

MICHEL DA SILVA PEREIRA

Estudo de caso: diagnóstico energético do sistema de bombeamento de uma elevatória de recirculação de lodo ativado em uma estação de tratamento de esgotos

São Paulo
2022

MICHEL DA SILVA PEREIRA

Estudo de caso: diagnóstico energético do sistema de bombeamento de uma elevatória de recirculação de lodo ativado em uma estação de tratamento de esgotos

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia (PECE), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética

São Paulo
2022

MICHEL DA SILVA PEREIRA

Estudo de caso: diagnóstico energético do sistema de bombeamento de uma elevatória de recirculação de lodo ativado em uma estação de tratamento de esgotos

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia (PECE), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética

Área de Concentração:
Eficiência Energética

Orientador:
Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu

São Paulo
2022

Dedico este trabalho às pessoas que mais amo, meus pais, que sempre trabalharam e se dedicaram muito para me proporcionar uma boa educação, e minha esposa, companheira para compartilhar a vida, com quem encontro a felicidade.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família e amigos, por sempre me apoiarem nas minhas escolhas, e por compartilharem os momentos.

Agradeço ao professor Ivan Eduardo Chabu, por todos os ensinamentos, e por se apresentar tão humilde e prestativo na orientação do meu trabalho.

Agradeço ao time da empresa em que trabalho, pela troca de conhecimentos, experiências, convívio, sempre com muito aprendizado e respeito.

Agradeço também a todos os colegas e professores do PECE da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. As aulas foram interessantes e esclarecedoras, me fizeram questionar e pensar por outras perspectivas, e têm contribuído para minha evolução profissional e pessoal.

RESUMO

Este trabalho apresenta o diagnóstico energético de um sistema de bombeamento, a partir do estudo de caso de uma elevatória de recirculação de lodo ativado, em uma estação de tratamento de esgotos do estado de São Paulo. O diagnóstico energético consiste na proposição de um projeto de eficiência energética, e avaliação dos custos de implantação do projeto e dos benefícios esperados pela economia de energia. O objetivo é constatar se há viabilidade financeira na substituição dos equipamentos atuais do sistema de bombeamento por equipamentos novos mais eficientes, visando a otimização do uso de energia. Para o desenvolvimento do trabalho é realizado o estudo das condições físicas e operacionais atuais do sistema e proposta de substituição de equipamentos, por meio da comparação de dados e curvas de funcionamento dos equipamentos, medição da linha de base de consumo, consulta ao mercado, determinação da economia, estimativa dos custos e benefícios, e análise do investimento pelos métodos do “payback” simples, “payback” descontado, e valor presente líquido.

Palavras-chave: Diagnóstico energético. Eficiência energética. Sistema de bombeamento. Tratamento de esgotos.

ABSTRACT

This work presents a pumping system energy diagnosis, based on the case study of an activated sludge recycle unit, in a wastewater treatment plant in the state of São Paulo. The energy diagnosis consists in proposing an energy efficiency project, and evaluating the project implementation costs and the expected energy savings benefits. The objective is to verify if there is financial viability in the replacement of the current equipments of the pumping system for new ones, more efficient, aiming at the energy use optimization. For the work development, the study of the current physical and operational conditions of the system and an equipment replacement proposal are carried out, through the equipment data and operating curves comparison, baseline consumption measurement, market consultation, determination of savings, costs and benefits estimation, and investiment analysis by the methods of simple payback, discounted payback, and net present value.

Keywords: Energy diagnosis. Energy efficiency. Pumping system. Wastewater treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Função da ETE em um sistema de saneamento	16
Figura 2.2 - Diagrama típico e simplificado do processo secundário de tratamento por lodo ativado	18
Figura 2.3 - Sistema de bombeamento hidráulico típico e simplificado.....	19
Figura 2.4 - Bomba centrífuga, partes principais.....	20
Figura 2.5 - Partes principais do motor de indução	22
Figura 2.6 - Diagrama típico e simplificado de um conversor eletrônico de frequência	24
Figura 3.1 - Vista aérea da ETE em estudo	28
Figura 3.2 - Participação dos usos finais de energia elétrica	29
Figura 3.3 - Perfil de carga da ETE no dia 15/02/21 (em kW).....	29
Figura 3.4 - Elevatórias em estudo: ERL 1 e ERL 2.....	31
Figura 3.5 - Fluxograma básico da ERL 1 e ERL 2.....	32
Figura 3.6 - Foto das três bombas da ERL 1 e de um dos motores	33
Figura 3.7 - Diagrama elétrico em blocos da ERL 1 e ERL 2	35
Figura 3.8 - Desenho básico das características hidráulicas da ERL 1 e ERL 2, vista superior.....	36
Figura 3.9 - Distribuição das vazões registradas de 21 a 27/03/22 por faixa	38
Figura 3.10 - Curva característica da elevatória de recirculação de lodo, curvas do sistema e da bomba	39
Figura 3.11 - Fronteira de medição para determinação da economia	45
Figura 3.12 - Medidor de energia instalado para M&V do consumo específico da linha de base	47
Figura 3.13 - Configuração do medidor de energia	47
Figura 4.1 - Fluxo de caixa previsto para o projeto (cenário 1)	52
Figura 4.2 - Fluxo de caixa previsto para o projeto (cenário 2)	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Visão geral das opções do PIMVP	26
Tabela 3.1 - Equipamentos principais da ERL 1 e ERL 2	33
Tabela 3.2 - Resumo de dados de vazão da ERL 1 e ERL 2 de 21 a 27/03/22	38
Tabela 3.3 - Cálculo do rendimento global do sistema original	40
Tabela 3.4 - Resumo do projeto proposto e comparação do rendimento com sistema original	43
Tabela 4.1 - Resumo dos resultados.....	50
Tabela 4.2 - Resumo dos resultados da análise de viabilidade financeira (cenário 1)	52
Tabela 4.3 - Resumo dos resultados da análise de viabilidade financeira (cenário 2)	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADG	Adensador por gravidade
AEE	Ação de eficiência energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCO	Centro de controle operacional
DIG	Digestor
DML	Desaguamento mecânico de lodo
DN	Diâmetro nominal
DP	Decantador primário
DS	Decantador secundário
ERL	Elevatória de recirculação de lodo ativado
ESCO	<i>“Energy Services Company”</i>
ETE	Estação de tratamento de esgotos
EVO	<i>“Efficiency Valuation Organization”</i>
IHM	Interface homem máquina
kWh	quilowatt-hora
NPSH	<i>“net positive suction head”</i>
m ³ /s	metros cúbicos por segundo
mca	metros de coluna de água
mm	milímetros
M&V	Medição e Verificação
N	Newton
PIMVP	Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance
rpm	rotações por minuto
TA	Tanque de aeração
TE	Tarifa de energia
tep	tonelada equivalente de petróleo
TUSD	Tarifa de uso do sistema de distribuição
TWh	Terawatt-hora
VPL	Valor presente líquido
W	Watt

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Vazão
HMT	Altura manométrica total
P_h	Potência hidráulica
P_e	Potência elétrica
γ	Peso específico
η	Rendimento
η_G	Rendimento global
CE	Consumo específico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Contextualização e motivação.....	12
1.2 Objetivo	14
1.3 Metodologia.....	14
1.4 Estrutura do trabalho.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Saneamento	16
2.1.1 Estação de tratamento de esgoto.....	16
2.1.2 Tratamento de esgoto por lodo ativado	17
2.2 Sistema de bombeamento hidráulico	18
2.2.1 Bomba centrífuga	19
2.2.2 Motor de indução trifásico	21
2.2.3 Conversor de frequência	23
2.3 Eficiência energética	24
2.3.1 Eficiência energética em sistemas de bombeamento	24
2.3.2 Medição e verificação, determinação da economia.....	25
3 RESULTADOS	27
3.1 Estudo de caso – condição atual.....	27
3.1.1 Características da ETE em estudo	27
3.1.2 Características gerais da elevatória de recirculação de lodo ativado	30
3.1.3 Detalhamento de características físicas da elevatória	33
3.1.4 Detalhamento de características operacionais da elevatória	37
3.1.5 Estimativa do rendimento do sistema original	39
3.2 Estudo de caso – projeto de eficiência energética	41
3.2.1 Requisitos mínimos para o projeto	41
3.2.2 Projeto de eficiência energética proposto.....	42
3.3 Estratégia de medição e verificação da performance.....	44
3.3.1 Medição do consumo específico da linha de base	46
3.3.2 Cálculo do consumo específico esperado após a AEE	49
4 DISCUSSÃO	50
4.1 Resumo dos resultados.....	50

4.2 Análise de viabilidade financeira com mudança de cenários	51
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS.....	56
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES.....	59
APÊNDICE A – Planilha com dados da medição da linha de base.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e motivação

Conforme o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 – assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos – para que possamos atingir a Agenda 2030 no Brasil é necessário alcançar o acesso a saneamento e higiene adequados e equitativos para todos, além de melhorar a qualidade da água, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas (ONU, 2015). Portanto, a fim de atingir um desenvolvimento sustentável, torna-se necessária a ampliação do saneamento, tanto em termos de coleta como tratamento de esgotos. Contudo, ao ampliar esses serviços a demanda por energia também é aumentada.

Conforme o ODS 7 – assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos – para que possamos atingir a Agenda 2030 no Brasil é necessário dobrar a taxa global de melhoria de eficiência energética (ONU, 2015).

"No Brasil, a representatividade dos custos com energia se posiciona atualmente entre as três principais despesas das empresas de saneamento, chegando a representar até 30% dessas despesas operacionais. [...] Em 2014, as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento atingiram R\$ 3,5 bilhões, tendo sido consumidos 12,74 TWh. Esta quantidade equivale ao consumo doméstico anual de cerca de 22 milhões de habitantes no Brasil" (SNIS, 2018, p. 8 e 17). Considerando que o consumo de eletricidade no Brasil em 2014 foi de $45,8 \cdot 10^6$ tep (EPE, 2022), equivalente a 533 TWh, o consumo de energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento foi correspondente a 2,4% do consumo de energia elétrica do país.

Tendo em vista a necessidade de ampliação do saneamento e a melhoria de eficiência energética, torna-se indispensável o estudo e realização de diagnósticos energéticos e projetos que visem garantir a coleta e tratamento dos esgotos com um uso racional, sustentável e eficiente da energia, reduzindo perdas e otimizando o seu uso, sem degradação à qualidade do serviço.

Dado o contexto de ampliação do saneamento e otimização do uso de energia para se obter um desenvolvimento sustentável, o presente trabalho apresentará o

diagnóstico energético de um sistema de bombeamento, a partir do estudo de caso em uma elevatória de recirculação de lodo ativado (ERL) de uma estação de tratamento de esgotos (ETE). O diagnóstico energético contempla a avaliação de oportunidades de eficiência energética resultando em uma proposta de ação de eficiência energética, valor do investimento pra implantação do projeto, economia de energia relacionada, análise de viabilidade e estratégia de medição e verificação a ser adotada (ANEEL, 2021).

A ETE tem como função principal receber o esgoto coletado e devolver o efluente tratado para o recurso hídrico dentro de critérios e padrões pré-determinados em legislações específicas. Há diversos tipos e tecnologias possíveis de tratamento de esgotos. Na região metropolitana de São Paulo, o método utilizado nas ETEs de maior capacidade é o processo secundário de tratamento por lodo ativado (SABESP, 2022). Neste processo de tratamento, “a maior parte da energia elétrica é utilizada para: (1) tratamento biológico por lodos ativados, que requer energia para o acionamento de sopradores, [...] (2) sistemas de bombeamento para a transferência de efluentes, lodos líquidos, biossólidos e água de processo e (3) equipamentos para o processamento, o desaguamento e a secagem de resíduos e biossólidos” (METCALF; EDDY, 2016, p. 1773).

A ETE selecionada para o estudo de caso possui grande porte, está localizada no estado de São Paulo, com grande participação no sistema de tratamento de esgotos e no consumo de energia elétrica. Possui uma vazão média anual de 3 m³/s, atendendo uma área com população em torno de 1,4 milhão de habitantes, e consumo de energia elétrica em torno de 3,6 GWh por mês, equivalente ao consumo médio de 20 mil residências. As unidades com maior relevância no consumo de energia da ETE em questão são o sistema de aeração (sopradores), a elevatória de esgoto bruto, e a elevatória de recirculação de lodo ativado. O sistema de aeração da ETE em estudo passará por reformas e modernizações, com projeto já definido. Na elevatória de esgoto bruto recentemente foi implantado projeto de eficiência energética contemplando substituição de conjunto motobomba e conversor eletrônico de frequência. Já a elevatória de recirculação de lodo ativado não possui intervenções previstas, e apresenta equipamentos em final de vida útil, com possibilidade de substituição, e oportunidade de otimização do uso de energia. Dado este cenário, a unidade selecionada para o estudo de caso é a elevatória de recirculação de lodo ativado.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é, através de estudo de caso, avaliar oportunidades de otimização do uso de energia e propor uma ação, um projeto de eficiência energética, por meio da substituição de equipamentos atuais do sistema de bombeamento da ERL da ETE em estudo por equipamentos novos mais eficientes, e realizar a análise do investimento em termos de viabilidade financeira, considerando os custos estimados de implantação do projeto e o benefício obtido pela economia de energia. Também é objetivo do trabalho compartilhar métodos e resultados, de modo a contribuir para que outras oportunidades de melhoria da eficiência energética sejam avaliadas no setor de saneamento.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho, referente ao diagnóstico energético do sistema de bombeamento da elevatória de recirculação de lodo ativado da ETE em avaliação, foi utilizado como metodologia o estudo de caso da condição atual do sistema em termos físicos, operacionais e energéticos; a proposição de projeto de eficiência energética a partir de consulta ao mercado; a definição da estratégia de medição e verificação para determinação da economia; e a discussão dos resultados em termos de viabilidade financeira do projeto.

O estudo da condição atual foi realizado por meio de entrevistas com operadores e mantenedores do sistema, levantamento de dados dos equipamentos mecânicos e elétricos, curvas do sistema e de funcionamento das bombas, condição hidráulica (tubulações, altura manométrica total, vazões), folha de dados dos fabricantes dos equipamentos, rotina operacional de funcionamento.

Para o projeto de eficiência energética, tendo os dados e resultados da condição atual, foi consultado o mercado, para elaboração de proposta de substituição de equipamentos, visando a otimização do uso de energia, com estimativa do investimento para o fornecimento e instalação dos mesmos. Também foi definida a estratégia medição e verificação para determinação da economia e medição da linha de base de consumo.

A discussão foi realizada com base nos resultados obtidos e na análise de viabilidade financeira da ação de eficiência energética proposta, com variação de

cenários, utilizando-se da estimativa do investimento para implantação do projeto, obtida via consulta ao mercado, e dos benefícios, obtidos via determinação da economia de energia esperada após implementação da AEE. A economia de energia foi determinada conforme estratégia de medição e verificação definida e calculada pela comparação da medição da linha de base de consumo com os dados de fabricante dos equipamentos sugeridos para o projeto. A análise do investimento foi realizada pelos métodos do “payback” simples, “payback” descontado, e valor presente líquido.

1.4 Estrutura do trabalho

O capítulo 1 apresenta a introdução, com contextualização e motivação, mostrando a relevância tanto da ampliação do saneamento quanto da melhoria da eficiência energética, além do objetivo e metodologia do trabalho. No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, a conceituação básica sobre saneamento, sistemas de bombeamento e eficiência energética. O capítulo 3 traz os resultados, com o estudo da condição atual do sistema, proposição de projeto de eficiência energética e estratégia de medição e verificação da performance. No capítulo 4 é realizada a discussão dos resultados, com a análise do investimento para implantação do projeto proposto em termos de viabilidade financeira, considerando a estimativa de custo para implantação e o benefício obtido pela economia de energia. Finalmente, o capítulo 5 traz as conclusões finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Saneamento

O saneamento compreende medidas para manter ou transformar o meio ambiente com o objetivo de se obter condições adequadas para a saúde humana, com melhoria da qualidade de vida da população e prevenção de doenças.

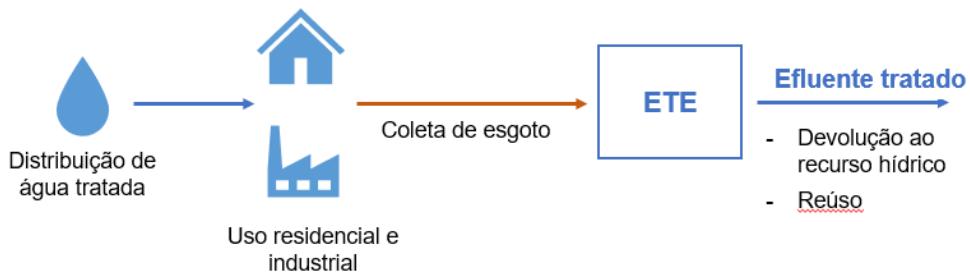
Conforme a Lei nº 14.026 (BRASIL, 2020), saneamento básico é o conjunto de instalações operacionais, infraestruturas e serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos; drenagem e manejo das águas pluviais urbanas; abastecimento de água potável; e esgotamento sanitário contemplando a coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados aos esgotos sanitários.

2.1.1 Estação de tratamento de esgoto

Esgoto é a água de abastecimento residual obtida após o uso em diversas aplicações, podendo ser de origem residencial ou industrial. Devido à sua composição, compreendendo por exemplo organismos patogênicos, não sendo tratado é impróprio para reúso, e deve ser afastado da população para prevenir doenças e garantir a saúde pública.

O tratamento de esgoto tem como objetivo a remoção de compostos do esgoto de forma que o efluente tratado possa retornar ao meio ambiente ou ser reutilizado com segurança. A instalação operacional responsável pelo tratamento de esgoto é denominada ETE. A Figura 2.1 apresenta um diagrama simplificado da função da ETE no contexto de um sistema de saneamento.

Figura 2.1 - Função da ETE em um sistema de saneamento



Fonte: Autor (2022)

Portanto, a ETE tem função essencial para proteção da saúde humana e ambiental por meio da remoção de constituintes nocivos do esgoto, e com a possibilidade de reúso do efluente tratado em aplicações diversas ganha aspecto de relevância também para a preservação da água potável.

Há diferentes métodos de tratamento, assim como instalações de diferentes portes, e requisitos de qualidade para o efluente tratado mais ou menos restritivos. A ETE pode possuir processos físicos, químicos, biológicos, a fim de se atingir o nível de remoção e os parâmetros requeridos para o efluente. Estes processos podem ser agrupados e classificados em três níveis de tratamento: primário, secundário e terciário. Antes de se iniciar o tratamento de fato, usualmente há também o nível preliminar, responsável por remover resíduos sólidos grosseiros e areia, respectivamente em sistemas de gradeamento e caixas de areia, de forma a preparar o esgoto para que o mesmo não provoque problemas operacionais ou de manutenção aos equipamentos e processos dos sistemas posteriores de tratamento.

O tratamento primário tem a função de remoção de parte de sólidos suspensos e matéria orgânica do esgoto, sendo usualmente constituído por processos físicos, como exemplo a sedimentação. O tratamento secundário é responsável pela remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica biodegradável solúvel ou em suspensão, usualmente por meio de processos químicos e biológicos. O tratamento terciário tem a função de remoção de sólidos suspensos residuais não removidos no tratamento secundário.

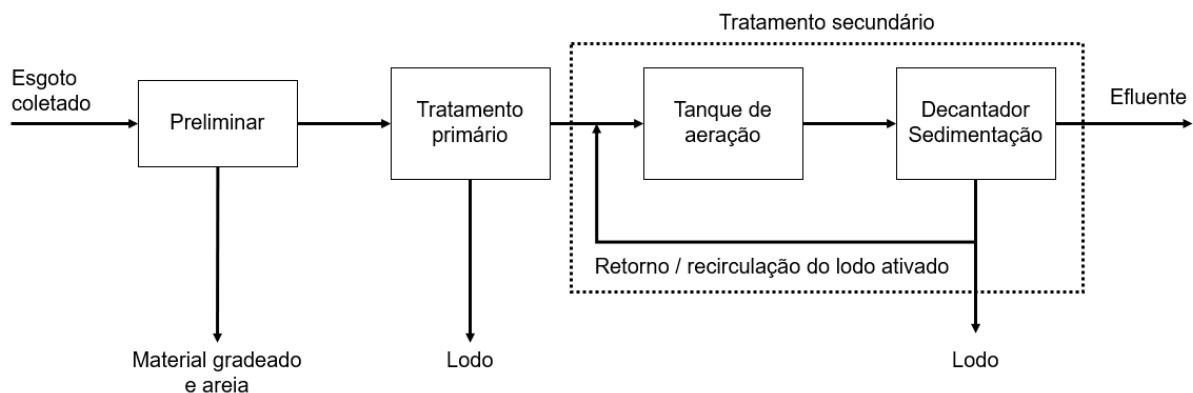
2.1.2 Tratamento de esgoto por lodo ativado

Na região metropolitana de São Paulo, o método utilizado nas ETEs de maior capacidade é o processo secundário de tratamento por lodo ativado (SABESP, 2022).

O tratamento por lodo ativado é um processo biológico que se utiliza de micro-organismos, principalmente bactérias, para oxidar a matéria orgânica (solúvel ou em suspensão) em produtos com peso específico superior ao da água, o que possibilita a sua remoção por sedimentação. Tipicamente, o tratamento por lodo ativado possui um tanque de aeração, onde há a mistura e a aeração do esgoto afluente, além do desenvolvimento do processo de oxidação. Em seguida, há um processo físico de sedimentação, usualmente são utilizadas unidades denominadas decantadores secundários. Nesta unidade, a biomassa é sedimentada e por possuir micro-

organismos ativos é denominada lodo ativado. Grande parte do lodo ativado retorna ao tanque de aeração para manter os micro-organismos e a biodegradação da carga orgânica afluente ao tanque de aeração, enquanto outra porção é descartada para se evitar o acúmulo de lodo de modo que o mesmo não seja incorporado ao efluente tratado. A Figura 2.2 apresenta o diagrama típico e simplificado de uma ETE com tratamento secundário por lodo ativado.

Figura 2.2 - Diagrama típico e simplificado do processo secundário de tratamento por lodo ativado



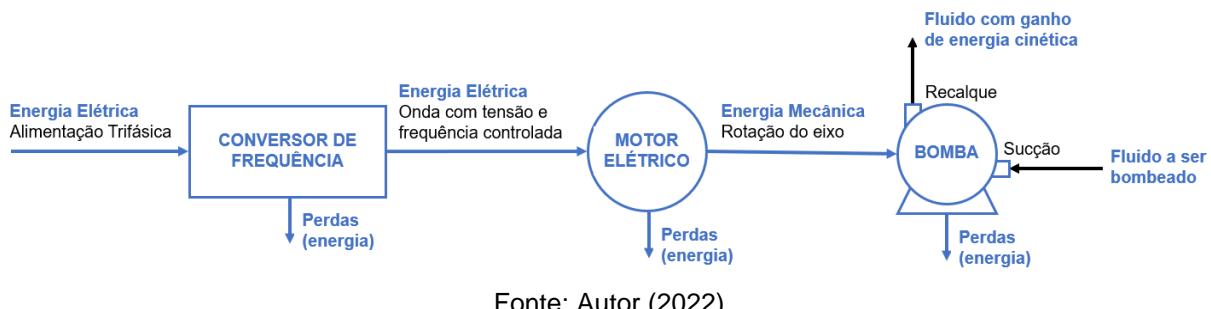
Fonte: Autor (2022)

É denominada taxa de recirculação a proporção da vazão de lodo ativado que retorna para o afluente do tanque de aeração em relação à vazão de esgoto afluente ao tratamento secundário.

2.2 Sistema de bombeamento hidráulico

Um sistema de bombeamento hidráulico tem como objetivo possibilitar o transporte, o deslocamento de um fluido fornecendo energia para o mesmo. O sistema avaliado neste estudo de caso é constituído por bomba centrífuga, responsável por converter energia mecânica em energia cinética para o fluido; motor elétrico, responsável por converter energia elétrica em energia mecânica para o eixo da bomba; e conversor de frequência, dispositivo eletrônico que aciona o motor elétrico e é capaz de controlar a velocidade de rotação do mesmo. A Figura 2.3 apresenta um diagrama simplificado de um sistema de bombeamento hidráulico típico.

Figura 2.3 - Sistema de bombeamento hidráulico típico e simplificado



Fonte: Autor (2022)

2.2.1 Bomba centrífuga

Bomba centrífuga é um tipo de turbobomba. Seus sistemas principais são: a parte móvel, constituída pelo rotor, eixo e acoplamento ao motor, sendo denominado também de conjunto girante; e a parte fixa, constituída por carcaça, e seções de entrada (sucção) e saída (recalque).

A parte móvel é responsável por receber a energia mecânica do motor, pela rotação do eixo acoplado, e converter para energia cinética ao fluido a ser bombeado. O rotor, acoplado ao motor pelo eixo de rotação, é constituído por palhetas ou lâminas, por entre as quais o fluido escoa. O rotor gira rapidamente, convertendo a energia mecânica em cinética. É gerada uma zona de alta pressão na periferia e uma zona de baixa pressão no centro, a qual faz com que o líquido seja succionado até a bomba, aumentando o fluxo deste pela entrada do equipamento (PROPEQ, 2022).

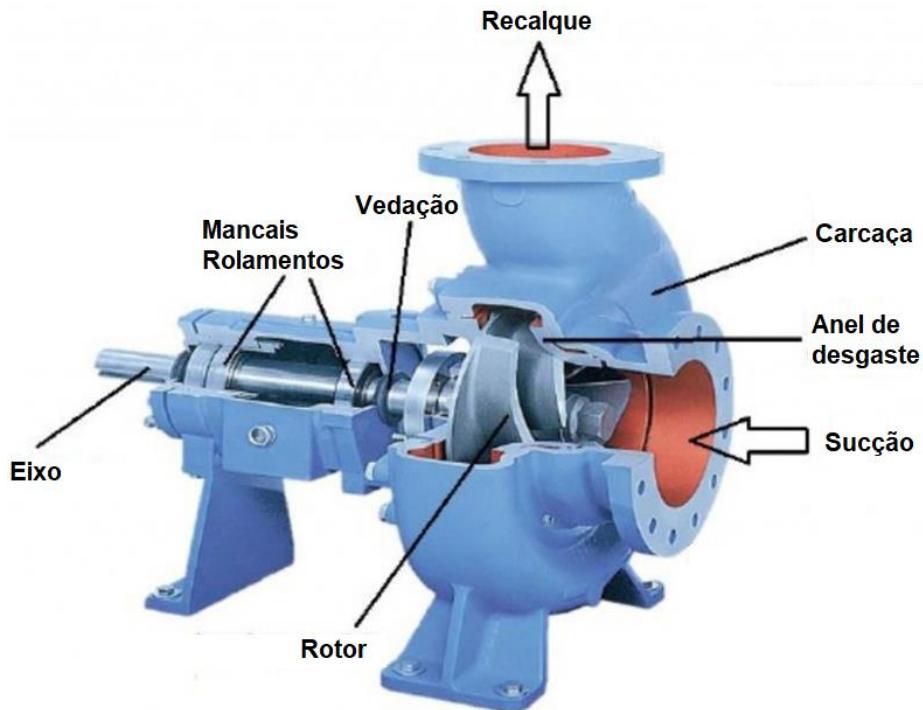
A parte fixa tem a função de direcionar o fluxo do fluido. A carcaça pode ser do tipo voluta ou difusor. No tipo voluta há um canal com bocal de área continuamente crescente, em forma de espiral. Já a carcaça com difusor possui aletas estacionárias que fornecem ao fluido um canal de área crescente (PROPEQ, 2022). Ambos tipos de carcaça têm funcionamento semelhante e, conforme o teorema de *Bernoulli* e a equação de continuidade, proporcionam a redução de velocidade do fluido que por ele escoa e consequentemente aumento da pressão na saída da carcaça.

Outros componentes que valem ressaltar são os mancais, a vedação, e o anel de desgaste. O mancal é um elemento mecânico de apoio fixo para elementos girantes como eixos. Há dois tipos principais de mancais, os de deslizamento (ou de bucha) e os de rolamento (rotativos). As bombas possuem pelo menos dois mancais para suporte do eixo rotativo. No espaço físico entre o meio onde há o fluxo do fluido e a parte interna do eixo e mancais, é necessário haver uma vedação, para evitar que

o líquido possa chegar à parte interna e causar danos ao equipamento mecânico. Esta vedação pode ser realizada por gaxetas, que são cordões de material flexível e que periodicamente necessitam ajuste ou substituição devido ao desgaste; ou selos mecânicos, que são estanque sem possibilidade de ajuste. Os anéis de desgaste são componentes utilizados para a evitar a substituição completa de partes que ficam em contato direto sofrendo atrito devido ao giro do rotor. Sempre que o desgaste atingir valores próximos ao limite estabelecido pelo fabricante os mesmos devem ser trocados.

A Figura 2.4 apresenta a ilustração de uma bomba centrífuga com a indicação das partes principais supracitadas.

Figura 2.4 - Bomba centrífuga, partes principais



Fonte: Adaptado de VARGAS (2022)

Com relação aos rotores, as bombas podem ser classificadas quanto ao tipo de rotor, podendo ser aberto, semi-aberto ou fechado; e quanto ao número de rotores, podendo ser monoestágio ou multiestágio. Usualmente, para a aplicação tendo como fluido o esgoto, devido à presença de sólidos em suspensão, é utilizado o rotor aberto ou semi-aberto, de modo que os sólidos não obstruam o fluxo. Bombas monoestágio possuem somente um rotor enquanto multiestágio possuem mais de um rotor, para aplicações em que é exigida uma pressão mais elevada.

As bombas centrífugas são classificadas também de acordo com a direção do fluxo do fluido bombeado em relação ao eixo de rotação. Desta forma, podem ser agrupadas como bombas centrífugas radiais, nas quais a direção do fluxo é perpendicular ao eixo de rotação; helicoidas, nas quais a direção do fluxo forma um ângulo menor que 90 graus em relação ao eixo; e axiais, quando a direção do fluxo é a mesma do eixo de rotação.

Para selecionar uma bomba adequada ao sistema, alguns dos parâmetros principais a serem avaliados são: vazão (Q), altura manométrica total (HMT), “*net positive suction head*” (NPSH), rotação, tipo de fluido a ser bombeado, espaço físico, tubulações disponíveis, além de avaliar as curvas do sistema e da bomba e a intersecção entre as mesmas.

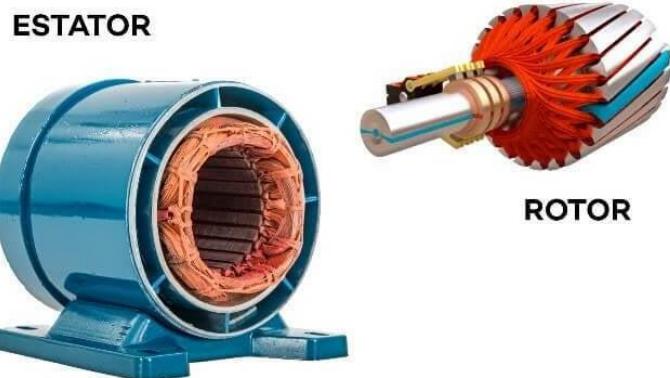
A altura manométrica total corresponde à pressão que a bomba deve vencer para realizar o trabalho de transporte do fluido em determinada vazão e rotação, compreendendo o desnível geométrico e perdas de carga. Considerando um sistema em funcionamento, é obtida pela medição da pressão no recalque da bomba subtraída da medição de pressão na sucção.

O NPSH da bomba é a carga mínima em que o fluido deve chegar à sucção da bomba para possibilitar o recalque. Caso a pressão na sucção seja inferior ao NPSH pode ocorrer cavitação, fenômeno decorrente de implosões de bolhas (cavas) de vapor que causam ruído intenso, desgaste de material na superfície do rotor, vibração e perda de rendimento (MONACHESI, 2022).

2.2.2 Motor de indução trifásico

O motor é um dispositivo de conversão eletromecânica responsável por converter a energia elétrica da entrada em energia mecânica para o eixo. Portanto, envolve a troca de energia entre um sistema elétrico e um mecânico, sendo as grandezas fundamentais do sistema mecânico torque e velocidade, enquanto as grandezas fundamentais elétricas são, analogamente, corrente e tensão. O motor possui duas partes principais: o rotor, componente móvel rotativo; e o estator; componente fisicamente fixo, conforme apresentado na Figura 2.5. O acoplamento entre os sistemas elétrico e mecânico é realizado via campo magnético.

Figura 2.5 - Partes principais do motor de indução



Fonte: NEOCHARGE (2022)

O motor de indução trifásico é “uma das máquinas mais robustas e mais amplamente usadas na indústria” (DEL TORO, 1999, p. 116).

Seu estator é formado por chapas de material ferromagnético que formam o núcleo magnético do estator, sendo que a superfície interna possui ranhuras que acomodam os enrolamentos onde é injetada a tensão trifásica. As correntes que circulam por estes enrolamentos, denominadas correntes de magnetização, criam um campo magnético girante chamado de campo rotativo, com velocidade dependente da frequência das correntes de magnetização e do número de polos com o qual o enrolamento do estator foi construído. A velocidade deste campo é denominada velocidade síncrona.

O rotor também é constituído por material ferromagnético com ranhuras que acomodam enrolamentos, porém conforme a configuração destes enrolamentos o motor pode ser classificado como motor de indução com rotor de gaiola (ou em curto) ou motor com rotor bobinado (ou de anéis, ou enrolado).

O rotor bobinado possui enrolamentos isolados que podem ser acessados externamente. Como o rotor tem movimento de giro, os enrolamentos são conectados a terminais fixos externos por meio de escovas e anéis coletores. Esta configuração possibilita conexão de resistência trifásica externa visando o controle de velocidade.

Já o rotor de gaiola possui enrolamentos curto circuitados no próprio rotor, sem conexão a terminais externos. Trata-se de uma construção mais simples, mais econômica e mais robusta, sem necessidade de escovas e anéis coletores. Apesar desta configuração não possibilitar a conexão de resistor trifásico externo nos enrolamentos do rotor, o controle de velocidade pode ser obtido por meio da alteração

da frequência ou tensão da alimentação elétrica conectada aos enrolamentos do estator, afetando consequentemente o campo rotativo, o que atualmente é possível em grande parte das aplicações com o uso de conversores eletrônicos de frequência, o que contribuiu para que estes motores sejam os mais usados na indústria. “O campo girante produzido pelo enrolamento do estator corta os condutores do rotor, desta forma induzindo tensões. [...] As tensões induzidas fazem com que correntes circulem, as quais, por sua vez, reagem com o campo para produzir um torque magnético – e, desta forma, resulta a ação motora” (DEL TORO, 1999, p. 116).

Em condições normais, a fonte de energia elétrica é conectada somente ao enrolamento do estator do motor de indução trifásico. A corrente que circula no enrolamento do rotor é resultante da indução. Diante deste fato, os motores de indução são classificados como máquinas com excitação única. Esta característica também resulta que o motor de indução é capaz de produzir torque a qualquer velocidade abaixo da velocidade síncrona, mas nunca igual. Em velocidade superior à síncrona, situação em que o rotor deve ser levado por meios externos, a máquina passa a operar no modo de gerador assíncrono. Por esta razão, o motor de indução é classificado como uma máquina assíncrona. A diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor é denominada escorregamento.

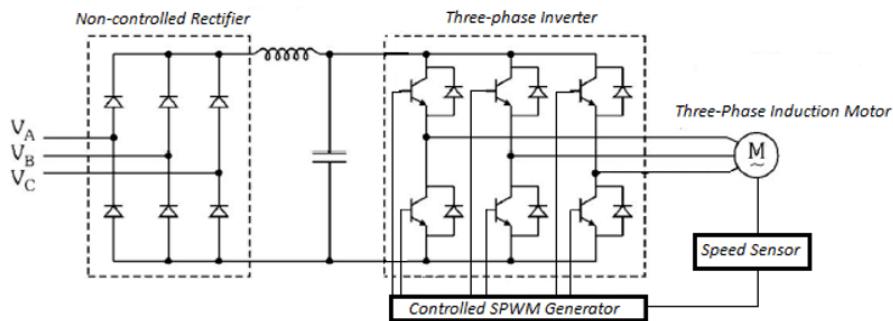
2.2.3 Conversor de frequência

O conversor de frequência é um dispositivo eletrônico que possibilita, a partir de uma tensão trifásica fixa na sua entrada, produzir em sua saída tensão e frequência trifásicas variáveis e controladas.

O conversor é capaz de realizar esta função por meio circuitos internos que podemos dividir em dois estágios principais: o retificador, responsável por converter o sinal de entrada alternado em corrente contínua; e o inversor, capaz de produzir, a partir da tensão retificada e filtrada no primeiro estágio, um sinal em corrente alternada com frequência e tensão controlada. Vale destacar também o circuito de controle, responsável por monitorar variáveis como tensão, frequência, rotação, e controlar o estágio inversor a fim de se obter a velocidade desejada na saída.

A Figura 2.6 apresenta o diagrama típico e simplificado de um conversor eletrônico de frequência e sua conexão a um motor de indução trifásico.

Figura 2.6 - Diagrama típico e simplificado de um conversor eletrônico de frequência



Fonte: FRANCHI, 2013 apud MENDONÇA, 2021

2.3 Eficiência energética

“Podem-se definir como ações de eficiência energética toda e qualquer ação que promova a redução do consumo de energia, mantendo-se o mesmo nível de serviço prestado. Pode-se afirmar que as ações para o aumento da eficiência energética promovem aumentos na razão entre o nível de energia produzida e o nível de energia consumida.” (SIMÕES MOREIRA, 2019, p. 307)

Portanto, considerando a lei da conservação de energia, em que a quantidade de energia total em um sistema físico isolado permanece constante, com a eficiência energética obtemos um melhor aproveitamento da energia utilizada por meio da redução relativa das perdas inerentes ao processo de conversão da energia de entrada para a energia de saída útil de um sistema. Por exemplo, em um sistema de bombeamento composto por conversor de frequência, motor elétrico e bomba, a energia de entrada consiste na energia elétrica consumida na entrada do conversor, e a energia de saída útil consiste na energia cinética convertida para o fluido.

2.3.1 Eficiência energética em sistemas de bombeamento

De acordo com Monachesi (2005), algumas das estratégias para se otimizar o custo com o uso da energia elétrica no funcionamento dos motores que impulsionam as bombas são a utilização de instalações adequadas do ponto de vista hidráulico, contemplando tubulações com diâmetros bem dimensionados e em bom estado de conservação quanto à rugosidade interna (reduz as perdas de carga), variação da velocidade dos motores considerando os pontos de funcionamento da bomba com rendimento máximo, selecionar conjuntos motobomba com melhor rendimento para o

ponto de trabalho desejado, e evitar ou reduzir o consumo energético nas horas de ponta (apesar de não reduzir quantitativamente o consumo de energia, reduz o custo considerando modalidade tarifária com hora ponta diferenciada). Um indicador de eficiência usualmente utilizado para sistemas de bombeamento é o kWh/m³, que relaciona o consumo de energia elétrica do conjunto em determinado período pelo volume bombeado no mesmo período. É um indicador útil para o acompanhamento de séries temporais de determinada elevatória ou sistema, porém não muito útil para comparação entre sistemas de características físicas diferentes tendo em vista que não considera a altura manométrica total do sistema.

2.3.2 Medição e verificação, determinação da economia

Não é possível medir de forma direta a economia de energia, tendo em vista que é caracterizada por uma redução, uma ausência de consumo. Portanto, se faz necessário o estudo de método para avaliação do desempenho energético. Este estudo deve ser elaborado antes da implantação da ação de eficiência energética (AEE), e considerar formas de determinar a economia, assim como o custo e a exatidão correspondentes.

O Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP), publicado pela “*Efficiency Valuation Organization*” (EVO), “documenta termos comuns e métodos para avaliar o desempenho energético de projetos de eficiência [...]. Alguns destes termos e métodos podem ser utilizados em contratos” (EVO, 2012, p. 1).

Conforme o PIMVP, a economia de energia é determinada pela comparação do consumo medido antes, denominado linha de base, e depois da implantação de um projeto, considerando eventuais ajustes decorrentes de alterações das condições, como por exemplo aumento de produção. É dado o nome de medição e verificação (M&V) para este processo, que visa determinar a economia real de modo seguro, com confiabilidade dos resultados. Em projetos de eficiência energética onde há poucas dúvidas sobre os resultados que serão obtidos, ou quando não há necessidade de comprovação dos resultados, podem ser dispensadas as medições e o processo de M&V.

O PIMVP estabelece opções para o processo de M&V, cada opção possui características diferentes de medição e cálculo da economia da AEE, que se adequam a diferentes tipos de projetos, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Visão geral das opções do PIMVP

Opção do PIMVP	Como calcular a economia	Aplicações típicas
A. Medição Isolada da AEE Medição dos parâmetros-chave Medições no campo dos parâmetros-chave. Estes parâmetros definem o uso de energia pelo sistema afetado pela AEE. Os parâmetros não selecionados para medição no campo são estimados.	Cálculo de engenharia do consumo da linha de base e do período de determinação da economia a partir de: <ul style="list-style-type: none"> • Medições a curto prazo ou contínuas; • Valores estimados. 	A AEE da iluminação onde a potência requerida é o parâmetro-chave de desempenho energético, medido periodicamente. Estimas as horas de funcionamento da iluminação com base nos horários do edifício e no comportamento dos ocupantes.
B. Medição Isolada da AEE Medição de todos parâmetros Medição no campo do consumo de energia do sistema afetado pela AEE.	Medições a curto prazo ou contínuas do consumo da linha de base e do período de determinação da economia, e/ou cálculos de engenharia.	Aplicação de variador de velocidade ajustável e controle de motor para ajustar o fluxo da bomba. Medir a potência elétrica com um medidor de kW instalado na alimentação elétrica do motor.
C. Toda a instalação Medição do consumo de energia em nível de toda a instalação ou sub instalação.	Análise dos dados do medidor da linha de base de toda a instalação e do período de determinação da economia.	Programa de gestão de energia multifacetado, afetando muitos sistemas em uma instalação.
D. Simulação calibrada Simulação do consumo de energia de toda a instalação, ou de uma sub instalação.	Simulação do consumo de energia, calibrada com dados de faturamento por hora ou mensal da concessionária.	Programa de gestão de energia multifacetado, afetando muitos sistemas em uma instalação, onde não existia nenhum medidor no período da linha de base.

Fonte: Adaptado de EVO (2012)

O PIMVP também estabelece o conceito de fronteira de medição, uma “fronteira virtual estabelecida à volta dos equipamentos e/ou sistemas para separar aqueles que são relevantes para a determinação da economia daqueles que não o são. Todos os consumos de energia do equipamento ou dos sistemas dentro da fronteira de medição devem ser medidos ou estimados” (EVO, 2012, p. 60).

3 RESULTADOS

3.1 Estudo de caso – condição atual

3.1.1 Características da ETE em estudo

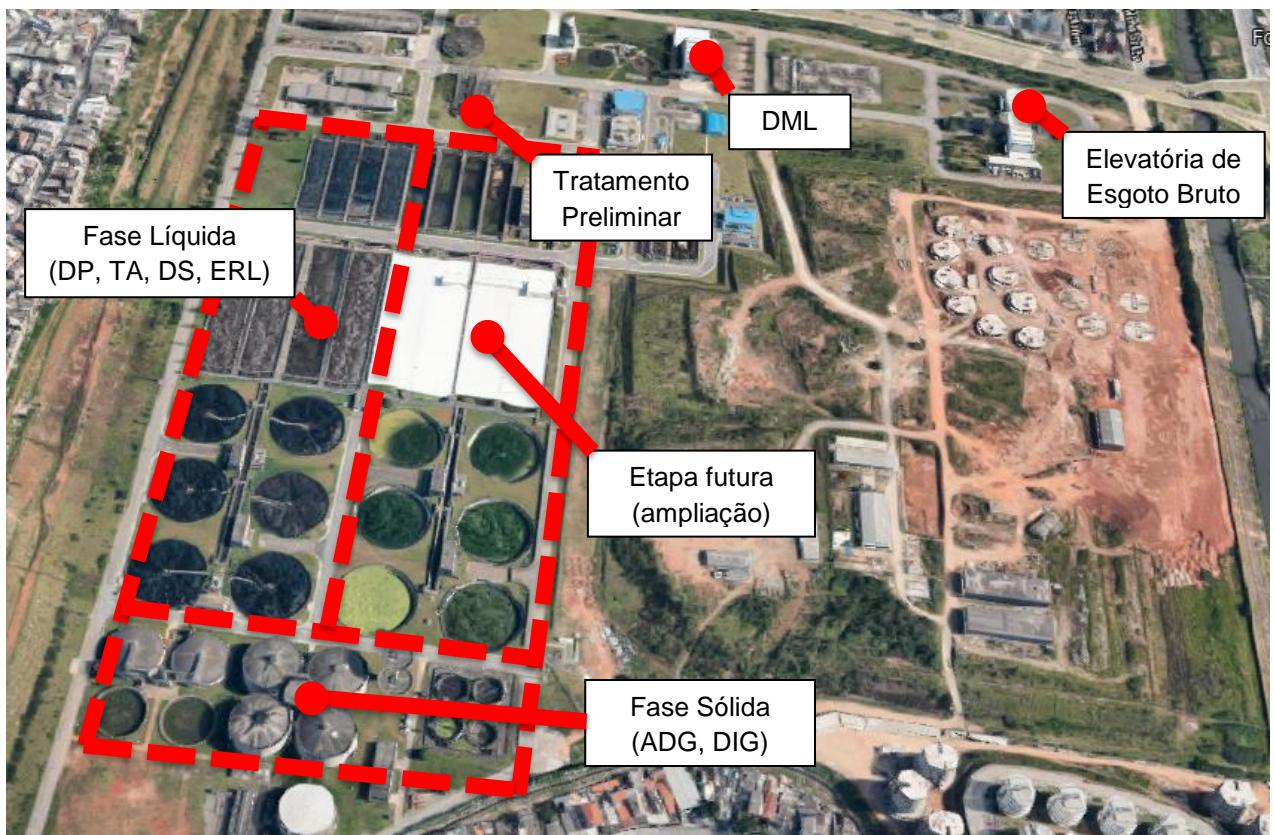
A ETE em estudo possui tratamento de esgotos por lodo ativado, com uma vazão afluente média de 3 m³/s. Há basicamente duas fases distintas de tratamento, a líquida e a sólida. A fase líquida é caracterizada por receber o esgoto bruto, remover sólidos e carga orgânica para se obter o efluente tratado líquido. Parte é devolvida para o recurso hídrico e outra parte é utilizado como água de reuso. Nesta fase, há basicamente o tratamento preliminar, responsável por remover sólidos grosseiros, com o uso, por exemplo, de sistemas de gradeamento e caixas de areia. Em seguida há o tratamento primário, que realiza a remoção de matéria orgânica por sedimentação, através de estruturas chamadas de decantadores primários (DP). Após os tratamentos preliminar e primário, ambos processos físicos, há o tratamento secundário, correspondente ao processo biológico de degradação da matéria orgânica. A matéria orgânica é degradada em meio aeróbio, em grandes estruturas chamadas tanques de aeração (TA). A matéria degradada é retirada nos decantadores secundários (DS). Grande parte da matéria orgânica retirada é enviada para o afluente do tanque de aeração (recirculação), tendo em vista que esta possui grande quantidade de microrganismos responsáveis por acelerar o processo biológico, sendo chamada de “lodo ativado”. A unidade responsável por realizar a recirculação é a elevatória de recirculação de lodo ativado (ERL). O efluente dos decantadores secundários corresponde ao efluente tratado.

Já a fase sólida é responsável por realizar o tratamento da matéria orgânica retirada do esgoto na fase líquida. A matéria orgânica removida também é chamada de lodo, sendo dividido em lodo primário (removido pelos decantadores primários) e lodo secundário ou biológico (removido pelos decantadores secundários). O tratamento do lodo é necessário tendo em vista que para o descarte do mesmo, em aterro sanitário por exemplo, é preciso atender requisitos de teor mínimo de sólidos e estabilização para reduzir a concentração de patógenos. Na fase sólida, o lodo é encaminhado primeiramente para adensadores por gravidade (ADG), estruturas responsáveis por aumentar a concentração de sólidos do lodo removendo líquido. Em

seguida, é enviado para digestores (DIG), que realizam a degradação da matéria orgânica em meio anaeróbio, produzindo biogás neste processo. Após a digestão anaeróbia, o lodo chega a sistemas de desaguamento mecânico de lodo (DML), no caso filtros-prensa, que possuem a função de aumentar a concentração de sólidos para que o lodo possa ser descartado nas condições requeridas.

A Figura 3.1 apresenta a vista aérea da ETE assim como a indicação da localização das etapas principais.

Figura 3.1 - Vista aérea da ETE em estudo

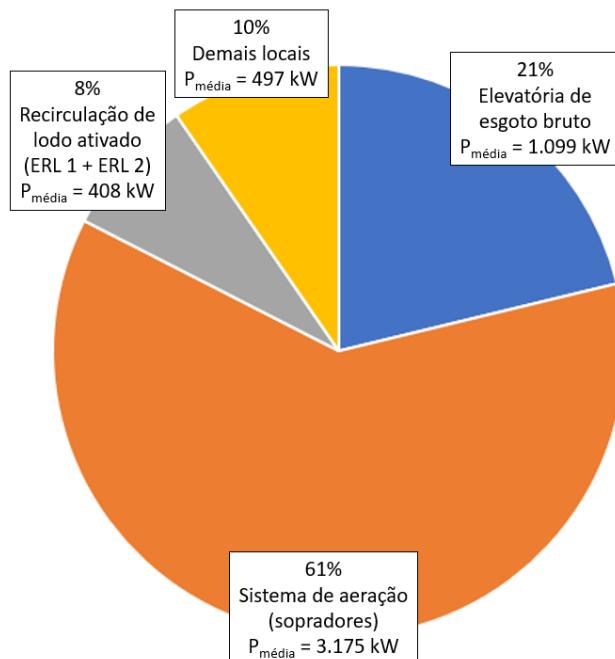


Fonte: Autor (2022)

A ETE possui uma alta demanda por energia elétrica, sendo os maiores usos no sistema de aeração (sopradores que criam ambientes aeróbios para degradação da matéria orgânica nos tanques de aeração), na elevatória de esgoto bruto (sistema de bombeamento que transporta o esgoto bruto do poço de chegada para o início do tratamento), e na recirculação do lodo ativado (sistema de bombeamento que retorna o lodo ativado para o tanque de aeração para acelerar a degradação da matéria orgânica). O gráfico apresentado na Figura 3.2 demonstra a participação destas

unidades no consumo total de energia elétrica da ETE, assim como a demanda ativa média, obtida mediante medições no período de 1 a 15 de fevereiro de 2021.

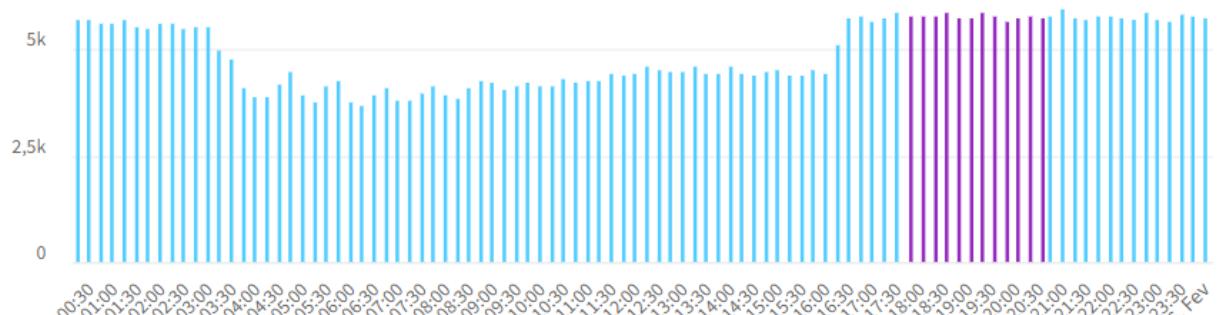
Figura 3.2 - Participação dos usos finais de energia elétrica



Fonte: Autor (2022)

A Figura 3.3 apresenta o perfil de carga da ETE, em kW, no dia 15 de fevereiro de 2021. Percebe-se que a instalação tem um comportamento de consumo de energia elétrica variável ao longo do dia. Isto se deve à variação de vazão de esgoto afluente, o que impacta a potência elétrica demanda por diversas unidades, como os sopradores e a elevatória de esgoto bruto. No entanto, também há unidades com consumo praticamente constante ao longo do dia. Este é o caso da elevatória de recirculação de lodo ativado.

Figura 3.3 - Perfil de carga da ETE no dia 15/02/21 (em kW)



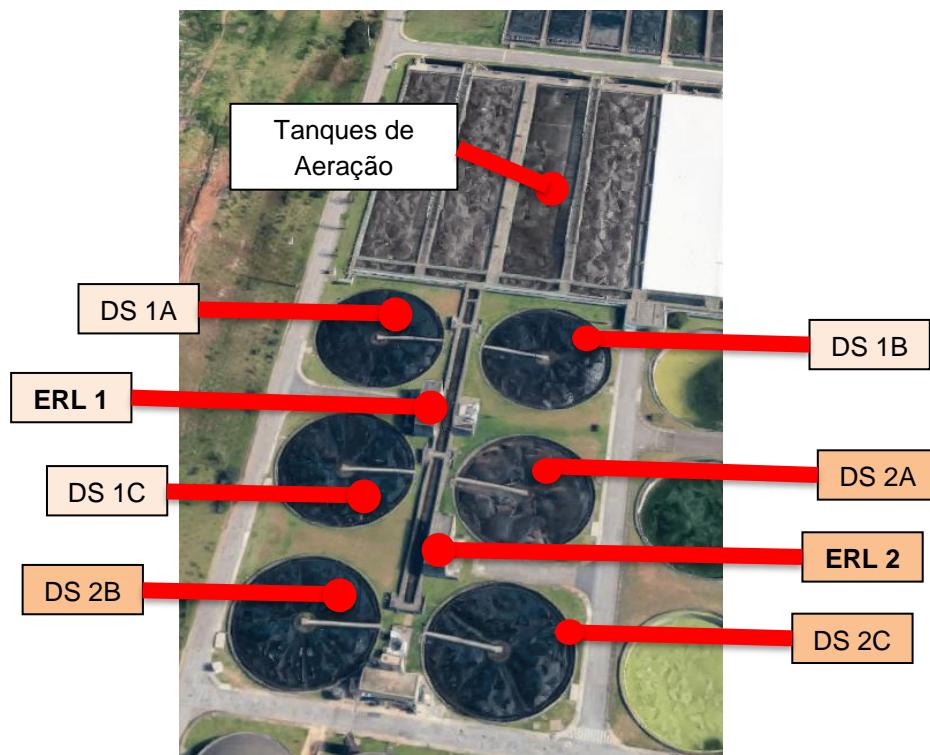
Fonte: Autor (2022)

A ETE em estudo é uma unidade consumidora de energia elétrica atendida em alta tensão, especificamente em 88 kV, subgrupo A2, com demanda contratada de 6.000 kW, e contrato de compra de energia no ambiente de contratação livre. A tarifa média de energia elétrica, já contemplando o uso do sistema de distribuição e a tarifa de energia (TUSD + TE), é de R\$ 0,393 por kWh consumido (obtida por meio dos valores realizados em 2021 de despesas com energia elétrica por energia consumida). Este valor foi usado como referência para os cálculos do benefício financeiro obtido pela economia de energia com a ação de eficiência energética proposta.

3.1.2 Características gerais da elevatória de recirculação de lodo ativado

A ETE possui duas elevatórias de recirculação de lodo ativado, ERL 1 e ERL 2. A ERL 1 recebe o lodo sedimentado dos decantadores DS 1A, DS 1B e DS 1C, enquanto a ERL 2 recebe o lodo sedimentado dos decantadores DS 2A, DS 2B e DS 2C. A Figura 3.4 apresenta a vista aérea do tratamento secundário, contemplando o tanque de aeração, decantadores secundários e elevatórias de recirculação, assim como a identificação usada para cada unidade. As bombas e demais equipamentos das elevatórias de recirculação de lodo ativado estão instalados internamente nos prédios ERL 1 e ERL 2 e em galerias abaixo do nível da rua.

Figura 3.4 - Elevatórias em estudo: ERL 1 e ERL 2

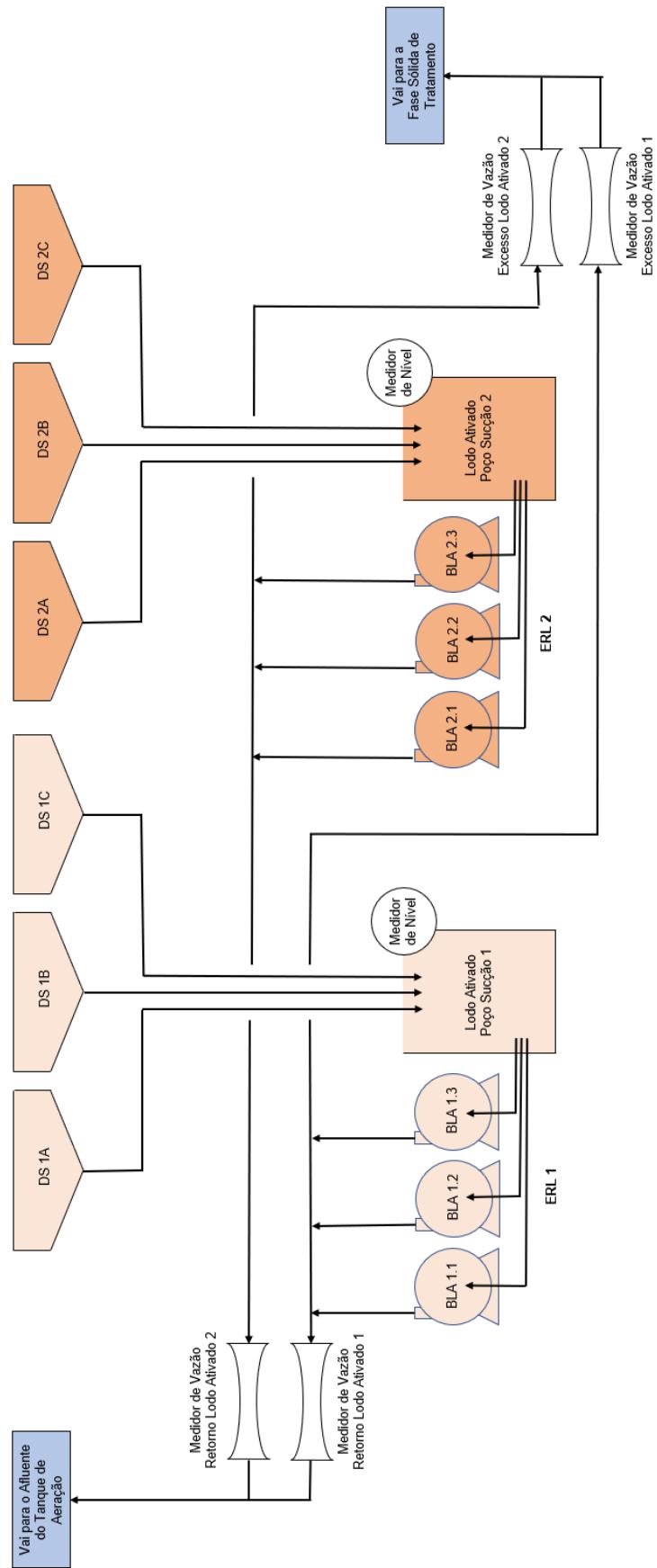


Fonte: Autor (2022)

Portanto, para cada conjunto de três decantadores secundários há uma ERL. As duas ERLs são independentes, cada uma com um poço de sucção, três conjuntos motobomba, um medidor de vazão de retorno de lodo ativado (lodo encaminhado para o afluente do tanque de aeração), e um medidor de vazão de excesso de lodo (lodo descartado e encaminhado para a fase sólida de tratamento).

A Figura 3.5 apresenta o fluxograma básico da ERL 1 e ERL 2, contemplando equipamentos principais, medições de processo, e interface entre as unidades.

Figura 3.5 - Fluxograma básico da ERL 1 e ERL 2



Fonte: Autor (2022)

3.1.3 Detalhamento de características físicas da elevatória

A Tabela 3.1 apresenta a relação de equipamentos principais da ERL 1 e ERL 2.

Tabela 3.1 - Equipamentos principais da ERL 1 e ERL 2

Quantidade	Identificação	Bomba	Motor	Acionamento elétrico
3 (ERL 1)	BLA 1.1 BLA 1.2 BLA 1.3	Fabricante: "Sulzer" Modelo: SPV 45-50 2664 m ³ /h - 670 rpm	Fabricante: "General Electric" Modelo: 62.3700.810 125cv - 440V - 700rpm	Conversor eletrônico de frequência Fabricante: "Danfoss" Modelo: VLT AQUA
3 (ERL 2)	BLA 2.1 BLA 2.2 BLA 2.3	Ano fabricação: 1981	Ano fabricação: 1990	Drive 110 kW

Fonte: Autor (2022)

A Figura 3.6 apresenta fotos de um dos motores elétricos e das bombas da ERL 1.

Figura 3.6 - Foto das três bombas da ERL 1 e de um dos motores



Fonte: Autor (2022)

Os seis motores estão instalados no local desde o início de operação da ETE, em 1998. Trata-se de um motor de indução trifásico com rotor bobinado, alimentação elétrica em 440 Vac, fabricante "General Electric". A posição do eixo é na vertical para

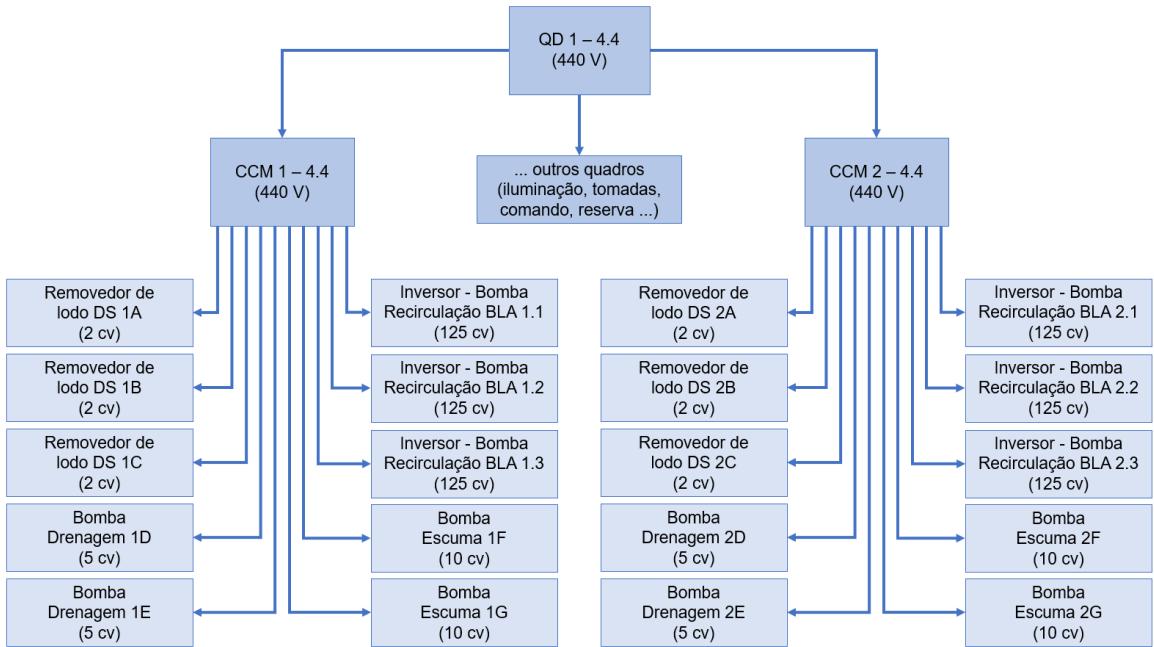
baixo, sendo o motor instalado em um piso superior e acoplado à bomba instalada no piso inferior. Por possuir rotor bobinado, os terminais dos enrolamentos do rotor são isolados e acessíveis externamente, por terminais conectados a anéis coletores e porta escovas. Originalmente, para partida e controle de velocidade, o motor possuía um sistema de reostato líquido a eletrodos fixos, composto basicamente por uma célula de carga onde ficavam os eletrodos conectados aos anéis; o reservatório onde era armazenado o eletrólito; e o compressor, responsável por promover a variação de nível do eletrólito e consequentemente da resistência. Entretanto, este sistema foi desativado em decorrência de falhas constantes, custo de manutenção elevado, e dificuldade na reposição de peças. Portanto, os terminais dos enrolamentos do rotor foram fechados em curto-círcito, e para o controle de velocidade foi instalado um conversor eletrônico de frequência acionando a entrada do motor, nos enrolamentos do estator.

As seis bombas também estão instaladas no local desde o início de operação da ETE, em 1998. Trata-se de uma bomba centrífuga de rotor fechado, fabricante “Sulzer”. O eixo trabalha em mancais de rolamentos lubrificados a óleo. Periodicamente são realizadas reformas no rotor das bombas para diminuição de perdas e manutenção do funcionamento.

Os seis conversores eletrônicos de frequência são do fabricante “Danfoss”. O projeto original da ETE prevê alimentação elétrica do motor sem o uso de conversores de frequência, sendo o controle de velocidade realizado por meio de reostatos conectados aos terminais dos enrolamentos do rotor. Porém, essa condição foi revisada pela equipe local da ETE, com a desativação do sistema de reostatos e instalação de conversores de frequência alimentando os enrolamentos do estator do motor.

A Figura 3.7 apresenta o diagrama elétrico em blocos da ERL 1 e ERL 2. O painel CCM1-4.4 alimenta eletricamente as cargas da ERL 1 enquanto o painel CCM2-4.4 alimenta as cargas da ERL 2. Ambos painéis são alimentados pelo quadro de distribuição QD1-4.4, com tensão trifásica de 440 V_{ac} entre fases.

Figura 3.7 - Diagrama elétrico em blocos da ERL 1 e ERL 2

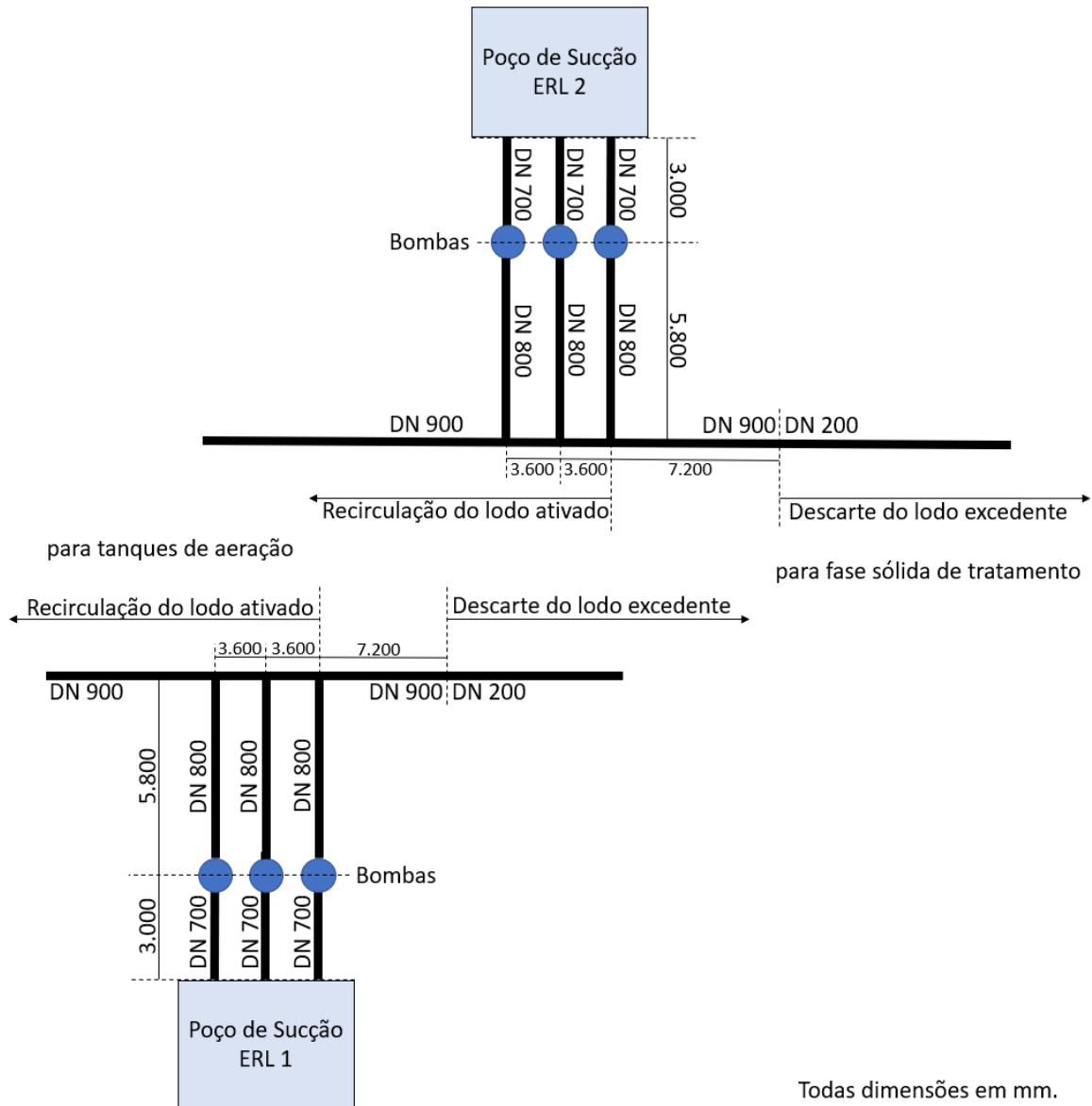


Fonte: Autor (2022)

Em termos de instrumentação e automação, as unidades ERL 1 e ERL 2 não possuem painel com controlador. A configuração da saída dos conversores de frequência é realizada manualmente pela operação da ETE, por meio da IHM localizada na parte frontal do painel. Há quatro medidores de vazão, todos por pressão diferencial, sendo dois em cada elevatória, um para a medição de vazão do lodo ativado recirculado ao tanque de aeração e outro para a vazão do excesso de lodo ativado descartado para fase sólida de tratamento. A soma das vazões do lodo ativado recirculado e do lodo ativado excedente descartado resulta na vazão total bombeada pela respectiva elevatória. Há também um medidor de nível em cada elevatória, no poço de sucção das bombas. A posição dos medidores está indicada no fluxograma da Figura 3.5.

A Figura 3.8 apresenta o desenho básico da ERL 1 e ERL 2 com foco nas características hidráulicas do sistema, considerando a vista superior. Todas as dimensões indicadas na Figura 3.8 estão na unidade de milímetros (mm). O diâmetro nominal das tubulações está indicado com a sigla DN.

Figura 3.8 - Desenho básico das características hidráulicas da ERL 1 e ERL 2, vista superior



Fonte: Autor (2022)

Percebe-se que ERL 1 e ERL 2 são similares, e que à esquerda o lodo ativado é encaminhado para o tanque de aeração (recirculação); e à direita há o descarte do lodo ativado excedente, encaminhado para a fase sólida de tratamento. A maior parte da vazão vai para os tanques de aeração enquanto a menor parte (lodo excedente) vai para a fase sólida de tratamento. Esta distribuição se dá pelas características hidráulicas do sistema. Percebe-se que a tubulação para os tanques de aeração possui diâmetro maior, o que implica em menor restrição hidráulica e maior vazão. Os poços de sucção, ou poços de lodo ativado, são preenchidos automaticamente com o

lodo sedimentado dos decantadores secundários (lodo ativado) por diferença de pressão, até alcançar o equilíbrio.

3.1.4 Detalhamento de características operacionais da elevatória

Cada elevatória, ERL 1 e ERL 2, possui três conjuntos de bombeamento com operação na configuração 2 + 1R (dois equipamentos em funcionamento mais um equipamento desligado como reserva). Devido à necessidade de operação contínua, 24 horas por dia, 7 dias por semana, e pela consequência de falha deste sistema ser elevada para o tratamento de esgotos, o projeto da elevatória prevê equipamentos reservas a fim de aumentar a confiabilidade da unidade.

As elevatórias ERL 1 e ERL 2 não possuem painel com controlador. Portanto, o controle é manual, não automático. A configuração da saída dos conversores de frequência que acionam os conjuntos motobomba é realizada pela equipe de operação da ETE, por meio da IHM de cada conversor, localizada na parte frontal do painel elétrico instalado na respectiva elevatória. As medições de nível e vazão são monitoradas na sala do CCO, e quando há necessidade de variar a rotação da bomba o operador vai ao local realizar este ajuste. Há proteção elétrica para desligar os conjuntos caso o poço de sucção apresente um nível muito baixo que possa causar danos à bomba decorrentes de cavitação por exemplo.

A condição atual buscada pela operação é que a soma da vazão total da ERL 1 e ERL 2, contemplando a recirculação e o descarte do excedente de lodo ativado, esteja sempre entre 2,7 e 2,9 m³/s, durante as 24 horas do dia, os 7 dias da semana. Este valor desejado de vazão atende aos requisitos para o processo da ETE considerando a vazão de entrada típica e prevista para a unidade e as características hidráulicas do sistema. Portanto, o ajuste de rotação da bomba é realizado manualmente quando a soma das vazões totais da ERL 1 e ERL 2 está fora dessa faixa.

Para se obter a condição desejada usualmente são acionadas duas bombas em cada elevatória, com rotação em torno de 90% da rotação máxima da bomba (600 rpm, equivalente a 90% de 670 rpm).

Os dados de vazão da ERL 1 e ERL 2 são registrados no sistema supervisório da ETE, com amostragem de um minuto. A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos dados registrados em um período de 7 dias, entre 21 e 27/03/2022, enquanto o gráfico

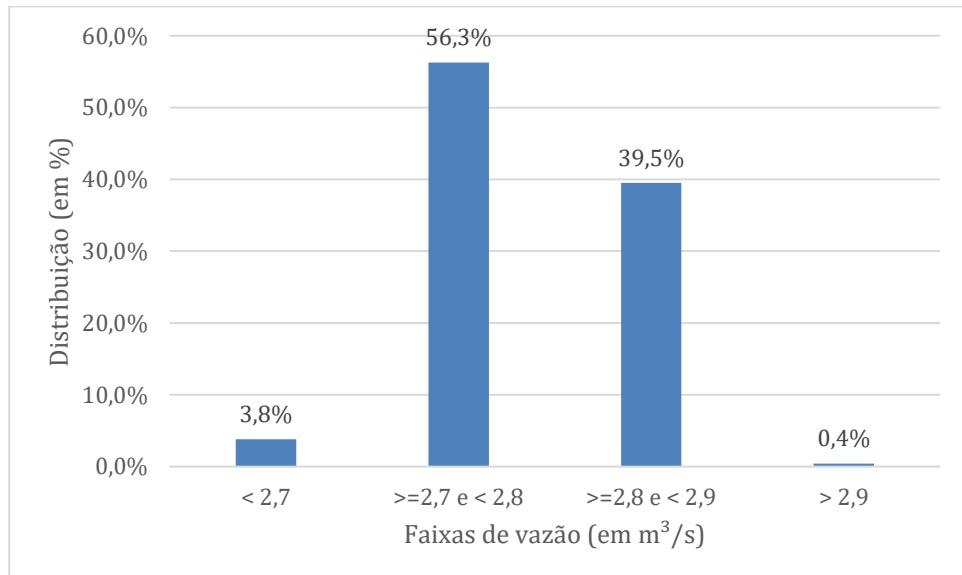
da Figura 3.9 apresenta a distribuição das vazões registradas por faixa. Verifica-se que a vazão total permaneceu 95,8% do período dentro da faixa estabelecida.

Tabela 3.2 - Resumo de dados de vazão da ERL 1 e ERL 2 de 21 a 27/03/22

	Vazão (m ³ /s)		
	Média	Máxima	Mínima
ERL 1	1,33	1,38	1,13
ERL 2	1,45	1,55	1,09
TOTAL	2,78	2,91	2,24

Fonte: Autor (2022)

Figura 3.9 - Distribuição das vazões registradas de 21 a 27/03/22 por faixa



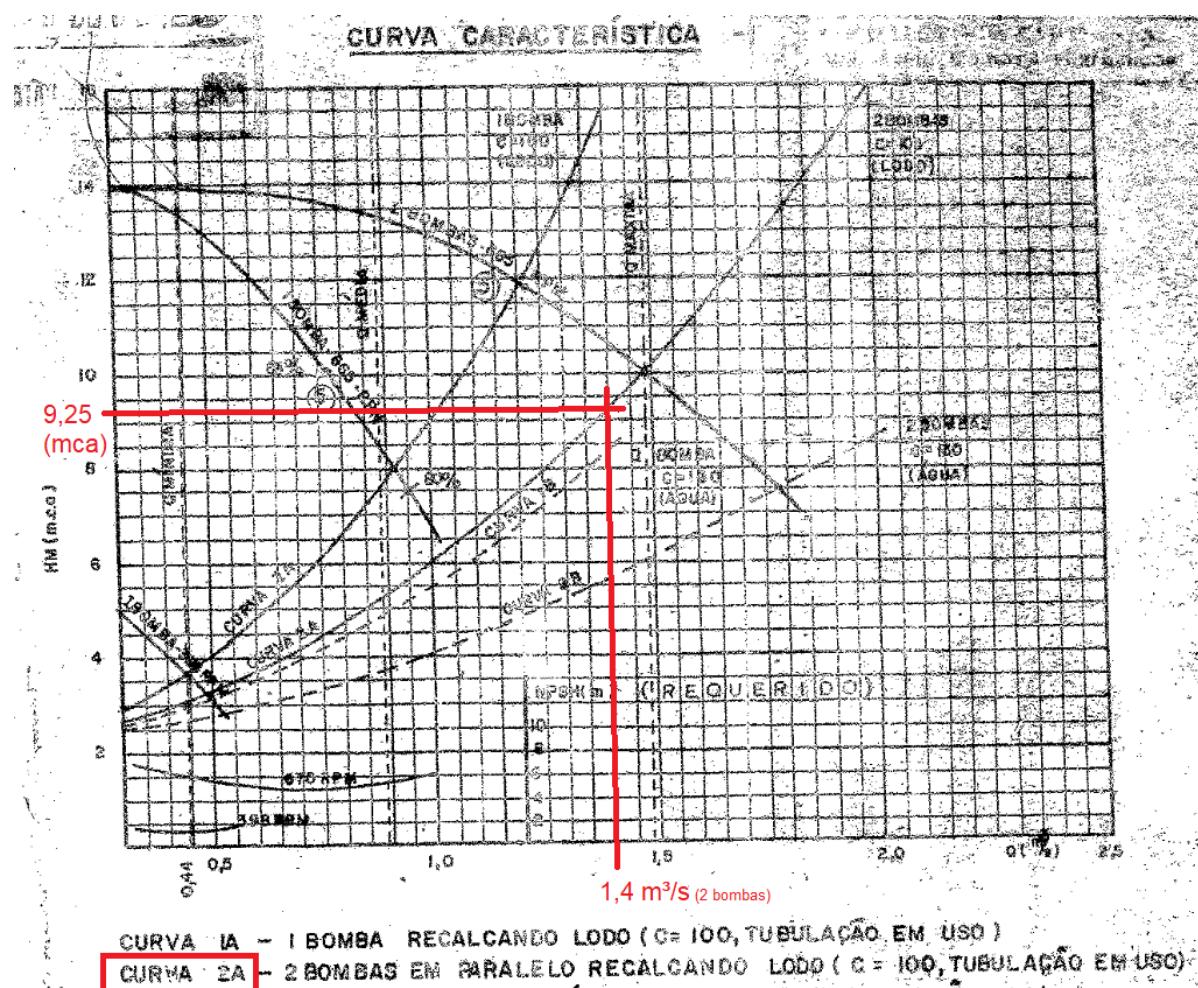
Fonte: Autor (2022)

A condição desejada ideal para a operação é que a vazão total da ERL 1 e ERL 2 resulte entre 80% e 100% da vazão de esgoto afluente ao tanque de aeração, que é variável ao longo do dia. Em decorrência de não haver controle automático na elevatória, a operação da ETE estabeleceu o valor desejado entre 2,7 e 2,9 m³/s, que trata-se de um valor médio que atende os requisitos do processo de tratamento mesmo com as variações de vazão do esgoto afluente no tanque de aeração, e não demanda muitas intervenções da operação no ajuste da rotação das bombas.

3.1.5 Estimativa do rendimento do sistema original

Considerando o ponto de trabalho de cada conjunto motobomba, com vazão igual a $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ por bomba, sendo duas bombas operando em paralelo para recirculação do lodo em cada elevatória, e a curva característica contemplando o sistema e a bomba, a altura manométrica total resultante é 9,25 mca, conforme apresentado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Curva característica da elevatória de recirculação de lodo, curvas do sistema e da bomba



Fonte: Adaptado de FMC-FILSAN (1981)

Tendo a vazão e a altura manométrica total, pode-se calcular a potência hidráulica necessária para o recalque do fluido nestas condições, em cada bomba, através da eq. (1) (MONACHESI, 2005).

$$P_h = \gamma \times Q \times HMT \quad (1)$$

$$P_h = 9.800 \text{ [N/m}^3\text{]} \times 0,7 \text{ [m}^3\text{/s]} \times 9,25 \text{ [m]} \therefore P_h = 63.455 \text{ W} = 63,455 \text{ kW}$$

Para cálculo do rendimento global, foram consideradas as especificações do fabricante de cada componente do sistema no ponto de trabalho supracitado.

Conforme folha de dados da bomba e do projeto, a bomba possui rendimento teórico igual a 83% em 665 rpm, para a condição de recalque de lodo secundário, que apresenta sólidos em suspensão totais em torno de 3.500 mg/L. Tendo em vista que o ponto de trabalho não corresponde à rotação indicada, foi considerado para o cálculo o rendimento teórico de 81%. De acordo especificações do fabricante, o motor original possui um rendimento teórico de 91% em 75% da potência nominal, e 90% em 100% da potência nominal. Tendo em vista a operação no ponto de trabalho, foi adotado o valor de 90,5%. Além dos componentes principais (conversor, motor e bomba), foi adotado o valor de 3% para outras perdas, como por exemplo, no eixo cardã para acoplamento entre motor e bomba.

Os valores de rendimento considerados para cada elemento estão apresentados na Tabela 3.3, assim como o rendimento global obtido.

Tabela 3.3 - Cálculo do rendimento global do sistema original

Componente	Rendimento
Conversor de frequência	96,0%
Motor	90,5%
Bomba	81,0%
Outros	97,0%
Global	68%

Fonte: Autor (2022)

Dada a potência hidráulica, e tendo o rendimento global do conjunto de bombeamento, pode-se calcular a potência elétrica requerida em cada conjunto de bombeamento, através da eq. (2) (MONACHESI, 2005), e o consumo específico de energia por volume bombeado, através da eq. (3).

$$P_e = P_h / \eta_G \quad (2)$$

$$P_e = 63,455 \text{ [kW]} / 0,68 \therefore P_e = 93,3 \text{ kW}$$

$$CE = (P_e \times \Delta t) / (Q \times \Delta t) = P_e / Q \quad (3)$$

$$CE = 93,3 \text{ [kW]} / 0,7 \text{ [m}^3/\text{s}] = 133,3 \text{ kWs/m}^3 = 133,3 / 3.600 \text{ kWh/m}^3$$

$$CE = 0,0370 \text{ kWh/m}^3$$

O rendimento global obtido considera os dados de especificação dos fabricantes, conforme o sistema original. Tendo em vista o desgaste dos equipamentos e intervenções realizadas, especialmente motor e bomba que estão em funcionamento desde o início de operação da ETE, o rendimento global atual é certamente menor que o apresentado na Tabela 3.3. Segundo ensaios realizados e apresentados no trabalho de Duan & Karelín apud Serrano (2017) para uma bomba centrífuga da V.V. Kuibyshev Moscow Civil Engineering Institute (MIEI), a diminuição de eficiência da bomba com rotor fortemente desgastado, em comparação com a eficiência de uma bomba reparada, equivale de 12% a 15%.

3.2 Estudo de caso – projeto de eficiência energética

3.2.1 Requisitos mínimos para o projeto

Conforme avaliação da condição atual e demanda da operação e manutenção da ETE em estudo, são requisitos mínimos para o projeto os itens listados a seguir.

- Cada elevatória de recirculação de lodo, ERL 1 e ERL 2, deve possibilitar vazão total entre 0,5 e 1,6 m³/s.
- O ponto de trabalho usual de cada elevatória é 1,4 m³/s. Considerando dois conjuntos em operação por elevatória, o ponto de trabalho usual de cada motobomba é 0,7 m³/s, com 9,25 mca de altura manométrica total.
- Cada elevatória deve possuir três conjuntos de bombeamento, sendo que dois conjuntos de bombeamento devem ter capacidade para atender a necessidade da respectiva elevatória, sendo o terceiro conjunto reserva.
- O índice de consumo energético por volume bombeado deve ser menor que o atual (maior eficiência energética do que o sistema atual, melhor rendimento global).
- Alimentação elétrica disponível em tensão trifásica 440 Vca com proteção em 215 A para cada conjunto de bombeamento.

- Não considerar alterações nos diâmetros das tubulações. A tubulação de sucção possui diâmetro igual a 700 mm, enquanto o recalque possui diâmetro igual a 800 mm.

3.2.2 Projeto de eficiência energética proposto

Considerando o estudo da condição atual do sistema; os requisitos mínimos supracitados; e o sistema de bombeamento composto pelos equipamentos principais: conversor de frequência, motor e bomba; foi avaliada a substituição por equipamentos mais eficientes quanto ao uso de energia, com menores perdas para o ponto de trabalho da elevatória.

Não foi considerada a substituição do conversor de frequência, tendo em vista que é um equipamento relativamente novo, em bom estado de conservação e com um bom rendimento. Diferentemente do conversor de frequência, motor e bomba estão em operação desde o início de operação da ETE, em 1998, sendo que a bomba, conforme dados de placa, foi fabricada no ano de 1981.

Conforme especificações do fabricante e do projeto, apesar da idade, a bomba possui um rendimento compatível com modelos atuais, considerando capacidades semelhantes (vazão, altura manométrica, total, rotação). Porém, devido ao elevado tempo de uso e desgaste especialmente do rotor, já não apresenta o mesmo rendimento. Portanto, o projeto proposto prevê a substituição das bombas por novas, podendo ser do mesmo modelo e fabricante das bombas originais, com rendimento teórico igual a 81% no ponto de trabalho.

Conforme especificações do fabricante, o motor possui um rendimento de 90,5% no ponto de trabalho. A substituição dos motores de indução com rotor bobinado por novos motores de indução com rotor de gaiola é uma oportunidade de melhoria do rendimento global do sistema. Portanto, o projeto proposto prevê a substituição dos motores por novos, com características compatíveis de tensão, potência, montagem, 8 polos, sendo usado como referência o modelo “W22 IR3 Premium”, com rendimento de 94,1% a plena carga e 93,9% a 50% da carga, conforme folha de dados do fabricante “WEG”, sendo considerado o rendimento teórico de 94% para o ponto de trabalho.

A Tabela 3.4 apresenta o resumo do projeto de eficiência energética proposto, contemplando a substituição dos 6 conjuntos, motor e bomba, e comparação com o

sistema original em termos de rendimento teórico. Destaca-se que os valores foram obtidos por meio de folhas de dados dos fabricantes para o ponto de trabalho da elevatória, e que em decorrência do tempo de uso e desgaste dos equipamentos, o rendimento do sistema atual é menor que o indicado, portanto a melhoria do rendimento global com o projeto proposto deve ser maior que esta estimativa inicial.

Tabela 3.4 - Resumo do projeto proposto e comparação do rendimento com sistema original

Componente	Sistema original	Projeto proposto	Observações
	especificações fabricante	especificações fabricante	
Conv. frequência	$\eta = 96,0\%$	$\eta = 96,0\%$	–
Motor	$\eta = 90,5\%$	$\eta = 94,0\%$	Substituição, 6 motores novos, usado como referência o modelo "W22 IR3 Premium" (fabricante "WEG").
Bomba	$\eta = 81,0\%$	$\eta = 81,0\%$	Substituição, 6 bombas novas, mesmo modelo e fabricante das originais (modelo "SPV 45-50", fabricante "Sulzer").
Outros	$\eta = 97,0\%$	$\eta = 97,0\%$	–
Global	$\eta_G = 68\%$	$\eta_G = 71\%$	Melhoria do rendimento global.

Fonte: Autor (2022)

Foi consultada uma ESCO, ou seja, uma empresa de engenharia especializada em serviços de conservação de energia, a fim de se obter a estimativa de custo para a implementação do projeto proposto. O custo obtido, contemplando o fornecimento e a prestação de serviço da instalação completa dos 6 conjuntos motobombas, conforme a proposta apresentada pela ESCO, é de R\$ 5.475.963,25, com referência no mês de maio de 2022.

Visando calcular a estimativa da economia de energia e o benefício financeiro do projeto de eficiência energética, nos itens a seguir são apresentadas a estratégia de medição e verificação da performance e a medição da linha de base de consumo do sistema atual, para então ser realizada a discussão dos resultados e a análise da viabilidade financeira do projeto proposto.

3.3 Estratégia de medição e verificação da performance

Não é possível medir de forma direta a economia de energia, tendo em vista que é caracterizada por uma redução, uma ausência de consumo. Portanto, em um projeto de eficiência energética é importante estudar métodos para avaliação do desempenho energético. Este estudo deve ser elaborado antes da implantação da ação de eficiência, e considerar formas de determinar a economia.

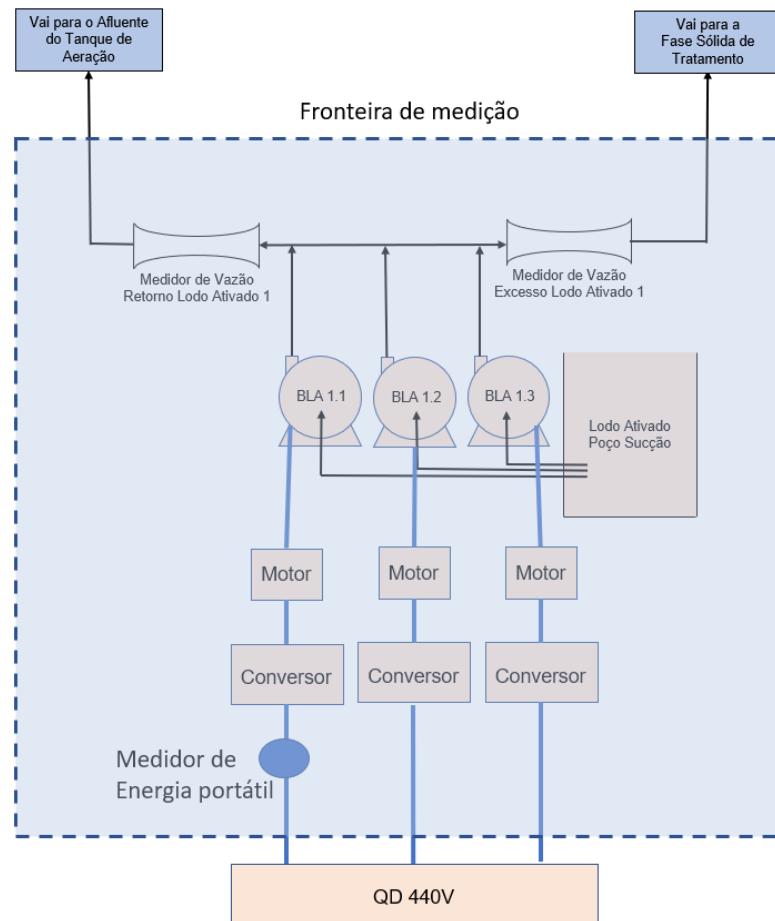
Tendo em vista que o presente trabalho propõe um projeto de eficiência energética com custo significativo, e que há dados e instrumentos disponíveis para medição da linha de base, neste item é avaliada e apresentada a estratégia de M&V para o projeto, visando a determinação da economia.

Considerando que o projeto propõe a substituição dos conjuntos de bombeamento da elevatória de recirculação de lodo ativado, afetando apenas uma parte da instalação, a opção de medição isolada da AEE se mostra mais adequada. A fronteira de medição foi definida englobando as bombas e respectivos motores e conversores de frequência. Nesta configuração há uma fronteira de medição elétrica, na alimentação do conversor de frequência de cada conjunto de bombeamento afetado pela AEE. Para calcular adequadamente o efeito da AEE é importante separar seu efeito energético do aumento da produção e outras variáveis e fatores que possam afetar o consumo. Portanto, as vazões obtidas no recalque das bombas foram incluídas na fronteira de medição.

Tendo em vista que os conjuntos de bombeamento possuem mesmas características (modelo, fabricante, tempo de uso, nível de desgaste); que são operados dois conjuntos mais um reserva por elevatória; que as rotações dos conjuntos em operação são iguais; que não há medidores de energia instalados na elevatória, mas há um registrador de energia portátil disponível; e que as elevatórias são similares em termos de características físicas e operacionais, foi considerada para a medição de consumo a utilização de um registrador de energia portátil na alimentação elétrica do conversor de frequência de um dos conjuntos de bombeamento em operação, sendo o valor medido multiplicado por dois para se obter a estimativa do consumo da elevatória correspondente; e para medição do volume bombeado pela elevatória os dois medidores de vazão existentes, um de retorno e outro de excesso de lodo, que somados resultam na vazão total da elevatória.

A fronteira de medição supracitada é apresentada na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Fronteira de medição para determinação da economia



Fonte: Autor (2022)

Portanto, conforme a estratégia de M&V apresentada, e sabendo que as leituras dos medidores são registradas a cada minuto, a eq. (4) calcula o consumo específico de uma elevatória.

$$CE = \sum_{i=1}^n (2 \times Pe_i \times 1/60) / \sum_{i=1}^n [(Qrl_i + Qel_i) \times 60] \quad (4)$$

Sendo:

- CE: consumo específico da elevatória (em kWh/m³);
- i, n: índice i e número de leituras n durante o período de avaliação;
- Pe: medição da potência elétrica demandada (em kW);
- Qrl: medição de vazão da recirculação de lodo ativado (em m³/s);
- Qel: medição de vazão do excesso de lodo ativado (em m³/s);

A mesma equação pode ser utilizada para o cálculo do consumo específico nos períodos antes (linha de base) e após a implementação da AEE, determinando-se a economia de energia anual de uma elevatória pela eq. (5).

$$EE_{anual} = (CE_{LinhaBase} - CE_{ApósAEE}) \times [(\overline{Qrl} + \overline{Qel}) \times 365 \times 24 \times 60 \times 60] \quad (5)$$

Sendo:

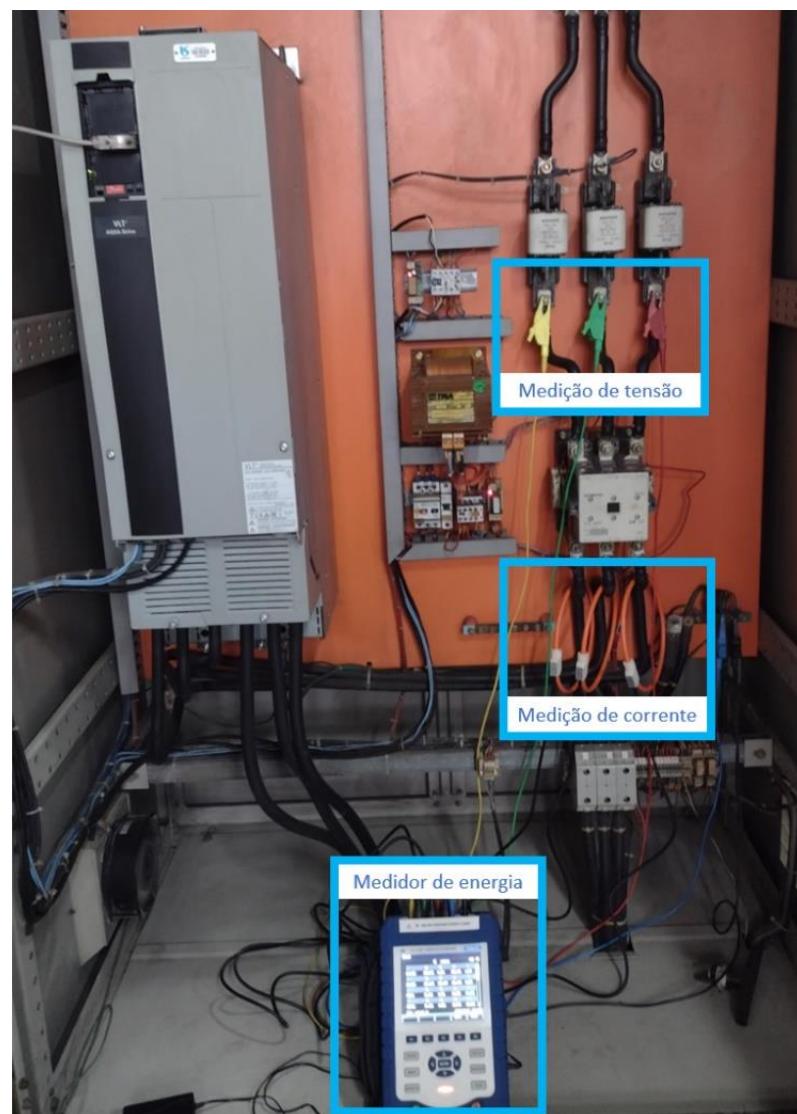
- EE_{anual} : economia de energia por ano (em kWh);
- $CE_{LinhaBase}$: consumo específico do período de linha de base (em kWh/m³);
- $CE_{ApósAEE}$: consumo específico do período após implementação da AEE (em kWh/m³);
- \overline{Qrl} : média da vazão da recirculação de lodo ativado no ano (em m³/s);
- \overline{Qel} : média da vazão do excesso de lodo ativado no ano (em m³/s);

3.3.1 Medição do consumo específico da linha de base

Conforme estratégia de M&V, para possibilitar a futura determinação da economia, tendo em vista a possibilidade de implementação do projeto, foi realizada a medição da linha de base (condição atual, antes da implementação da AEE).

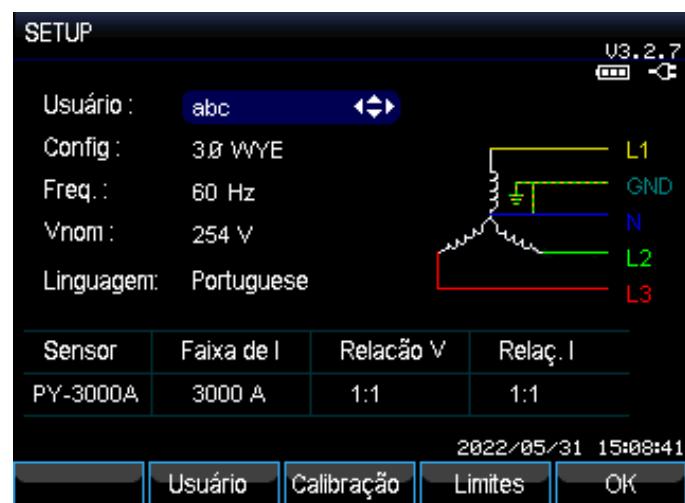
Foi instalado um medidor de energia na entrada do conversor de frequência do conjunto motobomba BLA 2.1, da ERL2. Este medidor foi instalado e configurado de maneira a possibilitar a medição da tensão, corrente e potência ativa, das três fases, amostragem de um minuto, com registro dos dados em memória interna. A Figura 3.12 apresenta a foto do medidor portátil instalado no local enquanto a Figura 3.13 mostra a configuração realizada no instrumento.

Figura 3.12 - Medidor de energia instalado para M&V do consumo específico da linha de base



Fonte: Autor (2022)

Figura 3.13 - Configuração do medidor de energia



Fonte: Autor (2022)

Considerando que o período de tempo a ser utilizado para medição e determinação da linha de base deve representar todos os modos de funcionamento da instalação, devendo cobrir um ciclo completo de funcionamento normal, foi definido o período de dois dias para a medição, sendo realizada de 07/06/2022 a 08/06/2022.

O Apêndice A apresenta a planilha com dados principais da medição da potência elétrica demanda e da vazão. Os dados elétricos foram obtidos do medidor de energia portátil, enquanto os dados de vazão foram obtidos do sistema supervisório da ETE, que registra os dados dos medidores de vazão já instalados no local. A planilha do Apêndice A também apresenta o cálculo da totalização da potência demanda para se obter o consumo de energia, e da totalização da vazão para se obter o volume de lodo ativado bombeado, conforme a equação definida na estratégia de M&V. Dada a quantidade de dados, a planilha do Apêndice A apresenta valores médios e resultados consolidados em períodos de 15 em 15 minutos, enquanto a planilha com os dados brutos possui valores com amostragem de um minuto.

No período avaliado, de 07 a 08/06/2022, foi obtido um consumo de 9.973 kWh, e volume bombeado de 229.144 m³, resultando no consumo específico de 0,0435 kWh/m³, correspondente à linha de base da ERL 2. Dadas as características físicas e operacionais similares da ERL 1 e ERL 2, a medição não foi realizada na ERL 1.

Considerando o ponto de trabalho ($Q = 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ e $HMT = 9,25 \text{ mca}$ por bomba, 4 conjuntos em operação), a potência hidráulica necessária para o deslocamento do fluido nestas condições ($P_h = 63,455 \text{ kW}$ por conjunto, conforme cálculos apresentados no item 3.1.5), e a linha de base obtida (0,0435 kWh/m³), é possível calcular a potência elétrica requerida por conjunto e o rendimento global na condição atual, conforme apresentado na eq. (6) e eq. (7).

$$CE = (P_e \times \Delta t) / (Q \times \Delta t) \therefore P_e = CE \times Q \quad (6)$$

$$P_e = 0,0435 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times 0,7 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,0435 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times 2.520 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \therefore P_e = 109,6 \text{ kW}$$

$$\eta_G = P_h / P_e = 63,455 [\text{kW}] / 109,6 [\text{kW}] \therefore \eta_G = 58\% \quad (7)$$

3.3.2 Cálculo do consumo específico esperado após a AEE

O consumo específico esperado após a implementação da AEE foi calculado conforme a eq. (8) e eq. (9), usando como referência o rendimento global de 71%, estimado a partir de dados dos fabricantes, conforme apresentado na Tabela 3.4, considerando vazão total constante de 2,8 m³/s (1,4 m³/s por elevatória, 0,7 m³/s por conjunto motobomba em operação, 4 conjuntos em operação).

$$P_e = P_h / \eta_G = 63,455 [\text{kW}] / 0,71 \quad (8)$$

$$P_e = 89,4 \text{ kW}$$

$$\text{CE} = \frac{4 \times 89,4 \text{ kW}}{2,8 \text{ m}^3/\text{s}} = 127,7 \frac{\text{kW}\cdot\text{s}}{\text{m}^3} = \frac{127,7}{3.600} \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (9)$$

$$\text{CE} = 0,0355 \text{ kWh/m}^3$$

4 DISCUSSÃO

4.1 Resumo dos resultados

Considerando a metodologia, as premissas e os resultados apresentados durante o desenvolvimento do trabalho, a Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados.

Tabela 4.1 - Resumo dos resultados

Referência	Condição original	Condição atual	Condição esperada após AEE
	Especificações fabricante	Medição da linha de base	Especificações fabricante
(*) Potência hidráulica P_h	63,455 kW	63,455 kW	63,455 kW
(*) Potência elétrica P_e	93,3 kW	109,6 kW	89,4 kW
Rendimento global η_G	68%	58%	71%
Consumo específico CE	0,0370 kWh/m ³ (calculado)	0,0435 kWh/m ³ (medido)	0,0355 kWh/m ³ (calculado)

(*) Potência hidráulica e potência elétrica requerida por conjunto de bombeamento em operação, considerando o ponto de trabalho $Q = 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ e $HMT = 9,25 \text{ mca}$, 4 conjuntos iguais em operação.

Fonte: Autor (2022)

Verifica-se que a condição atual apresenta um consumo específico de 0,0435 kWh/m³, conforme medição da linha de base, enquanto o consumo energético teórico calculado pela condição original é 15% menor. Esta diferença se deve principalmente ao desgaste dos equipamentos, especialmente o rotor da bomba, em uso por mais de 20 anos, o que reduz o rendimento do sistema. Segundo ensaios realizados e apresentados no trabalho de Duan & Karelín apud Serrano (2017) para uma bomba centrífuga da V.V. Kuibyshev Moscow Civil Engineering Institute (MIEI), a diminuição de eficiência da bomba com rotor fortemente desgastado, em comparação com a eficiência de uma bomba reparada, equivale de 12% a 15%.

Conforme o projeto de eficiência energética proposto, com a substituição dos conjuntos motobomba por equipamentos novos mais eficientes, é esperado um consumo específico de 0,0355 kWh/m³, 18% menor que a condição atual.

4.2 Análise de viabilidade financeira com mudança de cenários

Para a análise de viabilidade financeira do projeto proposto foram considerados: o custo para implementação, obtido via consulta e estimativa enviada por uma ESCO contemplando o fornecimento e instalação dos equipamentos novos; e o benefício sendo a estimativa da economia de energia anual, calculada conforme a estratégia de medição e verificação definida. O projeto também apresenta outros benefícios além da eficiência energética, como redução dos custos de manutenção, renovação de ativos já depreciados e em final de vida útil, aumento da confiabilidade do sistema, que, no entanto, não foram contabilizados nesta análise.

Conforme estratégia de medição e verificação definida, a economia de energia anual é definida pela eq. (10).

$$EE_{anual} = (CE_{LinhaBase} - CE_{ApósAEE}) \times [(\overline{Qrl} + \overline{Qel}) \times 365 \times 24 \times 60 \times 60] \quad (10)$$

Para estimar o benefício da economia de energia anual, foi considerado como linha de base o consumo específico medido, igual a 0,0435 kWh/m³, e vazão total constante de 2,8 m³/s (1,4 m³/s por elevatória, 0,7 m³/s por conjunto motobomba em operação, 4 conjuntos em operação). Comparando-se o consumo específico da linha de base (0,0435 kWh/m³) com o esperado após a implementação do projeto (0,0355 kWh/m³), verifica-se uma redução no consumo de 18% para o mesmo volume bombeado. A estimativa da economia de energia anual é calculada pela eq. (11).

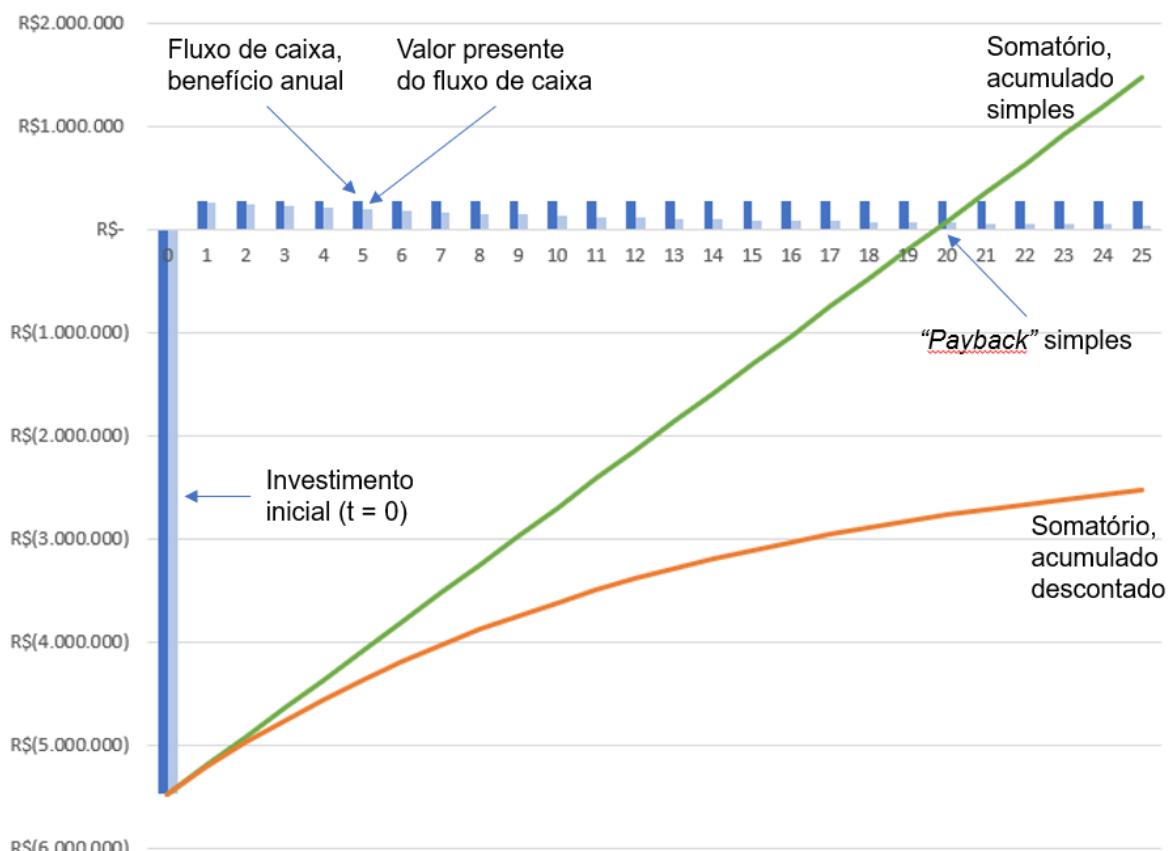
$$EE_{anual} = (0,0435 - 0,0355) \times [2,8 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60] = 706.406 \text{ kWh} \quad (11)$$

Com a finalidade de se obter o benefício financeiro da economia de energia foi utilizada a eq. (12), sendo considerada a tarifa média de energia elétrica da ETE (TUSD + TE), igual a R\$ 0,393 por kWh consumido, com base nos valores realizados em 2021 de despesas com energia elétrica por energia consumida, conforme apresentado no item 3.1.1 .

$$EE_{anual-R\$} = 706.406 \text{ kWh} \times 0,393 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} = \text{R\$ } 277.617,56 \quad (12)$$

Tendo a estimativa do investimento inicial para implementação do projeto, no valor de R\$ 5.475.963,25; o benefício anual da economia de energia, no valor de R\$ 277.617,56; considerando um período de avaliação de 25 anos (vida útil estimada para bombas e motores pela empresa em estudo), taxa de desconto igual a 8,1% ao ano (custo médio ponderado de capital adotado pela empresa em estudo), a Figura 4.1 apresenta o fluxo de caixa previsto para o projeto, assim como o somatório (fluxo de caixa acumulado) simples e descontado, enquanto a Tabela 4.2 apresenta o resumo dos resultados da análise da viabilidade financeira baseada nos métodos “payback” simples, “payback” descontado, e valor presente líquido (VPL). Estes dados de referência definem o cenário 1 de avaliação.

Figura 4.1 - Fluxo de caixa previsto para o projeto (cenário 1)



Fonte: Autor (2022)

Tabela 4.2 - Resumo dos resultados da análise de viabilidade financeira (cenário 1)

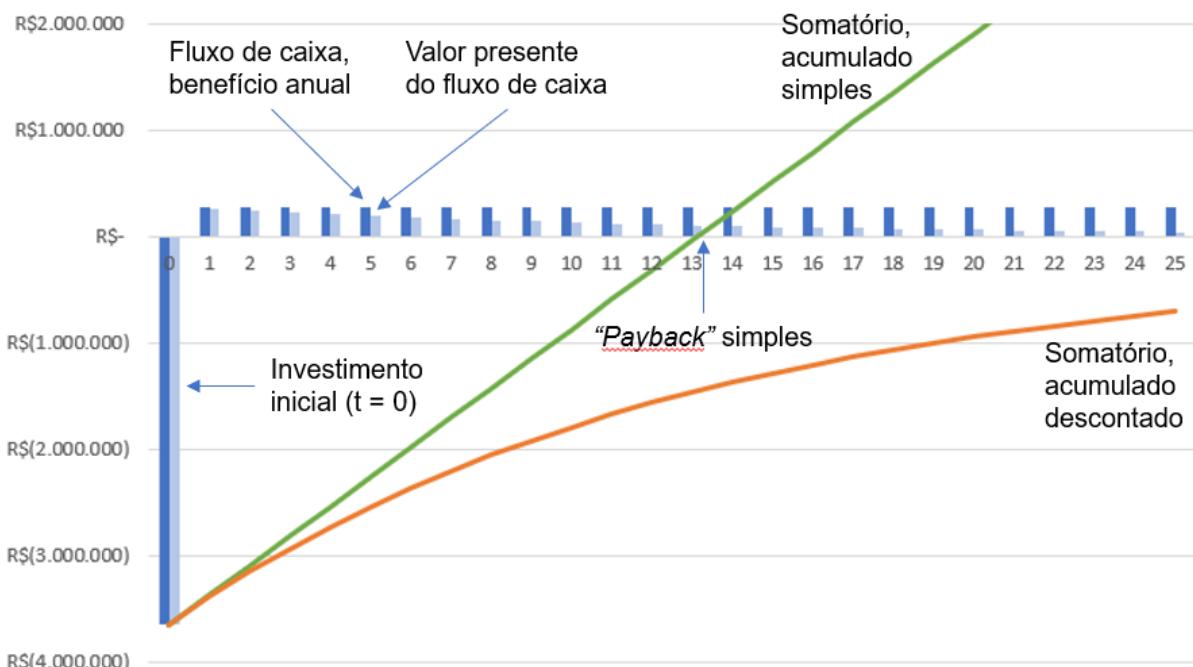
“Payback” simples	“Payback” descontado	VPL
19,7 anos	–	– R\$ 2.537.598,02

Fonte: Autor (2022)

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que, para o cenário 1, o projeto apresenta “payback” simples de 19,7 anos. No entanto, ao considerar métodos de análise do investimento que utilizam a taxa de desconto no tempo, o projeto não apresenta viabilidade financeira, com valor presente líquido negativo, igual a – R\$ 2.537.598,02, sem “payback” no período avaliado.

Tendo em vista o resultado obtido, uma alteração que pode auxiliar para a viabilidade do projeto é promover a substituição de 4 conjuntos motobombas ao invés dos 6. Isto reduz o custo do investimento inicial, de R\$ 5.475.963,25 para R\$ 3.650.642,17 conforme estimativa da ESCO, mantendo o mesmo benefício anual, considerando os 2 conjuntos não substituídos reservas, e operação durante todo o período apenas pelos conjuntos novos. Estes dados de referência definem o cenário 2 de avaliação, cujos resultados da análise da viabilidade estão apresentados na Figura 4.2 e na Tabela 4.3.

Figura 4.2 - Fluxo de caixa previsto para o projeto (cenário 2)



Fonte: Autor (2022)

Tabela 4.3 - Resumo dos resultados da análise de viabilidade financeira (cenário 2)

“Payback” simples	“Payback” descontado	VPL
13,1 anos	–	– R\$ 712.276,94

Fonte: Autor (2022)

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que, para o cenário 2, o projeto apresenta “payback” simples de 13,1 anos. No entanto, ao considerar métodos de análise do investimento que utilizam a taxa de desconto no tempo, apesar da melhora nos resultados, o projeto continua sem apresentar viabilidade financeira, com valor presente líquido negativo, igual a – R\$ 712.276,94, sem “payback” no período avaliado.

Para que o projeto apresente viabilidade financeira, ou seja, valor presente líquido positivo, sendo mantidos os valores do benefício financeiro, período de avaliação, e taxa de desconto, o investimento inicial deve ser menor ou igual a 2,938 milhões de reais. Este valor corresponde a 54% da estimativa de investimento do cenário 1 (substituição de 6 conjuntos), e 80% da estimativa de investimento do cenário 2 (substituição de 4 conjuntos).

Outro cenário que apresenta viabilidade financeira é obtido ao considerar as premissas do cenário 2, ou seja, a substituição de 4 conjuntos, investimento inicial de R\$ 3.650.642,17, sendo mantidos os valores do período de avaliação e taxa de desconto, com a revisão apenas do benefício financeiro esperado, considerando uma tarifa de energia 24% mais cara, igual a R\$ 0,489 por kWh consumido em vez de R\$ 0,393.

5 CONCLUSÕES

Os resultados e discussões apresentadas neste estudo de caso estão compatíveis com o objetivo proposto para o trabalho, contemplando a realização do diagnóstico energético do sistema de bombeamento em estudo, tendo como resultado a proposta de projeto de eficiência energética por meio da substituição de equipamentos por novos, mais eficientes, sendo apresentada também a análise do investimento em termos de viabilidade financeira.

Apesar da redução esperada de 18% no consumo específico do sistema, a análise do investimento para implantação do projeto de eficiência energética proposto não apresentou viabilidade financeira. No entanto, vale destacar que apenas o benefício da economia de energia foi avaliado. A análise de viabilidade não considerou benefícios adicionais, como a redução de custos com a manutenção, além da renovação de ativos já depreciados, em final de vida útil, e aumento da confiabilidade do sistema.

Além do alto investimento para implantação, outro fator que impactou o resultado financeiro é o fato da ETE em estudo possuir tarifa média de energia elétrica relativamente baixa, por estar no ambiente de contratação livre, afetando diretamente o benefício obtido pela economia de energia.

Portanto, é válida a apresentação da proposta de projeto para avaliação da empresa de saneamento proprietária da ETE. Havendo interesse, torna-se necessária a elaboração de termo de referência com especificações mínimas, detalhamento do projeto, e consulta a mais fornecedores e ESCOs, com possibilidade de implantação via contratação por performance de desempenho energético, e até mesmo uso de recursos do Programa de Eficiência Energética da ANEEL por meio de Chamada Pública.

Para determinação da economia com maior confiabilidade, uma oportunidade de melhoria é a revisão da estratégia de M&V, considerando a medição do consumo de energia elétrica em todos conjuntos de bombeamento, e não apenas em um; além de implantar medidores de pressão na sucção e recalque das bombas, para confirmação da altura manométrica total utilizada nos cálculos.

O trabalho também contribui para que outras oportunidades de melhoria da eficiência energética sejam avaliadas no setor de saneamento, por meio do compartilhamento da metodologia e resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Resolução Normativa nº 920, de 23 de fevereiro de 2021. Aprova os procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE. Lex: coletânea de legislação e jurisprudência, Brasília, 23 de fevereiro de 2021.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Lex: coletânea de legislação e jurisprudência, Brasília, 15 de julho de 2020.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução de Onofre de Andrade Martins. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

DUAN, C. G. & KARELIN, V. Y. apud SERRANO, R. O. P. **Metodologia para avaliação de desgaste abrasivo em pás de rotor de bombas centrífugas de estação elevatória**. 2017. 121 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

EPE. **Balanço Energético Nacional Interativo**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo>. Acesso em: 22 jul. 2022.

EVO. Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance. [S.I.]: [s.n.], 2012.

FMC-FILSAN. **Folha de dados bomba de recirculação de lodo**. Revisão 5. São Paulo, 1981.

MENDONÇA, L. A. C. **Controle escalar de velocidade e partida de motores de indução utilizando inversores**. 2021. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/utilizando-inversores>. Acesso em: 16 abr. 2022.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** 5^a edição. Tradução de Ivanildo Hespanhol e José Carlos Mierzwa. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1980 p.

MONACHESI, M. G. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 272 p.

NEOCHARGE. **Como funciona o motor de um carro elétrico.** Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/motor-como-funciona>> Acesso em: 18 mai. 2022.

ONU. **Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.** 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

PROPEQ. **Como funciona uma bomba centrífuga.** Disponível em: <<https://propeq.com/como-funciona-uma-bomba-centrifuga/>> Acesso em: 09 abr. 2022.

SABESP. **Tratamento de Esgotos.** Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=49>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

SIMÕES MOREIRA, J. R. (Org.). HERNANDEZ NETO, A. et. al. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.** 1^a edição. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

SNIS. **Publicação: eficiência energética, ações de assistência técnica em redução e controle de perdas de água e uso eficiente de energia elétrica.** 2018. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/downloads/publicacoes-acertar/perdas/Vol.5-Gestao-de-Energia.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2022.

VARGAS, D. **Bomba centrífuga.** Disponível em:
<https://danielvargas.blogspot.com/2019/10/bomba-centrifuga.html>. Acesso em: 09 abr. 2022.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

DANFOSS. **Folha de dados VLT 12-pulse drive.** [S.I.], 2014.

ENEL. **Tabela de tarifas de energia elétrica.** Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo_e_Governo/tabela-de-tarifas.html>. Acesso em: 8 jun. 2022.

FMC-FILSAN. **Folha de dados motor da bomba de recirculação de Iodo.** Revisão 2. São Paulo, 1981.

GENERAL ELECTRIC DO BRASIL S. A. **GEHBR-3297A Instruções motores de indução verticais empuxo normal, eixo sólido, carcaças 213-445, B254-B445, custom 8100 e 8200.** São Paulo, [ca. 1979].

PEREIRA, M. S. et al. **Projeto de eficiência energética em empresa de saneamento de economia mista: da participação em chamada pública de projetos à contratação (estudo de caso).** In: CONGRESSO DA ABES, 31., 2021, Curitiba. Anais. Curitiba: ABES, 2021. Disponível em: <https://icongresso.abes-dn.itarget.com.br/anais/index/resultado/index/index/cc/9>. Acesso em: 18 mar. 2022.

WEG. **W22 IR3 Premium 125 cv 8P – Detalhes do produto.** Disponível em: <<https://www.weg.net/catalogo/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico--Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W22/W22-/W22-IR3-Premium-125-cv-8P-315S-M-3F-220-380-440-V-60-Hz-IC411---TFVE---B35D/p/12217120>> Acesso em: 20 jun. 2022.

APÊNDICE A – Planilha com dados da medição da linha de base

Data	Horário	Medição elétrica			Medição de vazão		$\Sigma [2 \times P_e \times \Delta t]$ (kWh)	$\Sigma [(Q_{rl} + Q_{el}) \times \Delta t]$ (m³)
		U_{L_med} (V)	I_{L_med} (A)	P_e (kW)	Q_{rl} (m³/s)	Q_{el} (m³/s)		
07/06/22	0:00	446,1	142,6	104,3	1,27	0,043	3	79
07/06/22	0:15	445,6	141,4	103,3	1,28	0,044	55	1.264
07/06/22	0:30	446,1	142,1	104,1	1,28	0,044	107	2.453
07/06/22	0:45	445,6	143,1	104,6	1,27	0,044	156	3.564
07/06/22	1:00	443,5	143,8	104,6	1,27	0,044	212	4.828
07/06/22	1:15	443,5	142,9	103,8	1,28	0,044	263	6.016
07/06/22	1:30	444,0	143,8	104,6	1,28	0,044	315	7.204
07/06/22	1:45	443,7	143,7	104,4	1,28	0,045	368	8.392
07/06/22	2:00	445,2	143,5	104,7	1,28	0,044	420	9.584
07/06/22	2:15	446,1	141,9	103,8	1,27	0,044	472	10.769
07/06/22	2:30	446,0	140,8	102,8	1,28	0,044	524	11.953
07/06/22	2:45	446,2	142,7	104,1	1,26	0,044	576	13.138
07/06/22	3:00	445,1	144,8	105,4	1,28	0,045	628	14.325
07/06/22	3:15	444,8	142,8	103,8	1,27	0,045	680	15.513
07/06/22	3:30	444,7	144,0	104,6	1,27	0,045	732	16.699
07/06/22	3:45	444,8	143,6	104,4	1,28	0,045	784	17.888
07/06/22	4:00	445,4	143,9	104,8	1,27	0,045	836	19.075
07/06/22	4:15	443,2	144,1	104,5	1,28	0,045	889	20.263
07/06/22	4:30	442,7	144,8	104,9	1,27	0,045	941	21.451
07/06/22	4:45	442,4	145,0	105,1	1,26	0,045	993	22.636
07/06/22	5:00	442,3	145,0	104,9	1,27	0,045	1.045	23.821
07/06/22	5:15	438,3	145,0	104,2	1,27	0,045	1.097	25.009
07/06/22	5:30	437,0	146,2	104,8	1,27	0,045	1.150	26.197
07/06/22	5:45	435,7	146,7	104,8	1,28	0,045	1.202	27.384
07/06/22	6:00	439,4	144,5	104,2	1,27	0,045	1.255	28.567
07/06/22	6:15	435,7	146,4	104,6	1,28	0,045	1.307	29.754
07/06/22	6:30	436,1	146,7	104,8	1,27	0,045	1.359	30.938
07/06/22	6:45	438,5	144,6	104,0	1,27	0,045	1.411	32.123
07/06/22	7:00	438,9	145,4	104,7	1,27	0,045	1.463	33.312
07/06/22	7:15	439,2	143,5	103,3	1,27	0,045	1.515	34.498
07/06/22	7:30	437,6	145,2	104,1	1,28	0,045	1.567	35.682
07/06/22	7:45	438,7	145,4	104,6	1,27	0,045	1.620	36.868
07/06/22	8:00	438,2	145,4	104,5	1,27	0,045	1.672	38.053

Data	Horário	Medição elétrica			Medição de vazão		$\Sigma [2 \times P_e \times \Delta t]$	$\Sigma [(Q_{rl} + Q_{el}) \times \Delta t]$
		U_{L_med} (V)	I_{L_med} (A)	P_e (kW)	Q_{rl} (m^3/s)	Q_{el} (m^3/s)	(kWh)	(m^3)
07/06/22	8:15	437,4	145,3	104,1	1,27	0,045	1.724	39.241
07/06/22	8:30	436,2	146,6	104,8	1,28	0,046	1.776	40.429
07/06/22	8:45	434,9	144,8	103,1	1,28	0,045	1.828	41.614
07/06/22	9:00	438,4	145,4	104,5	1,27	0,046	1.880	42.801
07/06/22	9:15	439,2	144,6	104,0	1,27	0,046	1.932	43.986
07/06/22	9:30	437,7	145,0	103,9	1,28	0,045	1.984	45.175
07/06/22	9:45	436,7	146,0	104,5	1,27	0,046	2.037	46.364
07/06/22	10:00	436,1	144,7	103,5	1,28	0,045	2.089	47.554
07/06/22	10:15	436,3	143,4	102,5	1,26	0,062	2.141	48.743
07/06/22	10:30	436,2	146,2	104,6	1,26	0,061	2.193	49.932
07/06/22	10:45	435,0	146,5	104,4	1,27	0,061	2.245	51.125
07/06/22	11:00	435,3	145,4	103,7	1,26	0,062	2.297	52.317
07/06/22	11:15	433,7	146,4	104,1	1,26	0,062	2.349	53.508
07/06/22	11:30	434,6	144,6	103,1	1,25	0,062	2.401	54.698
07/06/22	11:45	434,8	145,6	103,7	1,26	0,063	2.453	55.889
07/06/22	12:00	438,4	144,1	103,7	1,26	0,063	2.505	57.080
07/06/22	12:15	439,1	143,2	102,9	1,26	0,064	2.557	58.272
07/06/22	12:30	440,8	144,3	104,1	1,26	0,063	2.609	59.462
07/06/22	12:45	441,1	144,1	104,1	1,26	0,064	2.661	60.654
07/06/22	13:00	440,5	144,3	104,1	1,26	0,064	2.712	61.845
07/06/22	13:15	436,8	144,2	103,3	1,27	0,064	2.764	63.040
07/06/22	13:30	436,5	144,2	103,2	1,26	0,064	2.816	64.232
07/06/22	13:45	435,4	143,9	102,7	1,27	0,064	2.868	65.423
07/06/22	14:00	437,4	143,9	103,2	1,26	0,064	2.919	66.617
07/06/22	14:15	437,3	143,9	103,2	1,26	0,064	2.971	67.809
07/06/22	14:30	436,6	144,4	103,4	1,27	0,064	3.022	69.006
07/06/22	14:45	436,8	144,3	103,4	1,27	0,064	3.074	70.200
07/06/22	15:00	437,8	143,3	102,9	1,26	0,064	3.126	71.393
07/06/22	15:15	437,1	145,2	104,1	1,26	0,064	3.178	72.588
07/06/22	15:30	436,9	143,9	103,1	1,26	0,063	3.230	73.783
07/06/22	15:45	437,3	145,0	103,9	1,27	0,064	3.281	74.978
07/06/22	16:00	438,5	145,2	104,2	1,27	0,064	3.333	76.176

Data	Horário	Medição elétrica			Medição de vazão		$\Sigma [2 \times P_e \times \Delta t]$	$\Sigma [(Q_{rl} + Q_{el}) \times \Delta t]$
		U_{L_med} (V)	I_{L_med} (A)	P_e (kW)	Q_{rl} (m^3/s)	Q_{el} (m^3/s)	(kWh)	(m^3)
07/06/22	16:15	437,8	145,1	104,0	1,26	0,064	3.385	77.369
07/06/22	16:30	437,2	146,0	104,6	1,26	0,064	3.437	78.564
07/06/22	16:45	437,3	144,1	103,3	1,26	0,064	3.489	79.758
07/06/22	17:00	438,6	143,2	102,9	1,27	0,064	3.540	80.955
07/06/22	17:15	436,8	144,9	103,8	1,26	0,064	3.592	82.151
07/06/22	17:30	436,3	144,5	103,3	1,26	0,064	3.644	83.345
07/06/22	17:45	437,4	145,5	104,3	1,26	0,063	3.696	84.537
07/06/22	18:00	437,4	143,8	103,2	1,26	0,064	3.748	85.730
07/06/22	18:15	434,7	146,2	104,3	1,26	0,063	3.800	86.922
07/06/22	18:30	436,6	144,5	103,5	1,26	0,064	3.852	88.121
07/06/22	18:45	437,2	145,6	104,5	1,26	0,063	3.904	89.314
07/06/22	19:00	437,4	144,9	104,0	1,26	0,064	3.956	90.509
07/06/22	19:15	436,3	144,9	103,9	1,27	0,063	4.008	91.707
07/06/22	19:30	437,1	143,4	102,9	1,26	0,064	4.060	92.898
07/06/22	19:45	438,5	145,1	104,5	1,27	0,064	4.112	94.094
07/06/22	20:00	438,6	144,6	104,1	1,26	0,064	4.164	95.290
07/06/22	20:15	438,9	145,7	105,0	1,27	0,064	4.216	96.487
07/06/22	20:30	440,9	143,1	103,5	1,26	0,064	4.268	97.680
07/06/22	20:45	440,0	142,7	102,9	1,27	0,064	4.319	98.874
07/06/22	21:00	441,3	142,4	103,1	1,26	0,064	4.371	100.072
07/06/22	21:15	441,5	143,1	103,6	1,27	0,064	4.423	101.272
07/06/22	21:30	445,2	143,3	104,6	1,27	0,064	4.475	102.472
07/06/22	21:45	443,5	143,3	104,1	1,26	0,064	4.527	103.669
07/06/22	22:00	445,3	141,0	103,0	1,26	0,064	4.579	104.866
07/06/22	22:15	442,0	143,2	103,8	1,26	0,064	4.631	106.066
07/06/22	22:30	441,6	144,6	104,7	1,27	0,064	4.683	107.263
07/06/22	22:45	440,6	145,2	105,0	1,26	0,064	4.735	108.462
07/06/22	23:00	440,8	143,3	103,6	1,27	0,064	4.787	109.661
07/06/22	23:15	441,1	142,4	102,9	1,26	0,064	4.838	110.853
07/06/22	23:30	441,5	143,1	103,5	1,26	0,064	4.890	112.053
07/06/22	23:45	440,4	142,8	103,1	1,26	0,064	4.942	113.247
08/06/22	0:00	441,6	142,0	102,8	1,28	0,064	4.994	114.441

Data	Horário	Medição elétrica			Medição de vazão		$\Sigma [2 \times P_e \times \Delta t]$	$\Sigma [(Q_{rl} + Q_{el}) \times \Delta t]$
		U_{L_med} (V)	I_{L_med} (A)	P_e (kW)	Q_{rl} (m^3/s)	Q_{el} (m^3/s)	(kWh)	(m^3)
08/06/22	0:15	442,2	143,9	104,3	1,28	0,064	5.046	115.651
08/06/22	0:30	443,5	141,8	103,1	1,28	0,048	5.097	116.852
08/06/22	0:45	442,4	141,5	102,8	1,27	0,048	5.146	117.964
08/06/22	1:00	443,8	143,3	104,2	1,27	0,048	5.201	119.229
08/06/22	1:15	445,0	143,5	104,7	1,26	0,048	5.253	120.415
08/06/22	1:30	446,0	142,8	104,4	1,26	0,048	5.305	121.603
08/06/22	1:45	446,7	142,7	104,5	1,27	0,048	5.357	122.793
08/06/22	2:00	442,0	144,7	104,9	1,28	0,048	5.409	123.981
08/06/22	2:15	440,5	143,3	103,7	1,27	0,048	5.461	125.169
08/06/22	2:30	440,9	143,9	104,3	1,28	0,048	5.513	126.359
08/06/22	2:45	440,3	144,1	104,3	1,26	0,048	5.565	127.544
08/06/22	3:00	440,5	144,9	104,8	1,27	0,048	5.617	128.732
08/06/22	3:15	439,7	143,6	103,6	1,27	0,048	5.669	129.919
08/06/22	3:30	438,9	144,3	103,9	1,27	0,048	5.721	131.105
08/06/22	3:45	439,7	143,3	103,3	1,26	0,048	5.774	132.292
08/06/22	4:00	438,5	143,5	103,3	1,27	0,048	5.826	133.480
08/06/22	4:15	439,2	145,0	104,6	1,29	0,048	5.878	134.671
08/06/22	4:30	438,4	144,5	104,0	1,27	0,048	5.930	135.858
08/06/22	4:45	437,3	143,9	103,3	1,27	0,049	5.981	137.044
08/06/22	5:00	437,0	144,8	103,7	1,27	0,047	6.033	138.230
08/06/22	5:15	434,8	145,3	103,5	1,28	0,048	6.085	139.418
08/06/22	5:30	439,1	144,1	103,7	1,27	0,048	6.137	140.607
08/06/22	5:45	437,7	144,8	103,8	1,27	0,048	6.189	141.795
08/06/22	6:00	437,3	145,2	104,0	1,27	0,048	6.241	142.983
08/06/22	6:15	434,1	146,5	104,2	1,27	0,048	6.293	144.172
08/06/22	6:30	434,1	145,8	103,7	1,27	0,048	6.345	145.361
08/06/22	6:45	435,7	146,9	104,8	1,28	0,048	6.397	146.548
08/06/22	7:00	434,9	145,8	103,9	1,27	0,048	6.449	147.736
08/06/22	7:15	436,3	145,7	104,1	1,26	0,048	6.501	148.924
08/06/22	7:30	435,6	144,8	103,3	1,27	0,048	6.553	150.111
08/06/22	7:45	437,4	144,9	103,8	1,28	0,048	6.605	151.300
08/06/22	8:00	439,1	145,1	104,3	1,26	0,049	6.656	152.491

Data	Horário	Medição elétrica			Medição de vazão		$\Sigma [2 \times P_e \times \Delta t]$	$\Sigma [(Q_{rl} + Q_{el}) \times \Delta t]$
		U_{L_med} (V)	I_{L_med} (A)	P_e (kW)	Q_{rl} (m^3/s)	Q_{el} (m^3/s)	(kWh)	(m^3)
08/06/22	8:15	438,1	145,6	104,5	1,28	0,048	6.709	153.682
08/06/22	8:30	436,5	144,5	103,2	1,27	0,049	6.761	154.871
08/06/22	8:45	435,0	147,1	104,7	1,28	0,048	6.812	156.060
08/06/22	9:00	435,3	144,7	103,2	1,28	0,048	6.864	157.251
08/06/22	9:15	433,6	145,5	103,3	1,28	0,048	6.916	158.442
08/06/22	9:30	437,8	145,9	104,6	1,28	0,048	6.968	159.634
08/06/22	9:45	435,7	146,8	104,7	1,29	0,048	7.020	160.829
08/06/22	10:00	437,1	145,6	104,2	1,28	0,048	7.072	162.024
08/06/22	10:15	436,1	145,7	104,1	1,28	0,048	7.124	163.223
08/06/22	10:30	436,0	144,6	103,2	1,28	0,048	7.176	164.420
08/06/22	10:45	437,3	143,7	102,8	1,28	0,048	7.228	165.618
08/06/22	11:00	437,4	145,4	104,1	1,30	0,048	7.280	166.816
08/06/22	11:15	435,8	145,9	104,1	1,28	0,048	7.332	168.017
08/06/22	11:30	436,3	145,3	103,8	1,28	0,048	7.384	169.213
08/06/22	11:45	437,4	145,5	104,2	1,28	0,048	7.436	170.409
08/06/22	12:00	438,1	145,2	104,3	1,28	0,048	7.487	171.612
08/06/22	12:15	440,2	144,0	103,8	1,28	0,048	7.539	172.809
08/06/22	12:30	441,6	144,5	104,5	1,29	0,047	7.591	174.010
08/06/22	12:45	442,3	144,7	104,8	1,28	0,048	7.643	175.209
08/06/22	13:00	442,3	142,4	103,0	1,29	0,048	7.695	176.409
08/06/22	13:15	437,7	144,8	103,7	1,27	0,048	7.747	177.611
08/06/22	13:30	437,2	144,6	103,5	1,28	0,048	7.799	178.814
08/06/22	13:45	437,7	146,2	104,8	1,28	0,049	7.851	180.018
08/06/22	14:00	437,4	146,0	104,6	1,28	0,048	7.902	181.220
08/06/22	14:15	436,5	143,9	102,8	1,30	0,049	7.954	182.421
08/06/22	14:30	436,3	143,8	102,6	1,29	0,048	8.006	183.625
08/06/22	14:45	435,9	145,8	104,1	1,28	0,048	8.058	184.826
08/06/22	15:00	437,9	143,0	102,6	1,29	0,048	8.110	186.027
08/06/22	15:15	438,0	144,5	103,7	1,29	0,048	8.162	187.227
08/06/22	15:30	438,5	144,1	103,5	1,28	0,049	8.213	188.428
08/06/22	15:45	439,0	143,8	103,3	1,30	0,048	8.265	189.632
08/06/22	16:00	438,6	143,4	103,0	1,29	0,048	8.317	190.832

Data	Horário	Medição elétrica			Medição de vazão		$\Sigma [2 \times P_e \times \Delta t]$	$\Sigma [(Q_{rl} + Q_{el}) \times \Delta t]$
		U_{L_med} (V)	I_{L_med} (A)	P_e (kW)	Q_{rl} (m^3/s)	Q_{el} (m^3/s)	(kWh)	(m^3)
08/06/22	16:15	437,2	144,7	103,5	1,29	0,048	8.369	192.035
08/06/22	16:30	436,8	143,9	102,9	1,29	0,048	8.420	193.233
08/06/22	16:45	437,4	145,7	104,3	1,28	0,048	8.472	194.432
08/06/22	17:00	445,3	141,0	102,7	1,28	0,048	8.524	195.632
08/06/22	17:15	440,8	143,0	103,2	1,29	0,048	8.575	196.831
08/06/22	17:30	439,7	144,8	104,5	1,30	0,048	8.627	198.034
08/06/22	17:45	439,2	145,5	104,7	1,29	0,048	8.679	199.235
08/06/22	18:00	438,9	143,4	103,2	1,31	0,048	8.731	200.440
08/06/22	18:15	438,0	143,6	103,2	1,29	0,041	8.783	201.644
08/06/22	18:30	437,8	144,3	103,6	1,29	0,041	8.835	202.844
08/06/22	18:45	436,5	144,1	103,2	1,30	0,040	8.887	204.047
08/06/22	19:00	437,6	145,2	104,3	1,31	0,040	8.938	205.248
08/06/22	19:15	437,7	145,2	104,2	1,30	0,040	8.990	206.450
08/06/22	19:30	438,5	143,8	103,3	1,30	0,041	9.042	207.655
08/06/22	19:45	439,5	142,9	102,7	1,29	0,040	9.094	208.853
08/06/22	20:00	439,9	143,0	103,0	1,29	0,040	9.145	210.052
08/06/22	20:15	438,3	144,8	103,9	1,29	0,040	9.197	211.255
08/06/22	20:30	439,7	144,7	104,2	1,29	0,041	9.249	212.454
08/06/22	20:45	442,1	143,3	103,7	1,29	0,040	9.301	213.652
08/06/22	21:00	443,0	143,7	104,2	1,28	0,040	9.353	214.853
08/06/22	21:15	443,2	142,2	103,2	1,29	0,040	9.405	216.052
08/06/22	21:30	442,4	144,7	104,9	1,30	0,040	9.457	217.253
08/06/22	21:45	445,6	141,5	103,2	1,29	0,040	9.508	218.451
08/06/22	22:00	441,2	144,3	104,4	1,28	0,040	9.560	219.646
08/06/22	22:15	438,2	143,9	103,3	1,30	0,040	9.612	220.844
08/06/22	22:30	437,7	144,3	103,5	1,29	0,040	9.664	222.040
08/06/22	22:45	438,1	146,2	105,1	1,30	0,040	9.716	223.240
08/06/22	23:00	440,2	143,9	104,0	1,29	0,040	9.768	224.435
08/06/22	23:15	441,1	143,4	103,7	1,28	0,040	9.821	225.634
08/06/22	23:30	441,6	143,3	103,9	1,27	0,040	9.873	226.831
08/06/22	23:45	440,6	142,6	103,1	1,30	0,040	9.924	228.026
08/06/22	23:59	442,3	142,3	103,3	1,28	0,040	9.973	229.144