nível do poço de sucção. Por este motivo, o procedimento do teste será realizado, em primeiro momento, com apenas uma CMB e depois, com a associação em paralelo de dois CMBs. Assim, é possível comparar o resultado de ambos os testes, para observar se é vantajoso manter a alternância do número de bombas, ou se o funcionamento da EEE será restrito a duas bombas.

O procedimento do teste baseia-se no controle manual da frequência de acionamento dos CMBs. Inicia-se o ensaio na frequência máxima de chaveamento (60 Hz), decrescida em passos de 2 Hz após o registro de três medições. Em cada medição, é registrada a frequência, a vazão de recalque momentânea e a potência ativa da unidade.

Devido a distância da tubulação entre a EEE 21 e a medição de vazão de recalque da EEE 21 ser de aproximadamente 3300 metros de distância, um tempo de acomodação de 20 minutos deve ser administrado antes das três medições, para cada decréscimo de frequência de acionamento dos CMBs.

Por conta do controle de nível de efluentes no poço de sucção da elevatória ser realizado de forma manual durante todo o período de execução do teste, os testes de frequências com uma e duas CMBs foram executados de forma alternada. Ou seja, enquanto o nível do poço da

²Por mais que na interface esteja referenciado como "vazão de entrada", esse é o medidor da vazão de entrada da ETE, que representa a vazão de recalque da EEE 21.

EEE estivesse baixo, realiza-se o teste de frequência com uma CMB, pois, por conta da falta de capacidade de esgotamento de apenas uma bomba, o nível sobe. Contrariamente, o teste com duas CMBs inicia-se em nível alto, com objetivo de diminuir o nível, pela elevada capacidade de esgotamento.

Considerando que reduz-se a capacidade de esgotamento ao diminuir a frequência de acionamento do CMBs, os testes com uma e duas CMBs mantêm sua alternância até o momento em que a variação de nível torna-se crítica. Assim, quando o nível subir em tempo inferior ao necessário para realizar as três medições, é necessário cessar a continuidade do teste.

A partir dos dados obtidos no teste de frequência, é possível obter a menor frequência de acionamento dos CMBs capaz de esgotar a elevatória sob qualquer circunstância, além de medir a demanda ativa da unidade, por frequência de acionamento. Essa informação irá fazer parte da parametrização dos métodos de controle de EEEs a serem apresentados a seguir, como é o caso da frequência fixa utilizada no método à batelada, como também na frequência máxima do método de controle de nível constante otimizado.

5.3 MÉTODOS DE CONTROLE DE EEEs

Neste estudo serão testados três métodos de controle de EEEs, sendo eles: controle de nível à batelada, controle por nível constante tradicional e o controle por nível constante otimizado. As subseções a seguir irão descrever os métodos de controles testados durante os estudos.

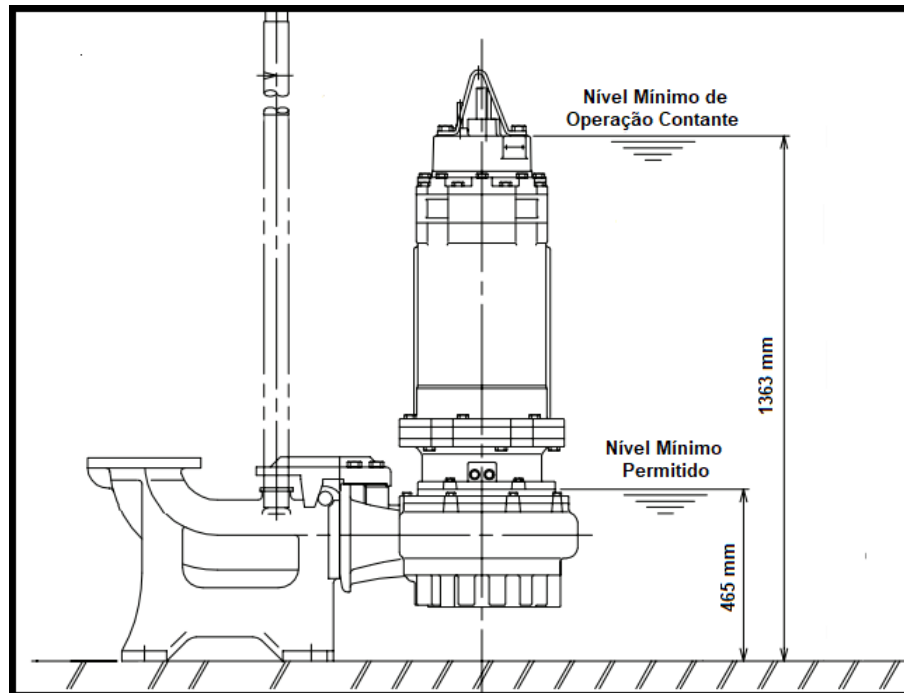
5.3.1 Método 1: Controle de nível à batelada

No método de controle de nível à batelada, também chamado de "*setpoint* e histerese" por (SEBASTIÃO, 2017), os CMBs operam em uma velocidade de rotação fixa e são operados em controle liga-desliga de acordo com o nível do poço de sucção.

De forma geral, caso o nível do poço ultrapasse o nível superior parametrizado, as duas bombas são acionadas simultaneamente em uma velocidade de rotação fixa, suficiente para esgotar a elevatória em momentos de alta demanda da rede. Entretanto, caso o nível de efluentes da elevatória diminuir além do valor mínimo parametrizado, as bombas serão desligadas, até o momento que o nível ultrapasse novamente o nível máximo, onde o ciclo liga-desliga se repete.

Durante a parametrização dos *setpoints* dos métodos de controle de nível a serem testados, o nível máximo de funcionamento das bombas foi ajustado em 190 centímetros, devido à existência de um cesto que filtra resíduos sólidos da tubulação de entrada. O parâmetro de nível mínimo foi ajustado em 80 centímetros, respeitando ao nível mínimo permitido conforme o manual do fabricante da motobomba, representado na Figura 21.

Figura 21 – Parâmetros operacionais de nível da Motobomba 200 DL.



Fonte: (EBARA, 2021) (Adaptado).

Os parâmetros de nível máximo e mínimos da EEE 21 são ajustados no sistemas de supervisor da SEMASA Itajaí, conforme a Tabela 1. A frequência de acionamento deste método ainda deve ser definida pelos resultados do teste de frequências.

Tabela 1 – Parâmetros do método de controle de nível à batelada.

Parâmetros	Valor Ajustado
Nível Máximo	1,9 m
Nível Mínimo	0,8 m
Frequência	a definir

Fonte: Autoria Própria.

5.3.2 Método 2: Controle por nível constante tradicional

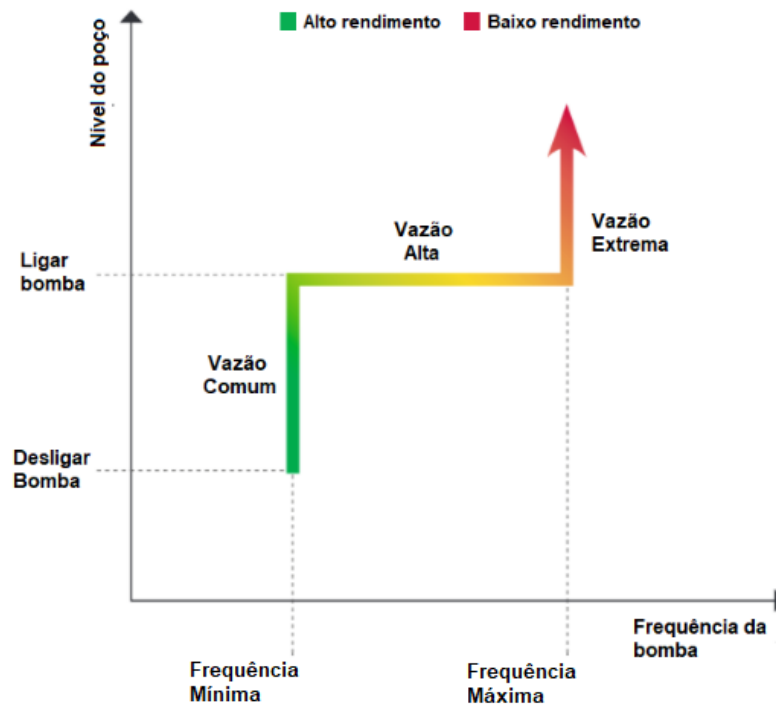
No método de controle por nível constante, os CMBs operam com velocidade de rotação variável, controlada por um controlador PID. Neste método, o sistema de bombeamento deve manter o nível constante em um valor de referência ajustado, conseqüentemente aproximando a vazão de saída com a vazão de entrada do poço de sucção (FLYGT, 2013).

Neste método, o nível do poço de sucção é controlado a partir da frequência de chaveamento dos conversores de frequência que acionam as CMBs. A frequência mínima de acionamento é restrita a 35 Hz, pois, de acordo com EBARA (2021), é o valor mínimo recomendado para as motobombas do modelo DL. O valor máximo de frequência de acionamento

considerada para este método de controle foi de 60 Hz, considerado como a frequência máxima do modelo de bomba aplicado na EEE 21.

A Figura 22, representa o funcionamento do método de controle por nível constante tradicional, com o comportamento do nível em diferentes demandas de vazão de entrada do poço de sucção.

Figura 22 – Funcionamento do método de controle de nível tradicional.



Fonte: (FLYGT, 2013) (Adaptado).

A restrição nos valores de frequência apenas impede que o controlador possa ajustar valores diferentes ao que compreende a faixa de funcionamento. Por este motivo, quando a frequência máxima de acionamento das CMBs (60 Hz) não for suficiente para bombear a entrada de efluentes no poço de sucção, o nível subirá inevitavelmente. Da mesma forma, quando a frequência mínima representar uma capacidade de bombeamento excessiva para períodos de baixa vazão de entrada, não será possível diminuir a frequência além do mínimo parametrizado (35 Hz), logo, o nível irá abaixar.

Os valores de ganho proporcional, integrativo e derivativo, se mantiveram os mesmos que o do projeto inicial da unidade, porém o *setpoint* de nível do controlador PID foi ajustado para 1,6 metro, para garantir o funcionamento contínuo, entre os valores de nível mínimo e máximo de funcionamento da bomba. Os parâmetros e seus valores ajustados para o método de controle por nível constante tradicional estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros método de controle por nível constante tradicional para EEE 21.

Parâmetros	Valor Ajustado
Nível Máximo	1,9 m
Nível Mínimo	0,8 m
Nível de referência	1,6 m
Frequência máxima	60 Hz
Frequência mínima	35 Hz

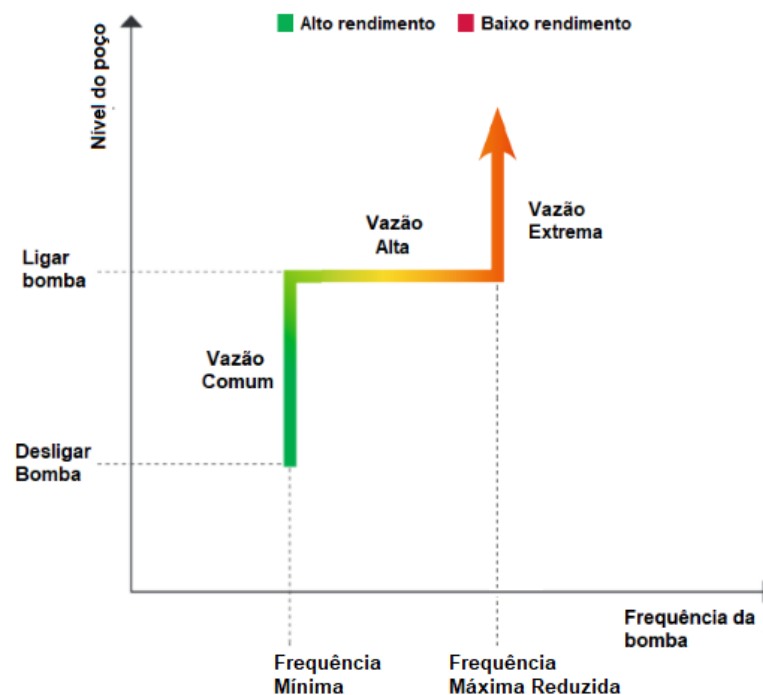
Fonte: Autoria Própria.

5.3.3 Método 3: Controle por nível constante otimizado

Assim como o controle por nível tradicional, este método utiliza de um controlador PID para variar a velocidade de rotação dos CMBs e manter o nível da elevatória constante em um valor de referência. A principal diferença para o método tradicional, é a personalização da faixa de frequência de acionamento das bombas, restringindo faixas de frequência que refletem condições menos eficientes.

A Figura 23, representa o funcionamento do método de controle por nível constante otimizado, com o comportamento do nível em diferentes demandas de vazão de entrada do poço de sucção. Comparando com o método tradicional, a principal diferença é a resposta do controlador PID, em relação a uma vazão de entrada extrema, que é limitada a uma frequência máxima reduzida.

Figura 23 – Funcionamento do método de controle de nível tradicional.



Fonte: (FLYGT, 2013) (Adaptado).

Neste método, reduz-se os valores máximos de frequência que o controlador PID pode atribuir ao conversor de frequência, mantendo a capacidade de esvaziamento do poço de sucção, mesmo em dias de alta demanda da rede. A limitação na frequência máxima de chaveamento, de acordo com FLYGT (2013), deve restringir as faixas de frequência com consumo específico elevado, otimizando o acionamento do CMB, porém mantendo a capacidade de redução de nível do poço de sucção.

O ajuste da frequência mínima foi mantido no valor de 35 Hz, devido a recomendação de segurança do fabricante do CMB, que alerta que danos podem ocorrer à bomba em frequências inferiores. No caso da frequência máxima, essa deverá ser definida pelo teste de frequência, com objetivo de reduzir o limite superior de frequência ajustável em relação ao método tradicional.

Os parâmetros e seus valores ajustados para o método de controle por nível constante otimizado estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros método de controle por nível constante otimizado para EEE 21.

Parâmetros	Valor Ajustado
Nível Máximo	1,9 m
Nível Mínimo	0,8 m
Nível de referência	1,6 m
Frequência máxima	a definir
Frequência mínima	35 Hz

Fonte: Autoria Própria.

5.3.4 Metodologia de aquisição de dados

Para comparar a eficiência energética de cada método de controle, a unidade sob teste foi submetida a cada um dos três métodos de controles estipulados (batelada, constante tradicional, constante otimizado), por um período de um dia completo. Durante o período de execução dos testes de cada método de controle, a EEE 21 operou exclusivamente de maneira automática, ou seja, sem manobras manuais de controle ou manutenções.

A fim de realizar uma comparação mais justa dos resultados de cada ensaio, foram descartados os dias que houveram quaisquer interferências operacionais, bem como interferências climáticas (chuvas e marés). A invasão de água pluvial na rede de esgoto, causam níveis maiores de vazão de recalque da EEE 21, diminuindo a eficiência de bombeamento, por este motivo são descartadas as amostras de dias chuvosos. Com esse mesmo objetivo, os três ensaios devem ocorrer em um período não superior a uma semana, evitando a sazonalidade da utilização da rede de esgoto.

A partir da realização dos ensaios de testes, foram obtidos os dados armazenados no sistema supervisor de consumo, demanda ativa e de volume de efluentes esgotado de um dia de funcionamento da EEE 21 em cada método testado. A partir disto, calcula-se o consumo específico de cada método testado, para permitir a comparação da eficiência de cada método.

Após a comparação dos resultados, o método de controle que for identificado como o mais eficiente será mantido como o método de controle padrão, e a partir disto, a EEE 21 passará a operar desta forma.

O método identificado como mais eficiente será aplicado durante um período completo de faturamento (aproximadamente um mês), para possibilitar a comparação com o histórico do volume pressurizado, consumo e demanda medida de meses anteriores. As informações mensais de volume pressurizados serão retiradas do histórico armazenado no sistema supervisorio do SEMASA Itajaí, já as informações de consumo e demanda medida, serão obtidas do histórico de faturas de energia.

6 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de testes de cada método de controle testada na EEE 21, a partir dos dados armazenados pelo sistema supervisor do SEMASA Itajaí.

6.1 RESULTADOS DO TESTE DE FREQUÊNCIAS

A execução do ensaio do teste de frequências foi dada em um dia de chuva leve, para simular uma alta vazão de entrada no poço de sucção da EEE 21. O controle de nível do poço foi feito de forma manual, por este motivo, os testes de frequências com um CMB e com a associação de dois CMBs foram realizados de forma alternada. Ou seja, quando o nível subia demasiadamente durante os testes com apenas uma bomba, iniciavam-se os testes com duas bombas. Contrariamente, quando o nível do poço de sucção abaixava excessivamente, o teste de frequências com apenas uma bomba era retomado

A continuidade de ambos os testes foi mantida até o limite de 48 Hz, com uma bomba, e 38 Hz com duas CMBs, onde o nível subia em tempo inferior ao tempo de acomodação necessário para realizar as três medições.

A partir dos dados obtidos durante o teste de frequências, foi realizada uma média aritmética entre as medidas de vazão e potências ativa em cada frequência testada. Desta forma, os resultados do teste de frequências com uma e duas bombas estão dispostos nas Tabelas 4 e 5 respectivamente.

Tabela 4 – Resultado do teste de frequência ótima com um CMB.

Frequência (Hz)	Vazão (m ³ /h)	Potência Ativa (kW)
60 Hz	450,14	49,95
58 Hz	449,55	45,38
56 Hz	434,92	41,05
54 Hz	416,50	36,93
52 Hz	400,73	33,20
50 Hz	375,47	29,83
48 Hz	363,04	26,70

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5 – Resultado do teste de frequência ótima com duas CMBs.

Frequência (Hz)	Vazão (m ³ /h)	Potência Ativa (kW)
60 Hz	581,06	94,95
58 Hz	570,20	86,90
56 Hz	568,22	78,40
54 Hz	559,75	69,45
52 Hz	560,36	62,53
50 Hz	549,65	55,90
48 Hz	542,70	49,80
46 Hz	524,14	43,90
44 Hz	524,14	38,43
42 Hz	496,06	33,55
40 Hz	428,53	29,15
38 Hz	380,66	25,25

Fonte: Autoria Própria.

Comparando as duas tabelas, nota-se que com potência similar, o acionamento de dois CMBs a 48 Hz possui uma vazão de recalque 20% maior que o acionamento apenas com uma bomba a 60 Hz, motivo este utilizado para restringir o sistema de bombeamento da unidade para o funcionamento com duas bombas. Logo, os métodos de controle testados neste trabalho, serão baseados em um sistema de bombeamento com duas bombas em paralelo, visto que a EEE 21 passará a operar exclusivamente desta forma.

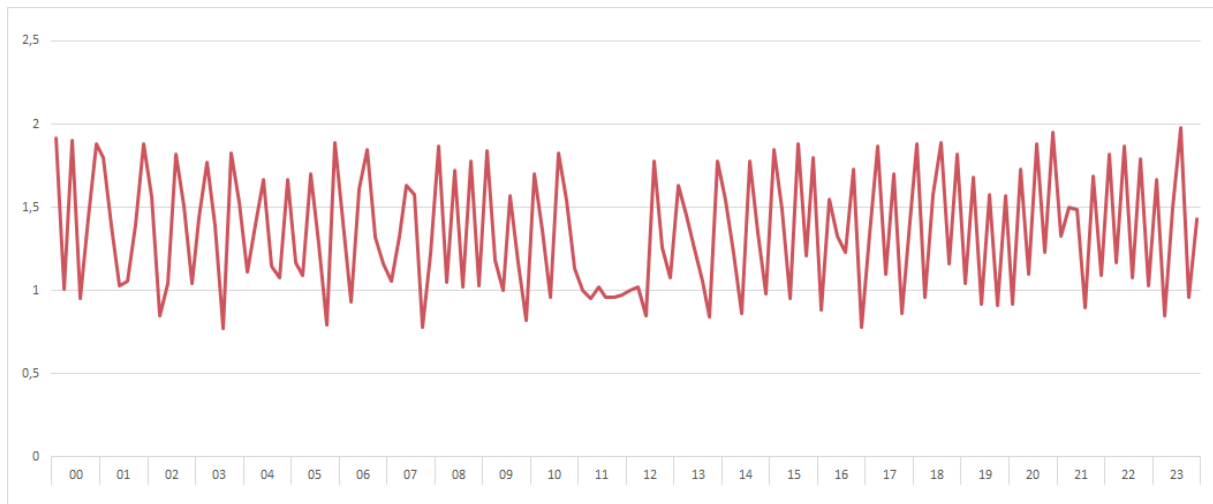
Ao correlacionar os resultados do teste de frequência, com o que é apresentado por FLYGT (2013), observa-se que devido à maior vazão e maior perda de carga, maiores valores de frequência apresentaram consumo específico elevado (menos eficiente), que diminui conforme o decréscimo da frequência,

Após a realização do teste de frequência, definiu-se a menor frequência de chaveamento capaz de esgotar a elevatória sob qualquer demanda de vazão de entrada, para compor a frequência de acionamento no método à batelada, bem como a frequência máxima do método de controle de nível constante otimizado. Assim, sob certa margem de segurança, a frequência de chaveamento máxima foi ajustada para 54 Hz para ambos os métodos.

6.2 RESULTADOS DO MÉTODO DE CONTROLE DE NÍVEL À BATELADA

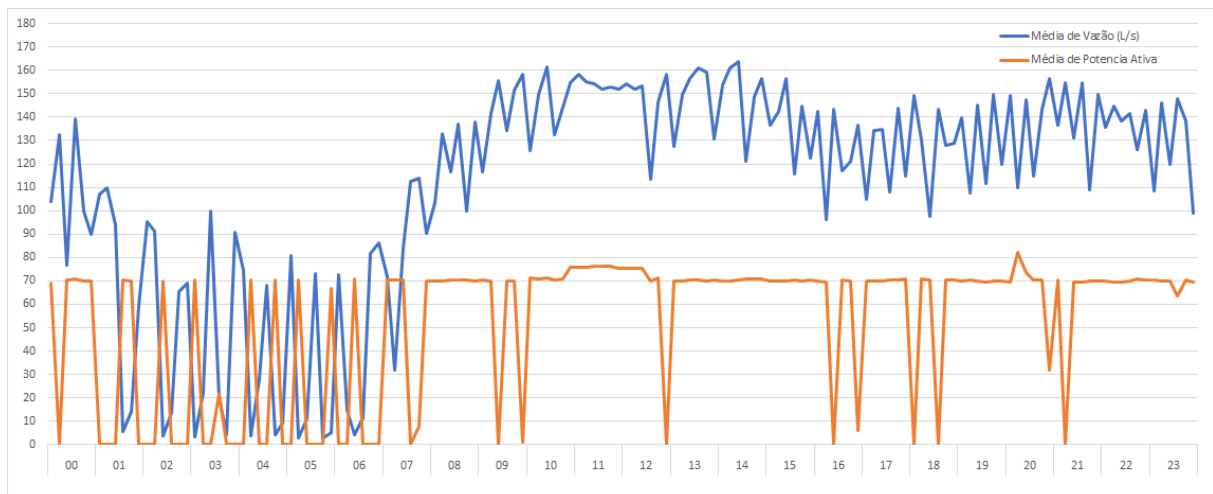
No ensaio de teste realizado para o método de controle de nível à batelada, onde se opera as motobombas com velocidade de rotação fixa, observou-se uma alta variação do nível do poço, devido ao comportamento cíclico de funcionamento das bombas. As Figuras 24 e 25 representam o comportamento da EEE 21 durante o período de teste do método de controle de nível à batelada.

Figura 24 – Nível (m) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método à batelada.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 25 – Vazão de Recalque (L/s) e potência Ativa (kW) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método à batelada.



Fonte: Autoria Própria.

O nível da EEE 21 no método de controle à batelada, representado na Figura 24, mesmo com a alta variação, não ultrapassou os limites de nível máximo e nível mínimo preestabelecidos, o que representa que este método atendeu a capacidade de bombeamento necessária para a demanda de efluentes do dia.

A partir do histórico de potência ativa e vazão de recalque do período de teste, retratado na Figura 25, percebe-se que maiores valores de vazão de recalque são obtidos quando as CMBs funcionam constantemente. Em períodos do teste com menor fluxo de entrada de efluentes, observou-se um aumento no número acionamento dos CMBs, em ciclos liga-desliga de menor duração, mas que não excederam o limite de 5 acionamentos por hora recomendado pela norma ABNT NBR 12208.

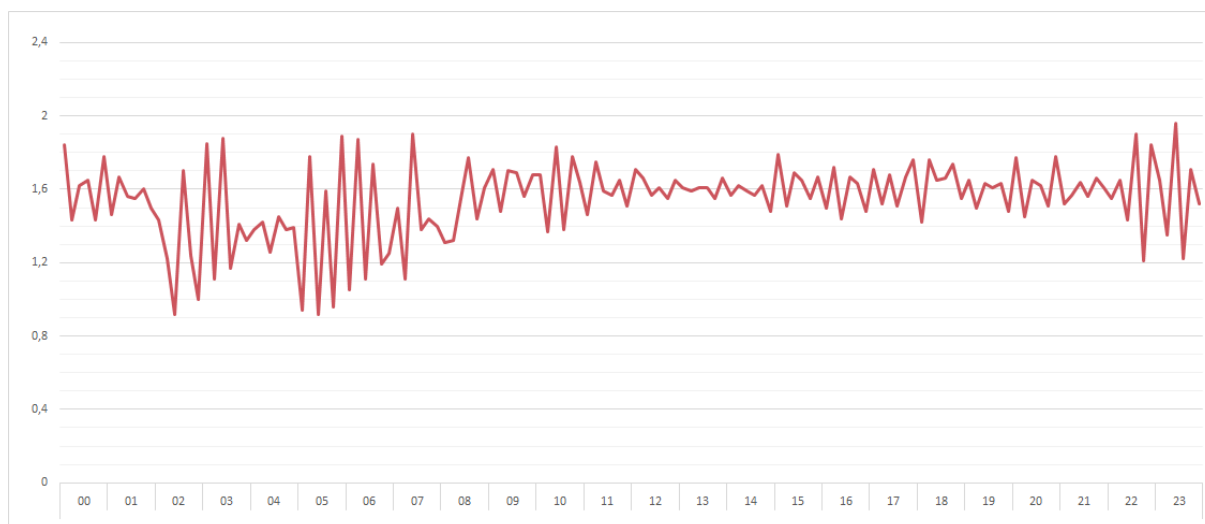
Analisando os gráficos das Figuras 24 e 25, nota-se que a subida do nível é o período que compreende ao desligamento das bombas, enquanto a queda do nível do poço representa o momento onde as bombas estão acionadas.

Durante o período de teste de vinte e quatro horas consecutivas sem interrupções, a EEE 21, acionada pelo método de controle de nível à batelada consumiu 1251 kWh de energia elétrica, bombeando um volume de 9364 m³ de efluentes. Tais números correspondem a um consumo específico de aproximadamente 0,1336 kWh/m³.

6.3 RESULTADOS DO MÉTODO DE CONTROLE DE NÍVEL CONSTANTE TRADICIONAL

Entre os métodos de controle de nível constante, o método tradicional é aquele cuja faixa de frequência ajustável pelo controlador PID, foi definida conforme as características máximas e mínimas de funcionamento da bomba, sem a devida personalização ao sistema hidráulico. Neste método a variação de nível é consideravelmente reduzida, pois o controlador procura ajustar a frequência de chaveamento das CMBs para que o nível fique constante no nível de 1,6 metro. A Figura 26 representa o comportamento do nível da EEE 21 durante o período de teste do método de controle de nível constante tradicional.

Figura 26 – Nível (m) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método constante tradicional.

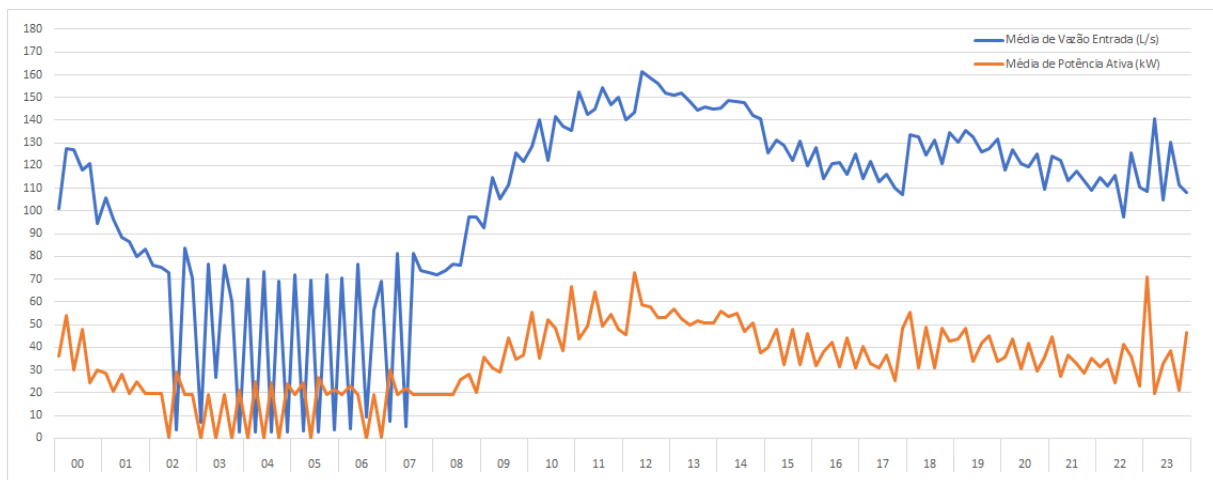


Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se a partir do comportamento do nível, que a variação do nível é maior em momentos de baixa demanda. Supõe-se que, devido à restrição de frequência mínima de 35 Hz, as bombas operem superdimensionadas para a vazão de entrada de efluentes daquele momento, até o ponto que o nível chega a 0,8 metro e interrompe o funcionamento das bombas. A partir da interrupção das bombas no nível inferior, as bombas só retornam a operação a 1,9 metro, como visto nos momentos iniciais e finais do dia.

A Figura 27 retrata o comportamento da potência ativa, junto da vazão de recalque da EEE 21 durante o período de teste do método de controle de nível constante tradicional. Por ser um método que contempla a variação da frequência de acionamento dos CMBS para manter o nível constante, a magnitude da potência ativa da unidade varia proporcionalmente à vazão de entrada no poço de sucção. Por este motivo, observa-se uma queda drástica na demanda elétrica da unidade no período da manhã, onde o efeito de liga-desliga ocorre pela limitação de uma frequência inferior.

Figura 27 – Vazão (L/s) e potência Ativa (kW) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método constante tradicional.



Fonte: Autoria Própria.

Durante o período de teste do método de controle de nível constante tradicional, não houveram picos de demanda da rede de efluentes, e assim, as motobombas não utilizaram de toda a faixa de frequência disponível, se limitando a frequências mais intermediárias. Esse fator fica claro no gráfico da potência ativa, onde a demanda da unidade durante o período de teste não ultrapassou os 90 kW, quando a 60 Hz, como descrito na Tabela 5, poderia alcançar ao patamar de 95 kW.

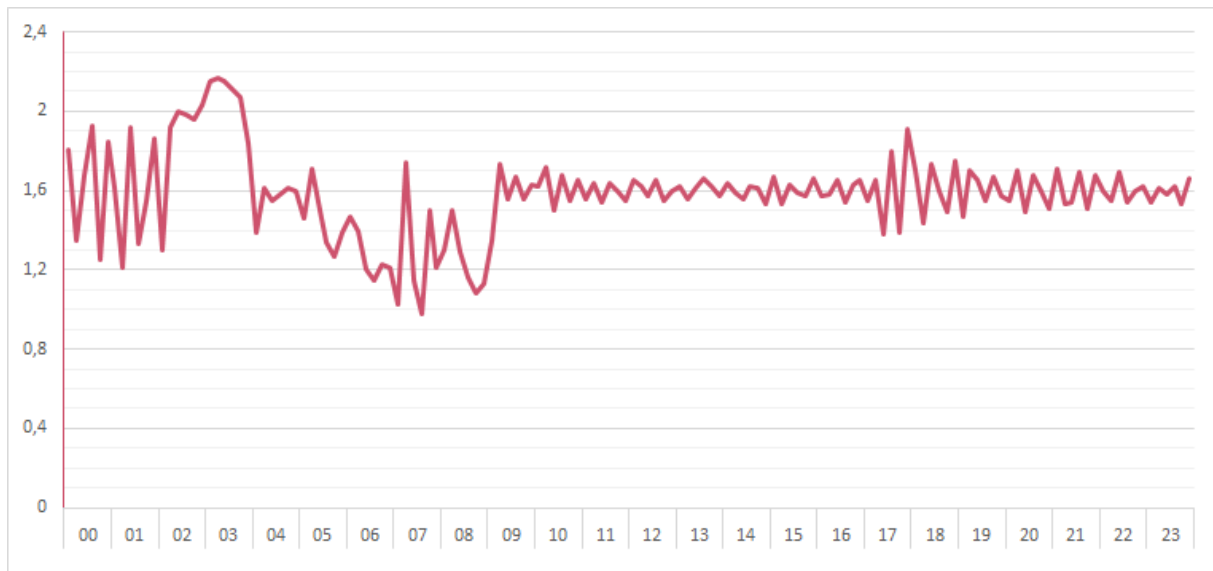
Após o ensaio de teste com o período de um dia, sem interrupções, a EEE 21 sob o método de controle de nível constante tradicional consumiu 910 kWh de energia elétrica, bombeando um volume de 8882 m³ de efluentes. Tais números correspondem a um consumo específico de aproximadamente 0,1025 kWh/m³.

6.4 RESULTADOS DO MÉTODO DE CONTROLE POR NÍVEL CONSTANTE OTIMIZADO

A partir da redução da frequência máxima ajustável pelo controlador PID, como feito no método de controle por nível otimizado, à priori, impede que as CMBs operem em pontos extremamente ineficientes em momentos de alta demanda da rede de efluentes, como chuvas intensas e alagamentos.

A alteração pelo método de controle por nível constante otimizado, como observada na Figura 28, não alterou consideravelmente o padrão de comportamento de nível em relação ao método tradicional. Neste método o nível manteve-se próximo do nível de referência de 1,6 metro, com picos de nível nos períodos de baixa demanda da rede de efluentes.

Figura 28 – Nível (m) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método de controle de nível constante otimizado.

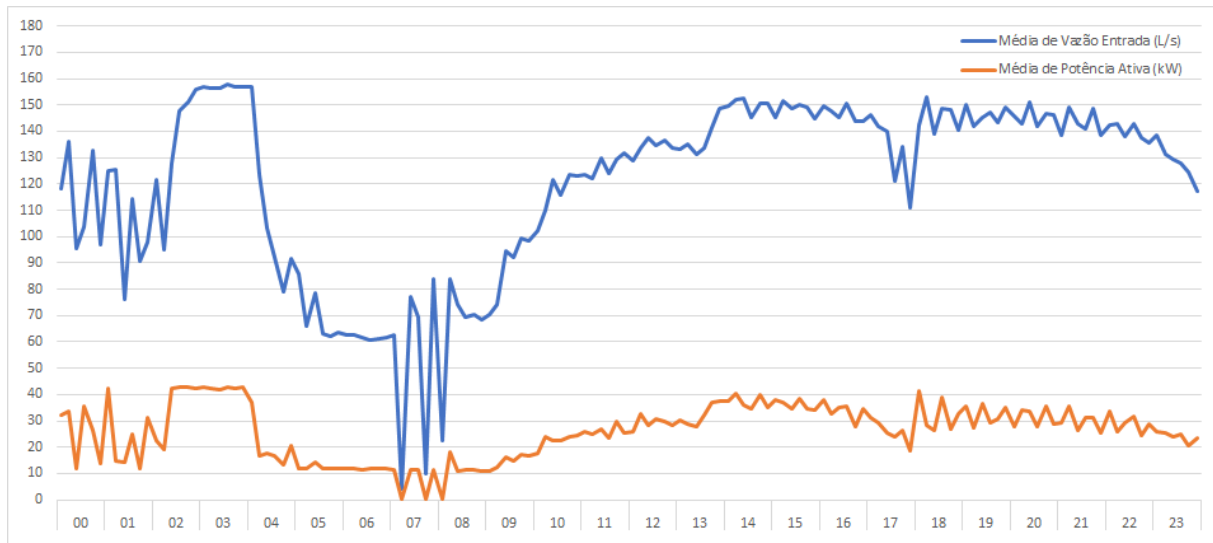


Fonte: Autoria Própria.

Assim como o método tradicional, o padrão da magnitude da potência ativa no método de controle de nível constante otimizado é proporcional ao da vazão de recalque da EEE 21, visto na Figura 29, referente ao comportamento da potência ativa, junto da vazão de recalque da EEE 21 durante o período de teste do método de controle de nível constante otimizado.

No método de controle de nível contante otimizado, é adicionada a restrição de 54 Hz na frequência máxima, o que se traduz numa restrição na potência ativa máxima de aproximadamente 70 kW, conforme os dados da Tabela 5. Porém, como é observado na Figura 29, essa limitação na demanda máxima da unidade não ocorre, o que significa que o controlador PID conseguiu estabilizar o nível em frequências menores.

Figura 29 – Vazão (L/s) e potência Ativa (kW) da EEE 21 por período (em horas) do teste do método de controle de nível constante otimizado.



Fonte: Autoria Própria.

Após o ensaio de teste com o período de um dia, sem interrupções, a EEE 21 sob o método de controle de nível constante otimizado consumiu 626 kWh de energia elétrica, bombeando um volume de 10132 m³ de efluentes. Tais números correspondem a um consumo específico de aproximadamente 0,0618 kWh/m³.

6.5 DISCUSSÃO

Uma das maiores dificuldades encontradas na execução dos ensaios de testes, foi a replicação das condições climáticas entre os ensaios de cada método testado. A intrusão de água pluvial na rede de esgoto interfere diretamente na medição de consumo específico, logo, como não seria possível replicar estas mesmas condições climáticas entre os três métodos, optou-se por rejeitar amostras de testes que ocorreram em dias de chuva.

Por conta da decisão de rejeitar amostras de dias chuvosos, pra garantir a padronização das condições de teste, ao invés da realização de testes de uma semana por método, optou-se pela realização de testes em apenas um dia completo, em dias de uma mesma semana.

A partir dos resultados dos ensaios de teste de um dia com cada método de controle de EEEs, a Tabela 6, demonstra a performance de cada método em controlar a EEE 21 em cada período de teste.

Tabela 6 – Comparativo entre os resultados de cada método de controle de nível de EEE ensaiado.

Método	Consumo (kWh)	Volume Bombeado (m ³)	Consumo Específico (kWh/m ³)
Batelada	1251	9364	0,1336
PID Tradicional	809	8794	0,0920
PID Otimizado	626	10132	0,0618

Fonte: Autoria Própria.

Utilizando o consumo específico como parâmetro de apuração dos resultados, é possível observar que o método de controle de nível constante otimizado apresentou a melhor eficiência, considerando que este método apresentou o menor consumo específico, cerca de 48,86% a menos que o segundo mais eficiente. Da mesma forma, o método de controle de nível à batelada foi o método menos eficiente pois apresentou o maior consumo específico, cerca de 116% a mais que o método mais eficiente.

Outro fator importante ao faturamento da energia consumida de unidades consumidoras do grupo A, como é o caso da EEE 21, é a demanda ativa que a unidade requer em períodos de ponta e fora-ponta. Considerando isto, a Tabela 7 traz a demanda medida na EEE 21, durante o período dos ensaios de cada método.

Tabela 7 – Comparativo entre a demanda registrada de cada método de controle de nível de EEE ensaiado.

Método	Demanda Fora-Ponta (kW)	Demanda Ponta (kW)
Batelada	76,3	82,4
PID Tradicional	73,1	48,6
PID Otimizado	42,8	38,6

Fonte: Autoria Própria.

Apesar de no momento de execução dos testes, os dados indicarem que o método à batelada possui piores valores de demanda no horário de ponta, é normal que em dias chuvosos, com a invasão de água pluvial, o nível da elevatória suba rapidamente e a frequência de acionamento dos CMBs vá ao máximo, nos métodos que se utilizam do controlador PID. Por este motivo, entende-se que o método tradicional, cuja frequência máxima é de 60 Hz, apresentaria maior demanda registrada dentre os métodos testados.

A EEE 21, com modalidade tarifária verde, atualmente possui 110 kW de demanda contratada, devido ao antigo método de funcionamento baseado no método de controle de nível constante tradicional. Na antiga forma de acionar a elevatória, em dias de alta demanda da rede, aplicava-se a frequência máxima de 60 Hz em duas bombas, o que podia chegar a casa dos 115

kW de demanda medida (ultrapassando a demanda contratada) devido ao trancamento do CMB, ocasionado pelo o acúmulo de resíduos sólidos.

Da mesma forma que a alteração do método de controle de nível constante tradicional para o método otimizado implicaria na redução da frequência máxima de 60 Hz para 54 Hz, a demanda máxima da unidade, sob condições normais de funcionamento, seria reduzida de 95 kW para 70 kW, conforme os dados da Tabela 5. Logo, proporcionalmente, a demanda máxima da unidade considerando o trancamento do CMB, iria de 115 kW para 85 kW.

Assim, a mudança para o método de controle de nível constante otimizado, identificado como mais eficiente, poderia também acompanhar uma mudança na quantidade de demanda contratada para 90 kW, já admitindo uma folga para momentos de sobrecargas das CMBs. Fator este que só reforça a escolha do método de controle de nível otimizado, como o mais ideal para o funcionamento da unidade.

Com a identificação do controle de nível constante otimizado como o método de controle de EEEs mais eficiente, o SEMASA Itajaí optou por tar o método de controle por nível otimizado por um período completo de faturamento da concessionária durante o mês de julho de 2022.

7 CONCLUSÃO

No presente trabalho, procurou-se otimizar o consumo energético da EEE 21 ao determinar a forma de controle mais eficiente dentre as opções encontradas nas EEEs de Itajaí. O principal objetivo deste trabalho foi identificar qual método de controle de EEEs, entre três opções, possui a melhor relação de consumo de energia elétrica por metro cúbico bombeado (consumo específico).

De maneira geral, observou-se que os métodos de controle de nível que se utilizam de controladores PID para manter o nível constante possuem grandes ganhos em relação aos que apenas acionam os CMBs com velocidade de rotação fixa de forma descontínua, à bateladas.

Com a identificação e instalação do método mais eficiente de funcionamento na EEE 21, houve uma redução no consumo de energia elétrica da unidade, junto de uma redução na demanda registrada no período de teste e assim, promovendo uma redução de gasto com energia elétrica nesta unidade, como é possível observar na Tabela 8, no mês de julho.

Tabela 8 – Dados históricos da fatura de energia da EEE 21 de 2022.

Mês	Dias	Consumo (kWh)	Demanda (kW)	Valor (R\$)
Abril	31	41831	120,5	31.333,39
Mai	30	47433	109,22	31.019,59
Junho	31	43113	115,12	28.833,75
Julho	30	38111	84,49	20.783,57

Fonte: Autoria Própria.

Analisando o histórico de dados da fatura de energia elétrica da unidade sob teste, observa-se que após a implementação de controle otimizado na EEE 21 durante todo o mês de julho, houve uma redução de 23,38% de consumo e 26,50% da demanda medida em relação a média dos três meses anteriores. No que se trata no valor da fatura de energia, não é possível comparar em sua totalidade, principalmente considerando o valor adicional da bandeira de escassez hídrica inserida na fatura de abril.

A partir da utilização do consumo específico para comparar a eficiência da unidade em diferentes períodos, é possível analisar de forma mais coerente e atemporal o desempenho de sistemas de bombeamento, visto que o volume esgotado pelas EEEs varia significativamente em diferentes períodos do ano. Assim, comparando o consumo específico do histórico anual, percebe-se que após a implementação do método de controle otimizado na EEE 21 no mês de julho, a unidade diminuiu seu consumo específico em 18,82% em relação à média dos últimos 3 meses, representado na tabela 9.

Tabela 9 – Histórico de consumo específico da EEE21 em 2022.

Mês	Volume Bombeado (m ³)	Consumo (kWh)	Consumo Específico (m ³ /kWh)
Abril	288921	41831	0,145
Mai	309599	47433	0,153
Junho	291763	43113	0,148
Julho	280302	38111	0,121

Fonte: Autoria Própria.

Além da redução de custos a partir da diminuição do consumo, com um valor menor de demanda, promovido pela redução da frequência máxima de acionamento das motobombas, existe a possibilidade de reduzir ainda mais os gastos da unidade consumidora caso o consumidor opte por contratar um valor de demanda inferior ao atual.

Concluindo, é perceptível que dentro dos métodos de controle testados, a identificação do controle por nível constante otimizado como o forma de funcionamento mais eficiente, trouxe benefícios para a unidade consumidora testada, considerando que este estudo promoveu a substituição definitiva da forma de controlar a EEE 21.

Com os resultados propiciados pela alteração da forma de controle da EEE 21 de Itajaí/SC, o setor de manutenção eletromecânico do SEMASA Itajaí, já incluiu em seu planejamento estratégico a implementação da mesma metodologia de controle em outras elevatórias de esgoto. Inclusive, entre os requisitos para novos projetos de EEEs em Itajaí, já contam com a obrigatoriedade de utilizar conversores de frequência para o acionamento de CMBs.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

No âmbito da procura por variáveis que impactam na maior eficiência de sistemas de bombeamento, pouco se discute sobre a influência do nível de operação contínua de EEEs com poços úmidos, no rendimento das CMBs submersíveis. Sendo assim, sugere-se realizar a análise do impacto da alteração do *setpoint* de nível em EEEs com poços úmidos que operem a partir de controladores PID, para verificar se o aumento, ou a diminuição do nível de operação contínua promove menores valores de consumo específico.

Apesar do foco do estudo realizado ser em EEEs, muito do referencial teórico se compartilha com sistemas de bombeamento e pressurização de água, por esse motivo, sugere-se realizar o mesmo procedimento metodológico com Estações de Recalque de Água Tratada - ERAT - com o intuito de aumentar os níveis de eficiência das unidades consumidoras do setor de saneamento.

Referências

- ANEEL. **MÓDULO 1 – GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS DO PRODIST**. [S.l.], 2021. 29 p. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>>. Acesso em: 16 de setembro de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000**. [S.l.], 2021. 258 p. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>>. Acesso em: 24 de maio de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- ARANTO, N. **Competitor comparison: Variable Speed Drives in pumping applications**. Abril 2008. 132 p. Dissertação (Mestrado) — Lappeeranta University of Technology, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.
- ASSIS, G. V. de; ARMELIN, L. F. Avaliação da vazão escoada por meio da calha parshall (modelo armfield). **Revista DAE**, São Paulo, v. 69, p. 183–194, Abril 2021. Citado na página 24.
- ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Ranking ABES da universalização do saneamento**. [S.l.], 2021. 88 p. Disponível em: <https://abes-dn.org.br/?page_id=41939>. Acesso em: 14 de maio de 2022. Citado na página 3.
- CAPELLI, A. **Energia elétrica: qualidade e eficiência para aplicações industriais**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2013. 273 p. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- CELESC. **Informativo Celesc: tudo sobre a tarifa branca**. 2021. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/central-ajuda/tarifa-branca_2021.pdf>. Acesso em: 26 de maio de 2022. Citado na página 18.
- CIDADES, M. das. **Esgotamento sanitário: operação e manutenção de estações elevatórias de esgotos**. [S.l.], 2008. 48 p. Citado 4 vezes nas páginas 1, 5, 6 e 8.
- DUBEY, J. **Investigation of an energy efficient pump speed control algorithm for controlling sump level**. 52 p. Dissertação (Mestrado) — University of Delaware, 2018. Citado na página 1.
- EBARA. **Catálogo técnico bombas submersíveis: Modelos DL, DSC4 e DG**. [S.l.], 2021. 174 p. Disponível em: <<https://www.ebara.com.br/los-downloads>>. Acesso em: 31 de maio de 2022. Citado 3 vezes nas páginas 6, 7 e 28.
- FLYGT. **Variable speed wastewater pumping**. [S.l.], 2013. 12 p. Disponível em: <<https://www.xylem.com/siteassets/brand/flygt/flygt-resources/flygt-resources/variable-speed-wastewater-pumping-1894.pdf>>. Acesso em: 14 de maio de 2022. Citado 7 vezes nas páginas 11, 19, 28, 29, 30, 31 e 34.
- GOMES, H. P. **Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética**. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2009. 460 p. Citado 9 vezes nas páginas 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 19.
- GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. de. **Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética**. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2012. 189 p. Citado 3 vezes nas páginas 1, 14 e 17.

JÚNIOR, F. G. F. et al. Implementação de controladores pid utilizando lógica fuzzy e instrumentação industrial. **VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, São Luiz, p. 7, 2005. Citado na página 15.

MACHADO, J. R. M. **Otimização da malha de controle de uma estação elevatória de esgoto**. 70 p. — Universidade de Brasília, Brasília, 2020. Citado na página 15.

MONACHESI, M. G.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**: Manual prático. [S.l.], 2011. 103 p. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/ManualBombeamento.pdf>. Acesso em: 21 de maio de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

MOREIRA, J. R. S. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 481 p. Citado na página 16.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2014. 822 p. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

PETRUZELLA, F. D. **Programmable Logic Controllers**. 5. ed. [S.l.]: Editora McGraw Hill, 2016. 432 p. Citado na página 15.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de tarifação da energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2001. 44 p. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

RODRIGUES, W. **Crítérios para o Uso Eficiente de Inversores de Freqüência em Sistemas de Bombeamento de Água**". 237 p. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 1, 9, 10 e 14.

SEBASTIÃO, L. D. M. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de automação e controle para as estações elevatórias de esgoto do município de Criciúma/SC**. 103 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Citado 8 vezes nas páginas 1, 5, 6, 8, 9, 11, 13 e 27.

SIEMENS. **Closed-Loop Control with "PID Compact"V2.2**: Simatic s7-1500. [S.l.], 2017. 43 p. Disponível em: <<https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/79047707>>. Acesso em: 08 de agosto de 2022. Citado na página 15.