
Study on the Implementation of a PID Controller in a Sanitation System

Estudo da Implantação de um Controlador PID em um Sistema de Saneamento

Gabriel Gonçalves Pereira¹, Stefani Caroline Leal de Freitas¹, Lucas de Freitas Romão² e Adélcio Maximiano Sobrinho¹

¹ Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Tocantins, Brasil

² Corsan, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil

Data de recebimento do manuscrito: 10/11/2025

Data de aceitação do manuscrito: 19/03/2026

Data de publicação: 25/03/2026

Resumo— Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas, implementadas e aprimoradas para melhorar a eficiência operacional e otimizar processos em diferentes setores da economia. Uma das áreas impactadas por esse avanço é a do saneamento, que conta com equipamentos que variam desde os mais robustos, como motores, bombas e geradores, até dispositivos mais sensíveis, como dosadoras de produtos químicos e sensores para o gerenciamento de processos. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo principal apresentar a aplicação da tecnologia de controle e monitoramento PID (Proporcional Integral Derivativo), analisando, sob uma perspectiva técnico-econômica, os efeitos da implantação de um controlador PID em uma unidade operacional de saneamento localizada em uma região com características semelhantes às das regiões Centro-Oeste e Norte. Sob o ponto de vista técnico são consideradas características como a vazão da rede de tratamento, a manutenção dos equipamentos e os ajustes necessários para seu pleno funcionamento. Sob o ponto de vista econômico são feitos estudos comparativos da redução de custos em energia consumida (kWh) na operação, antes e após a implantação do sistema controlador. Por meio destas análises serão destacados e discutidos os impactos da implantação do sistema PID, bem como potenciais pontos de melhoria para eficiência da operação.

Palavras-chave— Eficiência operacional, Saneamento básico, Controlador PID, Perspectiva técnico-econômica, Manutenção, Otimização de processos

Abstract— Several technologies have been developed, implemented, and improved to enhance operational efficiency and optimize processes in different sectors of the economy. One of the areas impacted by this advancement is sanitation, which employs equipment ranging from robust devices such as motors, pumps, and generators to more sensitive instruments such as chemical dosing systems and sensors used for process management. In this context, the main objective of this study is to present the application of PID (Proportional-Integral-Derivative) control and monitoring technology, analyzing, from a technical and economic perspective, the effects of implementing a PID controller in an operational sanitation unit located in a region with characteristics similar to those of Brazil's Midwest and Northern regions. From a technical standpoint, parameters such as flow rate in the treatment network, equipment maintenance, and the adjustments required for proper operation are considered. From an economic standpoint, comparative studies were conducted to evaluate the reduction in operational energy consumption (kWh) before and after the implementation of the control system. Through these analyses, the impacts of the PID system implementation are highlighted and discussed, along with potential improvement points aimed at increasing operational efficiency.

Keywords— Operational Efficiency, Basic Sanitation, PID Controller, Technical-Economic Perspective, Maintenance, Process Optimization

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil ainda se encontra distante das metas do novo marco legal do saneamento (Lei nº

14.026/2020), que prevê 99% de água tratada e 90% de coleta e tratamento de esgoto até 2033. A lei reforça a universalização por meio de barreiras de acesso a recursos federais, incentivo à privatização e licitação de concessões, além de maior autonomia financeira via tarifas [1, 2]. Nesse contexto, o setor enfrenta desafios crescentes de eficiência operacional e energética.

Historicamente, o Estado arcou com cerca de 85% dos

Dados de contato: Gabriel Pereira, goncalves.gabriel1@uft.edu.br

custos do saneamento entre 1950 e 1970, mas os incentivos tarifários diminuíram ao longo do tempo [3]. Hoje, o setor depende cada vez mais de sistemas de bombeamento (em vez de gravidade), elevando o consumo de energia elétrica e a necessidade de maior eficiência energética [4, 5].

Diante disso, com o avanço da globalização, a adoção dos conceitos da Indústria 4.0 tem sido cada vez mais introduzida no ambiente industrial, incluindo o setor de saneamento básico. Essa revolução tecnológica visa aprimorar os processos industriais por meio de ferramentas como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), automação de processos e monitoramento contínuo. Tais tecnologias contribuem para a otimização dos processos de coleta, tratamento e destino final do esgoto, além de promoverem maior eficiência e qualidade no serviço prestado à população. A integração desses sistemas automatizados possibilita que as equipes responsáveis pelo planejamento operacional e pela manutenção se concentrem em atividades estratégicas, priorizando manutenções preventivas e, conseqüentemente, reduzindo o índice de falhas, os custos com novos equipamentos e as horas-homem despendidas em atividades emergenciais [6].

Com a Indústria 4.0, tecnologias como IoT, automação e monitoramento contínuo têm otimizado processos de coleta, tratamento e destino de esgoto, permitindo maior foco em manutenções preventivas e redução de falhas e custos [6]. Nesse contexto, o controlador PID surge como solução promissora para estabilidade e eficiência energética no saneamento básico [7].

Baseado nisso, o presente trabalho tem como objetivo geral apresentar a aplicação da tecnologia de controle e monitoramento PID. Como objetivo específico, este trabalho visa analisar sob uma perspectiva técnico-econômica, os efeitos da implantação de um controlador PID em uma unidade operacional de saneamento de esgoto, especificamente em uma Estação Elevatória de Esgoto (EEE), em um local com características de clima e topografia semelhantes aos das regiões centro-oeste e norte, como os estados do Mato Grosso e Tocantins.

No decorrer da pesquisa, foi adotada uma metodologia composta por quatro etapas interligadas. Inicialmente, é realizada uma descrição detalhada do sistema de saneamento estudado, considerando aspectos como o tamanho da infraestrutura, os equipamentos empregados (por exemplo, bombas, elementos de sucção e do recalque, sistemas de tratamento e armazenamento) e as variáveis monitoradas, dentre as quais se destacam vazão, nível de líquidos e consumo energético da unidade. Em seguida, foi feita uma revisão bibliográfica dos controladores PID, para que dessa forma seja possível apresentar as especificações técnicas do controlador PID escolhido, no qual possibilita uma resposta adequada às variações operacionais do sistema, garantindo, assim, a estabilidade e eficiência no controle.

Por fim, é estabelecido um conjunto de critérios de avaliação técnico-econômica, os quais considerarão o desempenho operacional, a redução do consumo energético e a diminuição dos desperdícios, além da análise da economia em kWh decorrente da adoção do controlador PID.

Para a condução desta metodologia, são empregadas

ferramentas de monitoramento digital, estudo de dados oriundos de informações como a vazão do tratamento de esgoto, proporcionando uma abordagem robusta e integrada para otimizar o sistema de saneamento e justificar a escolha do controlador PID como alternativa viável e eficaz.

Dessa maneira, este trabalho está estruturado em seis capítulos, que relacionam os objetivos definidos inicialmente com os resultados alcançados. A Seção I – Introdução apresenta o tema abordado neste estudo, além de estabelecer os objetivos e os resultados esperados. Também são expostas as principais características da pesquisa, permitindo uma compreensão clara do escopo proposto.

Na Seção II – Controladores PID, é apresentado o funcionamento dos controladores PID, suas aplicações em sistemas industriais e no setor de saneamento, bem como os benefícios e limitações dessa tecnologia.

Em seguida, a Seção III – Metodologia detalha as características técnicas do sistema analisado e os critérios adotados para a avaliação do objeto de estudo deste trabalho.

Com a base teórica estruturada, a Seção IV – Análise Técnico-Econômica tem como objetivo expor a avaliação do desempenho do sistema antes e depois da implementação do controlador PID. No aspecto técnico são analisados indicadores como consumo energético, estabilidade do sistema, tempo de resposta e necessidades de manutenção. No aspecto econômico, são discutidos os custos de implantação, a economia gerada, o impacto na vida útil dos equipamentos e nos custos com manutenção.

Diante dessas análises, a Seção V – Resultados e Discussões apresenta os benefícios diretos e indiretos observados após a implementação do controlador PID, além das limitações encontradas ao longo do estudo

Por fim, na Seção VI – Conclusão, são sintetizadas as principais informações sobre a viabilidade técnica e econômica da implantação do controlador PID. Além disso, são elaboradas recomendações para empresas do setor de saneamento e sugestões para pesquisas futuras.

II. CONTROLADORES PID

O controlador PID gera um sinal de controle linear a partir do desvio entre o valor definido no sensor (*set-point*) e a variável de processo, reunindo três modos de ação: proporcional, integral e derivativo. Sua forma matemática ideal é dada por

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

$$\hat{P}_I(w_i \vee h_i^k) = \sum_{j=0}^{k-1} \lambda_j \hat{P}(w_i \vee h_i^j)$$

Na Eq. (1), $e(t)$ é o erro, ou seja, *set-point* menos variável do processo, K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo de integração (com $K_i = \frac{K_p}{T_i}$), e T_d é o tempo derivativo (com $K_d = K_p \times T_d$).

O diagrama de blocos correspondente a essa lógica de controle ilustrado na Figura 1.

O algoritmo proporcional está diretamente relacionado às mudanças instantâneas do erro – quanto maior K_p é maior a

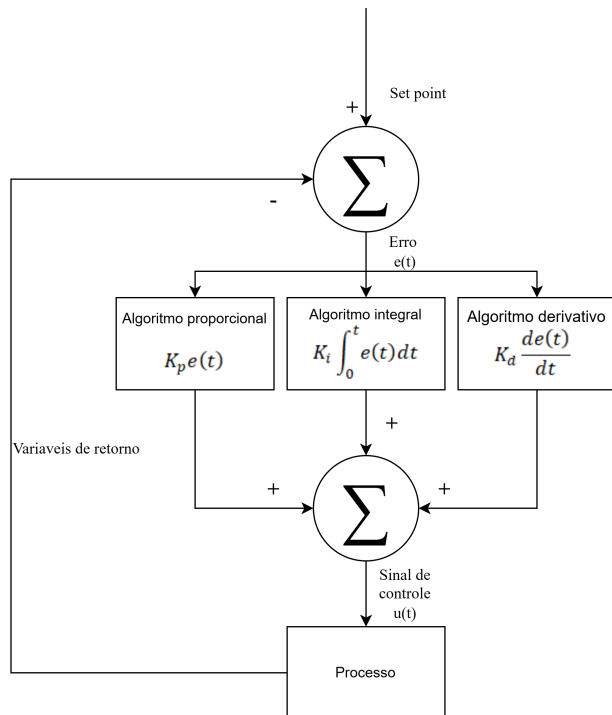


Figura 1: Diagrama de bloco do processo de controle usando PID [8].

resposta, mas um ganho excessivo pode desestabilizar o sistema. O algoritmo integral corrige desvios persistentes ao acumular o erro ao longo do tempo, reduzindo o *offset* em regime permanente. Já o algoritmo derivativo antecipa variações rápidas da variável de processo, melhorando o tempo de resposta e a estabilidade do sistema [8]. Por sua simplicidade estrutural e eficácia, controladores PID são amplamente usados em manufatura, automação industrial, controle de prensas hidráulicas, linhas de montagem, robótica industrial (onde regulam velocidades e torques) e no acionamento de inversores de frequência para controle de velocidade de motores [7, 8]. Dessa forma, em EEE o PID envolve a orquestração de três elementos principais – o conjunto motobomba, os inversores de frequência (*drives*) e o Controlador Lógico Programável (CLP) com seus sensores – todos sob uma lógica de malha fechada que visa manter o sistema estável, eficiente e robusto a perturbações [9].

O conjunto motobomba (motor + bomba centrífuga radial) eleva o esgoto superando a altura manométrica e perdas de carga. A curva $H \times Q$ própria de cada bomba exige análise hidráulica para seleção adequada [4, 9].

Cada modelo de bomba possui uma curva característica $H \times Q$ própria, de modo que é imprescindível analisar a instalação hidráulica local para escolher a bomba ideal [4]. As bombas classificam-se em volumétricas (deslocamento positivo) e turbobombas (bombas de fluxo). O foco aqui são as turbobombas, que têm rotor com pás impulsionadas por eixo motriz – destacam-se as turbobombas centrífugas radiais, com fluxo perpendicular ao eixo de rotação, como demonstrado na Figura 2, que são o tipo predominante no saneamento, sendo comercializados por marcas como KSB e IMBIL [8].

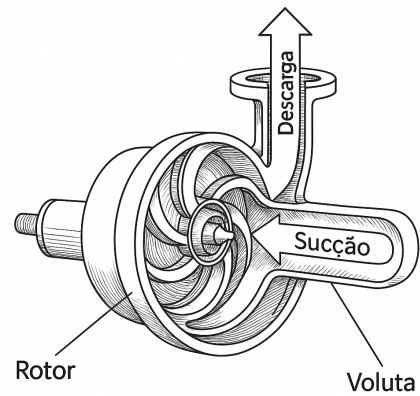


Figura 2: Bomba Radial [9].

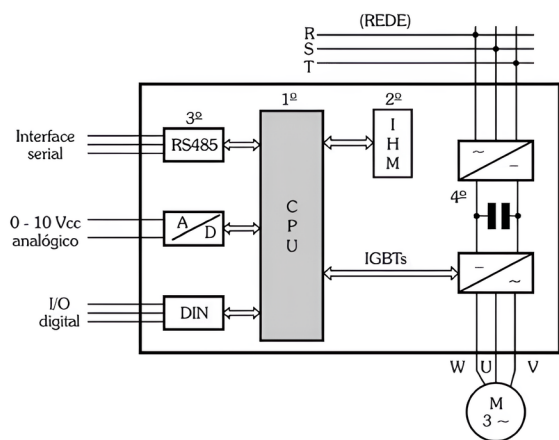


Figura 3: Blocos componentes do inversor de frequência [11].

Para acionar o conjunto motobomba, emprega-se o inversor de frequência (*drive*), que permite variar frequência, torque e velocidade de acordo com a necessidade, aumentando a vida útil do equipamento, reduzindo perdas de pressão e oferecendo proteção elétrica quando bem dimensionado [10]. Estruturalmente, o inversor compõe-se de unidade central de processamento (CPU), que armazena parâmetros e comanda os pulsos de disparo aos Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT's) do módulo de saída, responsáveis por inverter a tensão do barramento CC em CA. A Interface Homem-Máquina (IHM) exibe tensões, correntes e frequências e permite configurações locais ou remotas [11]. Além disso, o *drive* aceita comando via sinal analógico (tensão VCC) para ajuste de velocidade e sentido de rotação, ou via entradas digitais parametrizadas em *software* de cada fabricante (por exemplo, WEG CFW ou ABB) [11].

Na etapa de potência, o inversor retifica o sinal CA da rede em CC, filtra-o no “barramento CC” e, por modulação PWM - *Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso -, reconverte em CA quase senoidal, resultando numa fonte CA de frequência variável, conforme Figura 3 [11].

O controle digital desse acionamento é feito por CLP, elemento-chave na automação PID. O CLP recebe sinais de sensores, botoeiras e chaves fim-de-curso em suas entradas, processa a lógica de controle na CPU e aciona atuadores -

equipamentos como motores elétricos - pelas saídas, reiniciando continuamente esse ciclo de varredura [12]. A comunicação do CLP com o sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) permite ao operador, no Centro de Controle Operacional (CCO), monitorar níveis, vazões, estados das bombas e emitir comandos remotos – processo também chamado de telemetria [9].

A rede de automação transporta estes dados por linhas telefônicas, rádio, cabos elétricos ou fibra óptica, empregando protocolos como Modbus ou Ethernet/IP. A topologia da rede pode ser barramento (todos em paralelo), anel (em série circular) ou estrela (nós com *links* dedicados), definindo a confiabilidade e robustez do sistema [9].

Embora o PID seja versátil e de fácil implementação, ele apresenta limitações: a ação derivativa pode amplificar ruídos de medição tornando o controle instável – especialmente em sistemas com inversores de frequência, cuja comutação gera harmônicos que afetam sensores ultrassônicos e podem corromper os sinais recebidos pelo CLP [8, 9].

a. Trabalhos relacionados e lacuna da pesquisa

Observa-se que a maioria dos estudos brasileiros e internacionais utiliza dados de estações reais ou simulações, porém poucos avaliam o impacto do PID em regiões com alta sazonalidade pluviométrica (Centro-Oeste/Norte), onde a infiltração pluvial altera drasticamente a vazão e o ponto de operação das bombas. O presente trabalho preenche essa lacuna ao analisar, com dados adaptados de unidade real, o efeito do PID em condições climáticas semelhantes às de Tocantins e Mato Grosso. A Tabela 1 apresenta uma comparação selecionada de trabalhos relevantes, destacando o tipo de controle, economia energética reportada, contexto de aplicação e principais limitações.

III. METODOLOGIA

O Sistema de Esgoto Sanitário (SES) brasileiro adota, majoritariamente, o modelo separador absoluto, no qual águas residuais de residências e indústrias são conduzidas juntamente com as águas de infiltração nas tubulações, enquanto as águas pluviais são captadas por um sistema de drenagem independente, evitando comprometimento do tratamento de esgoto e danos às estruturas da rede de coleta [13, 14]. Esse SES é composto por diversas unidades interrelacionadas, que são a: rede coletora, interceptor, emissário, sifão invertido, corpo de água receptor, estação elevatória e estação de tratamento, cada qual dimensionada conforme as características locais, podendo variar mesmo dentro de uma mesma cidade [13].

A Estação Elevatória de Esgoto (EEE) eleva o esgoto do poço de sucção ao recalque, conforme ABNT NBR 12208:2020 [15]. Integra estruturas elétrica (painéis, sensores, motobombas), hidráulica (poço, tubulações, válvulas) e civil (gradeamento, caixa de areia, triturador) [13, 16].

A EEE analisada é uma estação hipotética, com características semelhantes às de uma estação classificada como de porte médio (capacidade entre 50 e 500 L/s), com poço de sucção a seco, localizada em uma região com clima

e topografia semelhantes às das regiões Centro-Oeste e Norte, como os estados de Mato Grosso e Tocantins. Seus principais equipamentos elétricos estão listados na Tabela 2.

As variáveis de interesse, acompanhadas por telemetria, correspondem ao status das bombas e do gerador, além do nível do poço, possibilitando ao CLP a execução do controle PID com base nos sinais dos *drives* e do sensor de nível. Esses equipamentos enquadram-se mais adequadamente como dispositivos responsáveis pela automação, conforme a Tabela 3.

Para fins de controle, é necessário compreender que o nível do poço de sucção deve se manter dentro de limites mínimo e máximo durante a operação dos equipamentos sob atuação do controlador PID. O nível mínimo é estipulado com base na maior altura manométrica em que a bomba pode operar sem a entrada de ar; por isso, é fundamental conhecer a altura da tubulação de sucção. Já o nível máximo é definido pela altura máxima de esgoto que o poço de sucção suporta, sem que ocorra extravasamento.

Outro fator importante para que o controlador PID opere em sua plena capacidade no sistema em que for integrado é a adequação da infraestrutura de rede para sua implantação. Dessa forma, a rede de comunicação de dados e seus respectivos equipamentos, como telas, modems ou rádios, devem estar devidamente instalados no sistema. Por esse motivo, os custos relacionados a essa infraestrutura não serão considerados

O processo de implementação do controlador no sistema inicia-se pela verificação das condições elétricas e mecânicas da EEE, garantindo que o painel do inversor suporte a carga do conjunto motobomba e que a instalação elétrica atenda aos requisitos de potência.

O controlador PID assume a função de regular a rotação do motor ao ajustar a frequência fornecida pelo inversor conforme as variações do nível no poço de sucção, informado pelo sensor, mantendo o esgoto entre limites máximos e mínimos estabelecidos (Valor de referência ou *set-point*). Por se tratar de um sistema em malha fechada, no qual a variável controlada (nível de esgoto no poço de sucção) retorna à entrada do controlador, que altera a variável manipulada (frequência do inversor) para manter a rotação da bomba dentro dos parâmetros definidos [9].

Sendo assim, com base em dados de unidades operacionais reais semelhantes à hipotética analisada – nas quais houve a implantação do controlador PID – é possível avaliar seu impacto sem a necessidade de simulação computacional.

Para avaliar o desempenho técnico-econômico da EEE antes e depois da implantação do PID, adota-se a seguinte metodologia: de um ponto de vista técnico, consideram-se consumo energético, vazão da EEE ou volume tratado, redução das variações no sistema e estabilidade em operação, tempo de resposta do sistema e influência das condições climáticas (chuvas); na vertente econômica, serão analisados o custo teórico de implantação (hipotético), impacto no horas-homem de manutenção, economia gerada em kWh do sistema de automação responsável pelo PID e eficiência energética (kWh/m³) em um intervalo amostral de 12 meses antes e depois. Dessa forma, será possível observar o impacto das variações climáticas na operação da EEE antes e após a adoção do controle PID.

Os dados utilizados foram obtidos de uma unidade

TABELA 1: COMPARAÇÃO DE ESTUDOS RECENTES SOBRE CONTROLE PID/VFD EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE SANEAMENTO E ABASTECIMENTO.

Autor / Ano	Tipo de Controle	Economia Energética Reportada	Contexto / Região	Principais Limitações / Observações
Soriano (2023) [3]	PID + otimização em reservatórios	Até 15–20% em reservatórios	Abastecimento Urbano Brasil (Campinas, SP)	Foco em reservatórios; não aborda estações elevatórias de esgoto com alta variação de vazão
Nascimento et al. (2024) [4]	Gestão energética geral (inclui VFD)	Redução média de 10–25%	Empresas brasileiras de saneamento	Análise ampla; não detalha controle PID específico nem impacto em infiltração pluvial
Alexandre (2024) [10]	VFD em diferentes configurações	15–40% dependendo da configuração	Estações elevatórias de água – Brasil (Londrina, PR)	Aplicado a água potável; não considera esgoto corrosivo nem sazonalidade pluviométrica elevada
Almeida et al. (2024) [6]	IoT + automação inteligente	Otimização operacional (não quantificada em %)	Elevatórias de esgoto – Senhor do Bonfim, BA	Ênfase em monitoramento IoT; não foca em controle PID clássico nem em análise kWh/m ³ detalhada
Chen (2024) [7]	PID clássico e avançado (revisão)	5–30% em aplicações industriais	Diversos setores	Revisão geral; poucas aplicações específicas ao saneamento em regiões tropicais úmidas

TABELA 2: PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DA EEE.

Equipamentos	Descrição Técnica
Conjunto Motobomba	3 conjuntos
Motor Elétrico Assíncrono	Potência: 100 CV Frequência: 60 Hz Tensão: 220/380/440 V Tensão de operação: 380V Corrente nominal: 246/142/123 A Polos: 4 Categoria: N Rotação: 3600 rpm
Bomba	Vazão: 300 m ³ /h a 100 m ³ /h Rotação: 650rpm a 1250 rpm Altura: 7,2 m a 30 m Tipo: Autoescorvante radial
Inversor de frequência	Quantidade: 3 Tensão de alimentação: 380 V Potência: 100 CV Corrente nominal: 142 A Quantidade de entrada digitais: 6 Protocolos de comunicação: Modbus ou EtherNet/IP
CLP	Quantidade: 1 Tensão nominal de alimentação: 24Vcc Frequência de rede: 50/60Hz Número de entradas digital: 14 Número de módulos de expansão: 7
Sensor de Nível	Quantidade: 1 Tipo: Sonda Faixa de 0 a 10 m.c.a

operacional real de empresa privada, com autorização formal para uso acadêmico. Para preservar a confidencialidade contratual, todos os valores absolutos (consumo de energia, volume tratado, ordens de serviço e tempo de manutenção) sofreram modificações proporcionais lineares idênticas em todos os períodos pré e pós-instalação (mesmo fator multiplicativo aplicado a cada série temporal).

TABELA 3: EQUIPAMENTOS DESTINADOS A AUTOMAÇÃO DA EEE.

Equipamentos	Principais itens
Painel de automação	CLP, comunicação GPRS, relés de comando de status, e cartão analógico de expansão
Equipamentos de medição	Sonda de nível hidrostático 0 a 10mca e sinal analógico 4 a 20mA, indicador de processo
Cabeamento	Cabos de comunicação modbus, isolador óptico e protetor DPS

Essa transformação preserva integralmente as proporções, tendências, percentuais de variação e relações entre variáveis, não alterando as conclusões técnicas ou econômicas do estudo.

IV. ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA

A análise foca no impacto do PID no consumo energético e manutenção da EEE, atenuando gastos com energia e permitindo monitoramento preciso. Fatores externos como tarifa de esgoto não são considerados.

Foram analisados os dados adaptados de uma estação real, respeitando os máximos e mínimos, referentes ao período de pré-instalação – Mês 1 a Mês 12 – e ao período de pós-instalação – Mês 1 a Mês 12 –, ambos referentes a épocas com as mesmas características climáticas, para assim obter uma comparação do impacto da implantação, após os devidos ajustes de calibração do sistema, em períodos climáticos equivalentes. Essa análise será realizada em uma unidade hipotética com características semelhantes às de uma unidade real, possibilitando a observação do efeito do PID sob diferentes condições operacionais.

a. Análise de Eficiência

Com todos os parâmetros estabelecidos, para avaliar a viabilidade do investimento é necessário começar pela

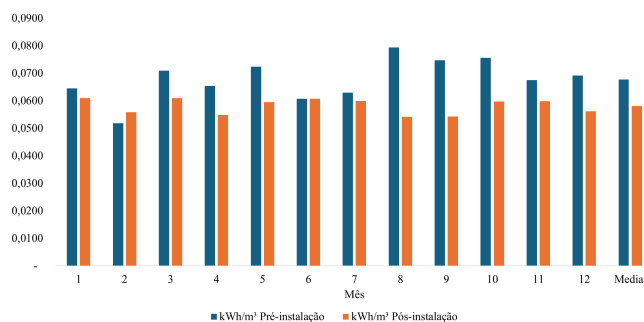


Figura 4: Eficiência (kWh/m³).

análise do consumo de energia (kWh) que uma EEE apresenta ao longo dos meses, juntamente com o volume de esgoto bombeado (m³). Em perspectiva mensal, é possível observar o consumo energético e o volume de esgoto no período amostrado nas Tabela 4 e Tabela 5.

TABELA 4: CONSUMO TOTAL POR MÊS (KWH).

Mês	Pré-instalação	Pós-instalação
1	45.362,23	48.961,05
2	44.138,59	46.400,47
3	60.239,55	50.590,79
4	60.459,97	50.353,36
5	65.089,82	54.072,48
6	52.433,18	53.390,51
7	47.635,44	50.183,69
8	55.103,97	43.947,60
9	57.029,04	45.933,25
10	57.088,78	49.070,06
11	55.412,97	52.066,39
12	55.547,90	47.412,03

TABELA 5: VOLUME DE ESGOTO TOTAL POR MÊS (M³).

Mês	Pré-instalação	Pós-instalação
1	703.546	802.752
2	850.799	830.199
3	849.543	830.319
4	925.158	918.679
5	898.735	908.139
6	862.819	879.095
7	757.087	836.502
8	694.381	810.195
9	763.400	845.918
10	754.857	821.591
11	821.454	869.863
12	803.262	843.154

A eficiência energética (kWh/m³) foi calculada relacionando consumo e volume bombeado (Fig. 4). A média caiu de 0,0677 kWh/m³ (pré) para 0,0581 kWh/m³ (pós), redução de 14,17%. Apesar de variações sazonais, o pós-instalação mostra maior estabilidade.

Ao realizar a análise da eficiência energética, é possível observar que o consumo médio da EEE, em kWh/m³, no período pré-instalação é, em sua maioria, mais alto do que no período pós-instalação. Além disso, ao se calcular a média do período pré-instalação, considerando-a como valor base, e do período pós-instalação, obtêm-se, respectivamente, os valores de 0,0677 kWh/m³ e 0,0581

TABELA 6: VOLUME DE CHUVAS (MM).

Mês	Pré-instalação	Pós-instalação
1	293,60	117,80
2	134,20	358,80
3	38,80	322,20
4	360,80	271,20
5	123,80	225,40
6	41,20	19,00
7	-	-
8	-	-
9	23,80	-
10	24,00	1,00
11	64,40	216,40
12	78,60	155,20

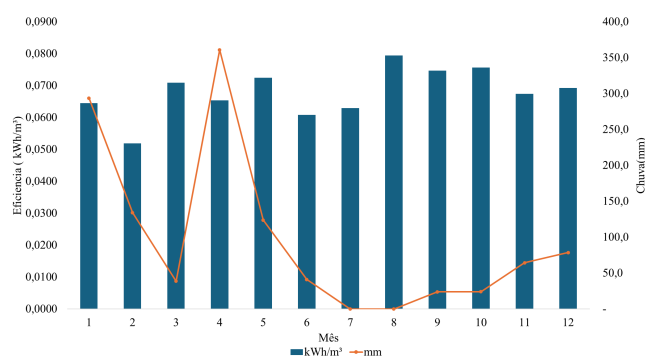


Figura 5: Eficiência (kWh/m³) x Chuva (mm) pré-instalação.

kWh/m³, o que indica uma redução de 14,17% entre os dois períodos.

Contudo, apesar dessa redução, é perceptível que ambos os períodos apresentam variações sazonais, com picos e vales que podem estar relacionados a fatores externos. Além disso, em alguns meses, a diferença entre os períodos pré-instalação e pós-instalação é mínima ou inexistente.

Dessa forma, apesar da importância da relação apresentada na Figura 4 para quantificar o desempenho da EEE, outros fatores externos podem influenciar esse resultado. Entre estes fatores estão as precipitações pluviométricas que incidem sobre a estação. Utilizando dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [17], foram obtidas informações para uma região com clima e topografia semelhantes às das regiões Centro-Oeste e Norte (por exemplo, estados como Mato Grosso e Tocantins), permitindo observar a precipitação em mm, como demonstrado na Tabela 6.

Com base nos dados de precipitação pluviométrica, foram geradas as Figuras 5 e 6, que permitem analisar a eficiência energética mensal em conjunto com os índices de chuva. As escalas do eixo y foram ajustadas o máximo possível para facilitar a comparação direta entre os períodos pré e pós-instalação, apesar das diferenças nos valores absolutos. Essa apresentação destaca visualmente a maior estabilidade do consumo específico (kWh/m³) observada após a implantação do controlador PID.

Embora o período pós-instalação tenha registrado 42% mais precipitação, o indicador kWh/m³ médio caiu 14,17%. Isso demonstra que o controle PID amorteceu o impacto da infiltração pluvial, mantendo o sistema mais próximo do ponto ótimo de operação da bomba (curva $H \times Q$).

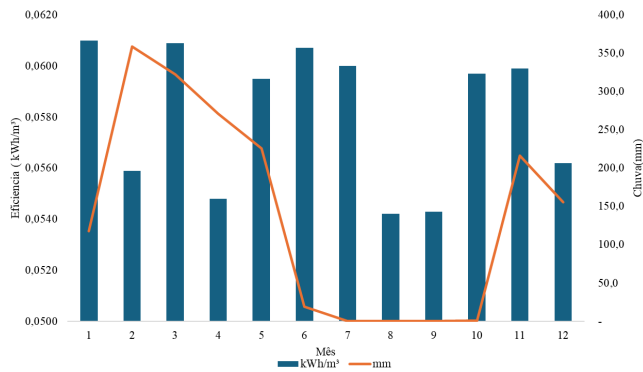


Figura 6: Eficiência (kWh/m³) x Chuva (mm) pós-instalação.

Essas figuras elucidam melhor o impacto que os períodos de precipitação têm no desempenho de uma elevatória de esgoto, visto que, nos períodos de maior incidência pluviométrica, os valores de kWh/m³ tendem a ser maiores. Ao comparar os períodos, percebe-se que, na Figura 5, o sistema apresenta uma eficiência energética inferior, mesmo em meses com menor volume de chuvas, como o mês 8, enquanto, na Figura 6, essa situação se mostra mais estável.

Ademais, o kWh/m³ máximo pós-instalação (0,0620 kWh/m³) é menor que o pré-instalação (0,0794 kWh/m³), sugerindo que o sistema contribui para reduzir o impacto das chuvas. Considerando que o total de chuvas no período anterior a instalação foi de 1.183,2 mm, enquanto no período posterior alcançou 1.687,0 mm (aproximadamente 42% a mais), o sistema parece amortecer esse efeito, promovendo uma operação mais eficiente e estável ao longo dos meses.

b. Análise relacionadas a manutenção

Além desse indicador, é necessário avaliar o impacto nas manutenções, especialmente nas corretivas, decorrentes da instalação do PID. Para tanto, considerou-se o custo de mão de obra técnica: adotou-se, como referência, o custo médio mensal de um técnico de manutenção eletromecânica – incluindo periculosidade, benefícios e encargos – que, segundo especialistas da área é de, em média, R\$ 8.300,00 por mês, obtendo para uma jornada de 220 horas o valor de R\$37,73 por hora trabalhada.

A partir desse valor da hora trabalhada e da coleta da quantidade média de ordens de serviço (OS) e do tempo despendido em atividades de manutenção preventiva e corretiva, é possível verificar, nas Tabelas 7 e 8, se a equipe de manutenção está gastando mais tempo em reparos corretivos ou em ações preventivas.

Semelhante ao indicador de eficiência, é necessário observar se as chuvas influenciaram o tempo gasto nas atividades de manutenção. Assim, as Figuras 7 e 8 demonstram o tempo médio que os funcionários de manutenção dedicaram às atividades corretivas e preventivas antes e depois da instalação do sistema de controle.

Por meio das imagens, é possível observar que os períodos de estiagem apresentam um menor índice de corretivas, em comparação com a maioria dos meses que exibem picos de precipitação.

A Figura 8 demonstra que a implantação do PID contribuiu para a redução de corretivas nos meses 1 ao 5;

TABELA 7: QUANTIDADE ESTIMADA DE ORDENS DE SERVIÇO POR TIPO DE ATIVIDADE.

Mês	Preventiva Pré-instalação	Corretiva Pré-instalação	Preventiva Pós-instalação	Corretiva Pós-instalação
1	13	19	18	0
2	12	52	5	2
3	12	10	20	0
4	21	10	4	0
5	1	1	10	13
6	9	0	12	0
7	5	0	12	0
8	10	0	0	15
9	12	0	20	0
10	3	0	0	6
11	12	1	16	54
12	18	0	12	6

TABELA 8: QUANTIDADE ESTIMADA DE MANUTENÇÃO POR TIPO DE ATIVIDADE.

Mês	Preventiva Pré-instalação	Corretiva Pré-instalação	Preventiva Pós-instalação	Corretiva Pós-instalação
1	11,48	67,00	17,67	0,00
2	7,25	171,52	6,25	16,00
3	6,17	28,57	12,70	0,00
4	17,80	37,32	2,83	0,00
5	1,00	2,00	10,28	60,62
6	3,33	0,00	29,33	0,00
7	18,00	0,00	12,87	0,00
8	7,70	0,00	0,00	84,77
9	8,87	0,00	14,30	0,00
10	5,00	0,00	0,00	14,85
11	13,15	6,00	13,65	176,95
12	0,00	0,00	9,08	3,60

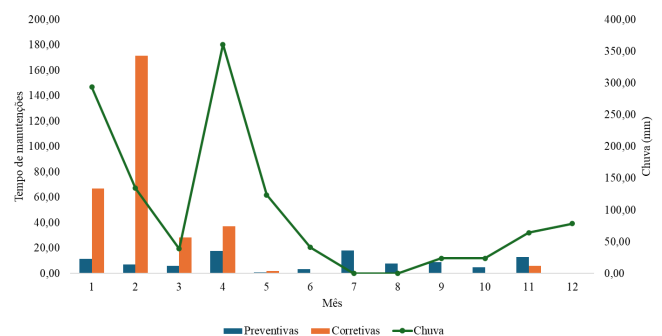


Figura 7: Tempo utilizado em manutenção x Chuva (mm) Pré-instalação.

contudo, possivelmente devido a outros fatores operacionais – tais como tensão inadequada, vibração excessiva e problemas de lubrificação – que também podem aumentar o número de intervenções corretivas [18], ocorreu um incremento nas atividades de reparo em meses com menor índice de chuvas.

Com base nas Tabelas 7 e 8, que mostram o quantitativo de OS e o tempo gasto, estima-se um aumento de 14,21% em Hora-Homem, resultando no acréscimo de R\$ 1.674,46 entre os períodos.

Dessa maneira, o aumento de ordens corretivas em

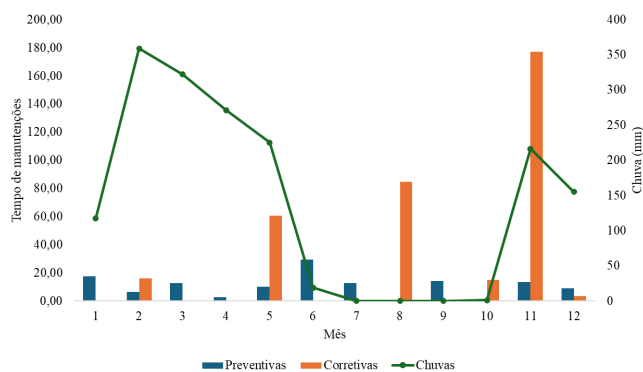


Figura 8: Tempo utilizado em manutenção x Chuva (mm) Pós-instalação.

TABELA 9: CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS DESTINADOS A AUTOMAÇÃO DA EEE.

Equipamentos automação	Quantidade	Valor Total
Painel de automação com CLP Schneider, comunicação GPRS ABS CEL X, relés de comando de status, e cartão analógico de expansão	1	R\$ 37.750,94
Sonda de nível hidrostático 0 a 10mca e sinal analógico 4 a 20mA, indicador de processo MEGGA	1	R\$ 1.769,50
Cabos de comunicação modbus, isolador óptico e protetor DPS Clamper	1	R\$ 3.000,00
Serviço de mão de obra de instalação e configuração do sistema	1	R\$ 10.000,00
Total		R\$ 52.520,44

períodos posteriores à implantação pode decorrer de múltiplos fatores correlacionados que afetaram os indicadores, independentemente da presença do controlador. Assim evidenciando que o controlador não tem um impacto significativo na redução de corretivas e em tempo gasto de manutenção.

c. Estimativa de custo para implantação

Ao compreender o impacto, especialmente sobre o consumo de energia, decorrente da utilização do PID, torna-se necessário calcular o custo estimado para que seja realizado essa melhoria. Para isso, consideram-se valores de mercado de marcas de referência em automação (por exemplo, Schneider, ABB e MEGGA), permitindo obter uma previsão do custo de implantação de um sistema de automação em uma EEE conforme o modelo deste estudo. A Tabela 9 apresenta a média de valores que tal implantação tenderia a custar.

Esses valores podem ser atenuados, caso a implantação do sistema de controle seja realizada por uma equipe própria. Contudo, para que isso seja possível, é preciso que a empresa tenha um técnico de automação ou técnicos com esse tipo de treinamento.

d. Estipulação de retorno financeiro

Devido ao fato de este trabalho analisar uma unidade operacional hipotética, as estimativas de *payback* obtidas não refletem integralmente a realidade prática. Isso ocorre porque, ao se realizar uma análise de gestão energética no contexto das empresas brasileiras de saneamento, é necessário considerar variáveis adicionais, como a demanda contratada, a aquisição de energia no mercado livre, a utilização de sistemas próprios de geração solar, o uso de geradores a diesel em horários de ponta, entre outros fatores que influenciam diretamente a análise financeira.

Além disso, o acesso aos dados sobre o valor pago ou contratado por kWh envolve questões financeiras sensíveis, muitas vezes restritas ao setor administrativo das empresas. Por esse motivo, torna-se inviável incluir neste estudo um cálculo preciso de *payback* financeiro.

Diante dessa limitação, a economia em kWh se apresenta como um marcador técnico confiável e relevante. Independentemente da modalidade de contratação ou das fontes de energia utilizadas no processo, esse indicador permite mensurar de forma objetiva a eficiência energética da unidade, refletindo diretamente o desempenho do sistema após a implantação do controlador PID.

É importante destacar que os valores apresentados representam apenas estimativas, construídas com base nas condições atuais da economia interna e externa, e fundamentadas em dados específicos, com o objetivo de mensurar a economia potencial do investimento. Assim, variações como o IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo), as tarifas regionais de energia, possíveis isenções de ICMS e acordos estabelecidos em convenções coletivas de trabalho (CCT) não foram consideradas nas análises.

Ainda assim, a implantação do sistema de controle configura-se como uma melhoria significativa. Além do impacto financeiro, o controlador PID proporcionou uma redução de 14,17% nos gastos com energia e contribuiu para uma maior estabilidade no consumo específico (kWh/m³), mesmo em um período caracterizado por maior volume de chuvas. Por esse motivo, optou-se por não apresentar valores de *payback* ou ROI, pois tais indicadores seriam altamente sensíveis à modalidade contratual de energia (mercado cativo, livre, geração própria etc.) e às tarifas regionais vigentes, não agregando valor científico à análise.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados apresentados na seção anterior, especialmente nas Figuras 4 e 6, observa-se que o controlador PID cumpriu seu objetivo de manter a Estação Elevatória de Esgoto (EEE) estável e operando de forma eficiente, mesmo diante de condições climáticas adversas. Em termos quantitativos, houve uma redução de 14,17% no consumo de energia nos 12 meses posteriores à implementação, atingindo uma média de 0,0581 kWh/m³, mesmo com um aumento de 42% na precipitação pluviométrica – fator externo que impacta diretamente o funcionamento dos conjuntos motobomba.

Além da redução direta no consumo energético, a implementação do controlador PID trouxe benefícios

indiretos relevantes, como maior previsibilidade dos processos, monitoramento mais preciso da unidade e melhor planejamento das atividades de manutenção.

Entretanto, a análise também revelou limitações que atenuam os ganhos observados. O controlador não apresentou impacto significativo na redução das manutenções corretivas e, em alguns casos, pode contribuir para a geração de harmônicos, afetando sensores e a estabilidade do sistema. Fatores externos de natureza econômica – como variações tarifárias e aumento de tributos, como o ICMS – também reduzem o impacto financeiro da economia energética direta.

O PID não reduziu significativamente manutenções corretivas, podendo gerar harmônicos que afetam sensores. Fatores externos (chuvas, tensão inadequada, vibrações, lubrificação, furtos) também influenciam. A ausência de redução significativa nas manutenções corretivas reforça a necessidade de complementar o PID com manutenção preditiva (monitoramento de vibração, temperatura e corrente), prática já recomendada na literatura [18].

A implantação e manutenção adequada do sistema de controle dependem de uma equipe técnica capacitada. Na ausência dessa equipe, há maior dependência de serviços terceirizados, o que impacta diretamente nos custos e no tempo de resposta.

Diante dessa análise, identificam-se ações complementares que podem potencializar os benefícios do PID. No âmbito econômico e contratual, recomenda-se a avaliação do grupo tarifário, revisão de contratos para minimizar multas por ultrapassagem de demanda e, quando viável, migração do mercado cativo para o mercado livre de energia. Tais medidas podem tornar a economia energética mais estável frente às variações externas.

No aspecto da confiabilidade operacional, sugere-se a ampliação das práticas de manutenção preditiva e preventiva, como o monitoramento de vibração, análise da condição de lubrificação, monitoramento de corrente e temperatura em motores, com a incorporação de sensores inteligentes. Também se recomenda a implantação de dispositivos e rotinas para prevenção de furtos em unidades com maior incidência, além da capacitação da equipe interna para realizar parametrizações e ajustes no sistema, reduzindo a dependência de terceiros.

Conclui-se, portanto, que o controlador PID atingiu seu propósito funcional ao promover maior estabilidade operacional e eficiência energética na EEE, mesmo sob condições adversas. Os benefícios diretos (redução de consumo e estabilização da operação) e indiretos (monitoramento aprimorado) são evidentes. No entanto, sua eficácia plena depende da adoção de medidas complementares de natureza contratual, de infraestrutura elétrica, de segurança e de manutenção. As melhorias propostas representam o próximo passo lógico para consolidar os ganhos e tornar a operação da EEE mais eficiente e economicamente sustentável.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho aplicou uma metodologia eficaz para avaliar a viabilidade da implantação de um controlador PID em uma unidade operacional do sistema de saneamento. A

abordagem envolveu a análise de indicadores como consumo de energia (kWh), volume de esgoto tratado (m^3), número de ordens de serviço e tempo destinado à manutenção, associados a variáveis climáticas, resultando em uma avaliação consistente da aplicação do controlador.

Os resultados obtidos indicam que a implantação do PID proporciona benefícios diretos e indiretos, como maior estabilidade operacional, redução de 14,17% do consumo energético em diferentes condições climáticas, aumento da eficiência dos equipamentos e possibilidade de monitoramento mais preciso da unidade. Contudo, é importante destacar que, por se tratar de uma unidade hipotética, as estimativas de *payback* financeiro não refletem integralmente a realidade prática. A obtenção de dados sobre o valor pago ou contratado por kWh envolve questões financeiras sensíveis, muitas vezes restritas ao setor administrativo das empresas. Além disso, fatores como demanda contratada, aquisição de energia no mercado livre, uso de fontes alternativas (geradores a diesel ou sistemas fotovoltaicos) e variações tarifárias regionais impactam diretamente a análise econômica. Por esse motivo, o indicador técnico de consumo específico (kWh/m^3) foi adotado como métrica principal de desempenho, pois representa uma medida objetiva e confiável da eficiência energética, independentemente da modalidade de contratação ou das fontes de energia envolvidas.

É importante ressaltar que as análises apresentadas foram realizadas com base em estimativas para fins acadêmicos. Assim, considerando possíveis reajustes econômicos e variações geográficas, recomenda-se a atualização dos resultados com dados reais da unidade operacional em estudo.

Para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação da pesquisa por meio da coleta de dados de um número maior de unidades, abrangendo sistemas de água e esgoto, a fim de garantir maior representatividade. Recomenda-se também considerar variáveis externas não diretamente relacionadas às características da unidade, como alterações tarifárias de energia, custos e quantidades de insumos utilizados em manutenções corretivas, além de legislações específicas de isenção fiscal aplicáveis. Outro ponto relevante é a análise comparativa entre diferentes tipos de infraestrutura de rede para a implantação do PID, visando identificar a alternativa mais eficiente e economicamente viável.

Por fim, o estudo desenvolvido apresenta potencial para contribuir com a identificação de melhorias em unidades operacionais de saneamento, promovendo maior eficiência. Essa análise pode auxiliar empresas do setor a obterem avaliações mais precisas sobre o impacto do controlador PID e a considerarem sua adoção no planejamento estratégico. As perspectivas futuras aqui elencadas podem apoiar a expansão do uso do PID em diferentes contextos, enriquecendo o conhecimento sobre automação no setor e fomentando avanços técnicos e econômicos na área.

REFERÊNCIAS

- [1] I. P. Santos and O. F. Cauby Bernardes, "Saneamento bÁsico: Desafios na regulaÇÃO," *Nova Hileia | Revista Eletrônica de Direito Ambiental da Amazônia - ISSN 2525-4537*, vol. 17, no. 3, jan. 2025. [Online]. Available: <http://periodicos.uea.edu.br/index.php/novahileia/article/view/3872>

- [2] M. A. Costa, *Diálogos para uma Política Nacional de Desenvolvimento Urbano: temas transversais à PNDU*. Brasília: Ipea, 2024, vol. 3. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-069-1>
- [3] L. Soriano, “Contribuição ao estudo da eficiência energética na operação de reservatórios urbanos de abastecimento de água com o uso de otimização e automação,” Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brazil, 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/11734>
- [4] V. d. S. Nascimento, S. C. L. d. Freitas, V. F. Moreira, J. C. d. Silva, S. M. R. Sanhueza, M. A. Mantovani, R. C. Barbazzelli, and P. V. D. Pereira, “Estudo de gestão energética no contexto das empresas brasileiras de saneamento,” *Caderno Pedagógico*, vol. 21, no. 12, p. e10578, 2024. [Online]. Available: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/10578>
- [5] Eletrobrás, “Eficiência energética em sistemas de bombeamento,” Eletrobrás, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Tech. Rep., 2005.
- [6] J. O. d. Almeida, A. C. d. Andrade, and J. C. L. Júnior, “Smart sewers: Esgoto inteligente utilizando redes IoT para a monitorização de elevatórias de esgoto para a otimização dos processos de esgotamento sanitário na cidade de senhor do bonfim-BA,” in *Anais do 21º SILUBESA – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2024. [Online]. Available: https://abes-dn.org.br/analseletronicos/21silubesa_download/75_tema_ii.pdf
- [7] R. Chen, “A comprehensive analysis of PID control applications in automation systems: Current trends and future directions,” *Highlights in Science, Engineering and Technology*, vol. 97, pp. 126–132, 2024.
- [8] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar *et al.*, “A review of PID control, tuning methods and applications,” *Int. J. Dynam. Control*, vol. 9, pp. 818–827, 2021.
- [9] P. H. Gomes *et al.*, *Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética*. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2009.
- [10] L. H. C. Alexandre, “Avaliação do consumo de energia elétrica em estações elevatórias para abastecimento de água com diferentes configurações de sistemas,” Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Londrina, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uel.br/handle/123456789/15891>
- [11] C. M. Franchi, *Inversores de Frequência – Teoria e Aplicações*, 2nd ed. São Paulo: SRV Editora, 2009.
- [12] M. D. Zancan, *Controladores Programáveis*, 3rd ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.
- [13] M. T. Tsutiya and P. A. Sobrinho, *Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário*, 2nd ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.
- [14] BRK Ambiental, “Água da chuva não deve ser direcionada para a rede de esgoto,” 2025, acessado em: 2025-05-20. [Online]. Available: <https://brkambiental.com.br/maua/agua-da-chuva-nao-deve-ser-direcionada-para-a-rede-de-esgoto>
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 12208: Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de esgoto – Requisitos*, ABNT, Rio de Janeiro, 2020.
- [16] BRK Ambiental, “Estação elevatória de esgoto,” 2025, acessado em: 2025-05-20. [Online]. Available: <https://blog.brkambiental.com.br/estacao-elevatoria-de-esgoto/>
- [17] Instituto Nacional de Meteorologia, “Dados históricos,” 2025, acessado em: 2026-08-04. [Online]. Available: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>
- [18] Acoplast Brasil, “Falhas em motores elétricos,” 2025, acessado em: 2025-08-27. [Online]. Available: <https://blog.acoplastbrasil.com.br/falhas-em-motores-eletricos>